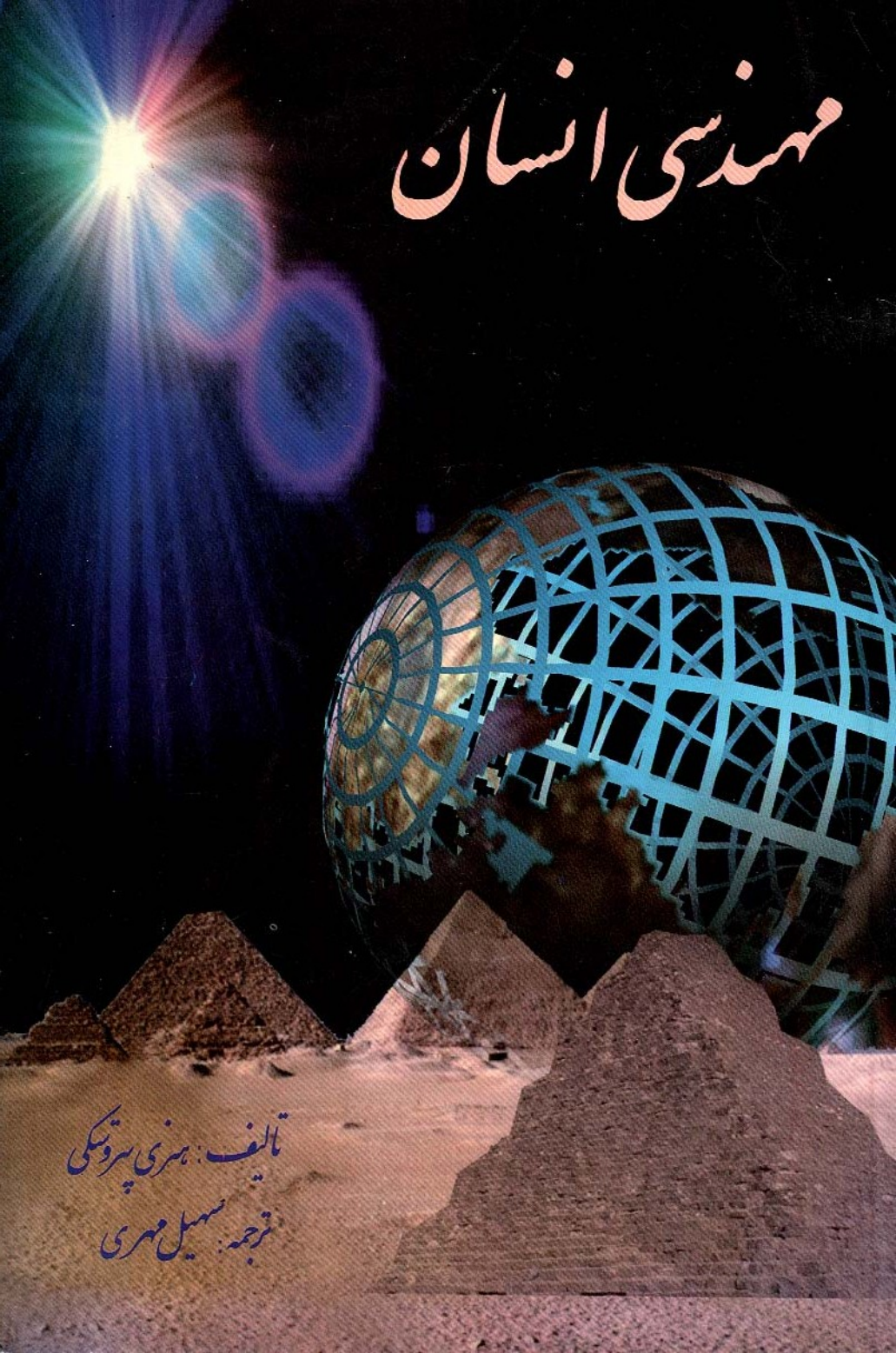
مهندسی انسان



تالیف: هنری پرودسکی
ترجمه: سهیل مهری

مهندسی انسان

This is a Persian translation of:

To Engineer is Human
The Role of Failure in Successful Design,
Henry Petroski,
Macmillan, London, 1985.

Translated by Soheil Mehri.
Samoor Pub., Tehran, 1998.

عنوان: مهندسی انسان
نقش شکست در موفقیت طراحی مهندسی
تألیف: هنری پتروسکی
ترجمه: سهیل مهری
ناشر : نشر سمور
چاپ اول: ۱۳۷۶
تعداد: ۳۰۰۰ نسخه

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

مهندسی انسان

نقش شکست در موفقیت طراحی مهندسی

تألیف : هنری پتروسکی

ترجمه : سهیل مهری

فهرست

ـ پیشگفتار	۷
ـ مقدمه	۹
۱ ـ دنیای انسانی	۱۳
۲ ـ افت و خیزهای رشد	۲۹
۳ ـ درس‌هایی از بازی، درس‌هایی از زندگی	٤۱
ضمیمه: « معجزه خادم » ، اثر الیور وندل هولمز	۵۹
٤ ـ مهندسی و فرضیه	٦۵
۵ ـ پیش بینی شکست	۸۳
٦ ـ طراحی ، عزیمت از نقطه‌ای به نقطه‌ای	۹۷
۷ ـ طراحی و اصلاح	۱۱۳
۸ ـ کمین حوادث	۱۲۹
۹- ایمنی به زبان ارقام	۱٤۷
۱۰- از ترک تا خرابی	۱۵۹
۱۱- اتوبوس‌ها و چاقوها	۱۸۱
۱۲ ـ داستان موفقیت کریستال پالاس	۱۹۹
۱۳ ـ فراز و نشیب پل‌ها	۲۲۷
۱٤ ـ مهندسی قانونی و داستانهای تخیلی مهندسی	۲٤۷
۱۵ ـ از خط کش محاسبه تا کامپیوتر	۲۷۱
۱٦- خبرگان آشفتگی‌ها	۲۹۳
۱۷- محدودیتهای طراحی	۳۰۹
ـ کتابنامه	۳۲۷
ـ فهرست راهنما	۳٤۳

از طرف دیگر، علی‌رغم آنکه همواره با حوادث مختلف مهندسی روبرو هستیم، عملاً بی‌اعتنایی به چنین حوادث مهندسی باعث می‌شود که جامعهٔ مهندسی از اطلاعات و تجربیات ارزشمندی که پشتوانهٔ مستحکمی برای هر نوع فعالیت مهندسی است محروم گردد. هرگاه چنین حوادثی اتفاق می‌افتد معمولاً به گزارشی خبری بسنده می‌شود و بررسی و آنالیز مهندسی و معتبری انجام نمی‌شود، و چنانچه نیز بررسی‌هایی به‌عمل آمده باشد، اطلاعات و جزئیات آن در سطح گسترده منتشر نمی‌شود، و در نشریات عمومی و خصوصاً نشریات تخصصی آنچنان که باید بحث‌ها و بررسی‌های فنی را به‌دنبال ندارد. و قاعدتاً با توجه به اهمیت چنین موضوعی است که نخستین سخنرانی ارائه شده در کنفرانس ملی مقرارت و کنترل ساختمان ایران در اردیبهشت ۱۳۷۲ به دو شکست سازه‌ای معروف در تهران (فرو ریختن سقف سالن فرودگاه مهرآباد در آذر ۱۳۵۲ و ریزش گود ایستگاه مرکزی مترو در آذر ۱۳۷۱)، و سخنرانی دیگری نیز به نقش تجربه در مهندسی و فراهم کردن امکان تجربه‌اندوزی در فعالیت‌های مهندسی اختصاص یافته بود.

توجه به چنین مسائل مهمی نیازمند آگاهی عمومی و بسط و توسعهٔ ادبیات فنی است. کتاب حاضر که، به زبانی ساده و درعین‌حال دقیق و فنی، به مسائلی چون شناساندن مهندسی و فعالیت‌های مربوط به آن و چگونگی ایجاد شکست‌های مهندسی و نقش آن‌ها در پیشبرد دانش فنی پرداخته است شاید در نوع خود اولین مورد در زبان فارسی باشد و مطالعهٔ آن برای عموم مردم و همچنین متخصصان و مهندسان سودمند خواهد بود.

سهیل مهری

خرداد ۱۳۷۲

مقدمه

دوران ما عصر تکنولوژی مدرن لقب گرفته است، لیکن اینکه مهندسی چیست و مهندسان چه کاری انجام می‌دهند بر عموم مردم شناخته شده نیست. حتی ابتدایی‌ترین اصولی که پل‌های بزرگ، جمبوجت‌ها، و کامپیوترهای عظیم بر اساس آن‌ها ساخته می‌شوند برای بسیاری ناآشنا است. بخشی از موضوع بدان علت است که هنوز مهندسی به‌عنوان یك فعالیت انسانی با فرهنگ و ذهنیت ما آمیخته نشده است. علی‌رغم اینکه مربیان و آموزشیاران به‌طور مستمر با مسأله تلفیق کردن تکنولوژی در برنامه آموزشی روز درگیر هستند، تا دانش‌آموزان و دانشجویان امروز را برای زندگی در دنیایی که به‌طور فزاینده‌ای به تکنولوژی وابسته است تربیت کنند، در مورد مناسب‌ترین روش‌های کسب دانش تکنولوژی هنوز توافق عام و کلی وجود ندارد.

همان‌گونه که در این کتاب تأکید داشته‌ام، بر این باور هستم که اندیشهٔ مهندسی واقعاً در ضمیر وجود ما بوده و بخشی از طبیعت انسانی و تجربیات ما را تشکیل می‌دهد. همچنین، اعتقاد دارم که آشنایی با مهندسی و درك ارزش کار مهندسان بدون فراگرفتن تعلیمات فنی و مهندسی نیز

امکان‌پذیر است. بنابراین امیدوارم کسانی که با تکنولوژی هیچ‌گونه آشنایی ندارند، مطالب کتاب را به‌عنوان مقدمه‌ای بر آشنایی با تکنولوژی مطالعه کنند. در واقع، این کتاب پاسخ من به سؤال‌های " مهندسی چیست؟ " و " مهندسان چه کار می‌کنند؟ " است.

طراحی، به مفهوم ساختن چیزی که قبلاً وجود نداشته است، محور مرکزی و اصلی کار مهندسی است، و من برای بیان و توضیح موضوع، طراحی و مهندسی را ماهیتاً مترادف در نظر می‌گیرم. مثال‌ها و نمونه‌هایی در خصوص طراحی سازه‌ای، که مهندسان ساختمان و مکانیك به‌طور مشترك با آن سر و کار دارند، عمده‌ترین و مهم‌ترین موارد این کتاب را تشکیل می‌دهند زیرا که من تجربیات شخصی خود را از این زمینه‌ها کسب کرده‌ام، لیکن اصول و مباحث مورد اشاره به دیگر زمینه‌های مهندسی نیز قابل تعمیم است.

به اعتقاد من مفهوم شکست، و با توجه به زمینهٔ اصلی کتاب مفهوم شکست سازه‌ای و مکانیکی، نقش مهمی در فهمیدن کار مهندسی دارد زیرا اولین و مهم‌ترین هدف در طراحی مهندسی جلوگیری از ایجاد شکست است. بنابراین فاجعه‌ها و حوادث بزرگی که اتفاق می‌افتند نهایتاً ناشی از وجود شکست در طراحی می‌باشند، و درعین‌حال درس‌هایی که از این حوادث آموخته می‌شود برای پیشبرد دانش مهندسی بسیار پربارتر از کلیه سازه‌ها و دستگاه‌های ساخته‌شدهٔ موفق در دنیا است. در واقع، هنگامی که به‌دنبال موفقیت‌ها و کامیابی‌های مستمر، گرایش به استفاده از محدوده‌های ایمنی پایین‌تر، افزایش پیدا می‌کند، ایجاد شکست اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. ایجاد شکست‌ها نیز به نوبهٔ خود باعث گرایش به استفاده از محدوده‌های ایمنی بالاتر می‌گردد، و در نتیجه دورهٔ جدیدی از موفقیت‌ها را پدید می‌آورد. برای فهمیدن اینکه مهندسی چیست و مهندسان چه کار می‌کنند بایستی فهمید که شکست‌ها چگونه

اتفاق می‌افتند و این شکست‌ها چگونه می‌توانند بیش‌تر از موفقیت‌ها در پیشرفت تکنولوژی سهم داشته باشند.

بر خود واجب می‌دانم که از افراد و عواملی که امکانات و منابع پژوهش و تفکر را برای من فراهم آوردند تشکر کنم، لیکن کلیه نقائص احتمالی کتاب ناشی از کار من بوده است.

هنری پتروسکی

سپتامبر ۱۹۸٤

۱

دنیای انسانی

اندکی پس از اینکه راهروهای معلق هتل هایت ریجنسی[1] کانزاس در سال ۱۹۸۱ میلادی فرو ریخت، یکی از همسایه‌ها از من پرسید که چطور چنین چیزی ممکن است اتفاق بیافتد. وی با شگفتی اظهار می‌کرد چطور ممکن است که مهندسان نتوانسته‌اند این راهروی معلق را که سازهٔ ساده‌ای است خوب بسازند؟ تعدادی از حوادث مشهور از قبیل خرابی پل تاکوما[2] و سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰ شرکت هواپیمایی آمریکن[3] را یادآوری کرد و صحبت را به شایعاتی که در خصوص حوادث احتمالی نیروگاه برق هسته‌ای در تری مایل آیلند[4] شنیده بود کشاند و اینکه تشعشعات رادیواکتیو آن تا چه مسافت دوری خواهد بود، و چنین اعتقاد داشت که طرح‌های مهندسی مورد تردید بوده و مهندسان بر ساخته‌های خودشان کنترل کامل ندارند.

---

1 - Hyatt Regency Hotel
2 - Tacoma Narrows Bridge
3 - American Airlines
4 - Three Mile Island

به همسایه‌ام گفتم که پیش‌بینی و تعیین مقاومت و رفتار سازه‌ها همواره آنچنان مسؤولیت آسان و مشخصی نیست که شاید در ابتدای امر به‌نظر می‌رسد، اگرچه که فکر نمی‌کنم با توضیحات کلی و توجیهات مبهم خود توانسته باشم چیزی را در این خصوص برای او روشن کرده باشم. وقتی او را با باغچهٔ سبزیجات خود تنها گذاشتم و به‌طرف خانه راه افتادم، پیش خودم اقرار کردم که نتوانسته‌ام به سؤال او جواب درستی بدهم، چون نتوانسته‌ام به او بگویم که اصولاً مهندسی چیست. بدون پاسخ دادن به این مطلب نمی‌توان توضیح قابل فهمی در خصوص معایب و خرابی‌های احتمالی طرح‌های مهندسی ارائه داد. از هنگام وقوع فاجعهٔ هتل هایت ریجنسی همواره از خود پرسیده‌ام که چگونه خواهم توانست حوادث بعدی تکنولوژیکی را برای افراد غیرفنی و عامی که خواهان دانستن علت آن‌ها هستند توضیح دهم، لذا به‌جای موارد غامض و پیچیده در جستجوی مثال‌ها و موارد ساده و پیش پا افتاده بوده‌ام.

مهندسی هدف و موضوع اصلی خود را نه در دنیای موجود بلکه در دنیایی که مهندسان خودشان می‌سازند جستجو می‌کند، و این دنیا ثبات و یکنواختی طرح خانه‌های زنبورعسل را ندارد که طی قرن‌های متمادی و نسل‌های متوالی به‌صورت غیرمتغیر باقی مانده است، زیرا سازه‌های انسان‌ها در معرض تحولات مداوم و سریعی است. انجام این تغییرات صرفاً فقط به این منظور نیست که ما خواهان تغییر هستیم، اگرچه که همین عامل نیز برای بسیاری کافی و قابل قبول است، بلکه بدان سبب است که سلیقهٔ انسان‌ها، جاه‌طلبی‌ها و همچنین منابعی که در اختیار وی است ثابت و یکسان نمی‌باشد. ما آدمیان همواره تمایل داریم که سازه‌هایمان نیز همانند هنرهایمان با شکوه و خوش‌آیند باشند، وقتی که از نظر اقتصادی در رفاه باشیم زیاده‌روی می‌کنیم، و هرگاه اوضاع روزگار چندان بر وفق مراد نباشد از روی اکراه و ناچاری صرفه‌جویی پیشه می‌کنیم. و

بدین ترتیب است که ما انسان‌ها برخلاف زنبورعسل‌ها خواهان چیزهای عظیم‌تر و بلندتر و بزرگ‌تر هستیم. کلیهٔ این عوامل و ملاحظات غیرمهندسی باعث شده است که کار مهندس تا حدی هیجان‌انگیزتر و بدون تردید غیر یکنواخت‌تر از کار یك حشره باشد. لیکن این تغییرات مداوم عوامل بسیاری را در طراحی و آنالیز سازه‌ها اضافه می‌کند، و وجود تغییرات مداوم نیز خود عاملی است برای امکان ایجاد نقایص و مشکلات بیش‌تر.

کار مهندسی فعالیتی انسانی است و بنابراین همواره در معرض خطا و اشتباه است. بعضی از خطاهای مهندسی فقط نگران‌کننده هستند، مانند ترك‌هایی که در ساختمان بتنی بر اثر نشست اندك پی به‌وجود می‌آید، اما بعضی از این خطاها از نظر انسانی غیرقابل چشم‌پوشی هستند مانند فرو ریختن پل که باعث کشته شدن انسان‌هایی می‌گردد که آن پل را کاملاً سالم و استوار می‌دانسته‌اند. هر دورانی با نگرانی‌های تکنولوژیکی و فاجعه‌های سازه‌ای خود روبرو است، و ممکن است این فکر به اذهان خطور کند که مهندسان بایستی تا کنون از اشتباهات خود تجربیات کافی برای جلوگیری از آن‌ها به‌دست آورده باشند. اما در سال‌های اخیر شاهد حوادث سازه‌ای دهشتناك با تلفات انسانی زیاد و به‌همراه نگرانی‌های فراوان بوده‌ایم، به‌طوری که آمار ثبت‌شده بیانگر تصویر مغشوشی از پیشرفت تکنولوژیکی بوده است تا حدی که این سؤال را برای بعضی‌ها پیش می‌آورد که " پس کو آن پیشرفتی که از آن صحبت می‌شود؟ "

هر فهرستی از سرگذشت فاجعه‌های تکنولوژی معمولاً شامل آخرین نمونه‌های حوادث و شکست‌ها و نقایص است. چنین فهرست‌هایی با وقوع فاجعه‌های جدید به‌طور مستمر تغییر می‌کنند، لیکن هر فهرستی با توجه به مواردی که بدان‌ها اشاره کرده است بیانگر اختلاف عمده در خود این فهرست‌های متفاوت است. در سال ۱۹۷۹ زمانی که چنین به‌نظر می‌رسید

حوادث فراوانی در اینجا و آنجا اتفاق می‌افتند، هر کسی می‌توانست در خصوص شکست‌های تکنولوژی که همگی در اذهان مردم تازگی داشتند سخن بگوید و نیازی به مراجعه کردن به نمونه‌های قدیمی‌تر مانند پل تاکوما نروز برای توضیح مطلب نداشت. چنین به‌نظر می‌رسید که تکنولوژی لجام گسیخته شده است، و در صفحات روزنامه‌ها و مجلات مطالب زیادی در این خصوص و حوادث احتمالی آینده یافت می‌شد.

با این حال، ایجاد شکست[1] در کارهای مهندسی منحصر به زمان ما نبوده و موضوع تازه‌ای نمی‌باشد. حدود چهار هزار سال قبل بابلی‌ها مجموعه‌ای از ضوابط قانونی داشته‌اند که اکنون به نام قانون حمورابی[2] شناخته می‌شود. در میان نزدیك به حدود سیصد کتیبهٔ قدیمی به خط میخی که شامل قوانین مختلفی از قبیل وضعیت زنان و مقرارت داد و ستد می‌باشد، چندین کتیبه نیز مستقیماً در مورد ساختن خانه‌ها و مسؤولیت‌های سازندگان آن‌ها نسبت به ایمنی ساختمان‌ها است :

اگر سازنده‌ای خانه‌ای برای کسی بسازد و این ساختمان را محکم نساخته باشد، و ساختمانی که او ساخته است خراب شود و باعث مرگ صاحب‌خانه گردد، مجازات سازندهٔ آن ساختمان مرگ است.

اگر خرابی ساختمان باعث مرگ فرزند صاحب‌خانه گردد، یکی از فرزندان سازندهٔ ساختمان محکوم به مرگ خواهد شد.

اگر خرابی ساختمان باعث مرگ بردهٔ صاحب‌خانه گردد، سازندهٔ ساختمان بایستی یك بردهٔ مشابه به وی بدهد.

اگر خرابی ساختمان باعث از بین رفتن اموال صاحب‌خانه گردد،

---

1 - failure

۲- Hammurabi ، (ح ۱۹۱۳-۱۹۵۵ ق م)، پادشاه بابل

سازندهٔ ساختمان بایستی هر آنچه را از بین رفته است جایگزین کند، و از آنجا که خانه‌ای را که ساخته است محکم نساخته و آن خانه خراب شده است وی بایستی خانه‌ای را که خراب شده است به هزینهٔ خود مجدداً بسازد.
اگر سازنده‌ای خانه‌ای برای کسی بسازد و در ساختن آن ضوابط لازم را رعایت نکند و یکی از دیوارهای ساختمان خراب شود، سازنده بایستی آن دیوار را به هزینهٔ خود تقویت و بازسازی کند.

این مقررات و وضعیت شاید دورنمایی باشد از آنچه که به‌دنبال خراب شدن راهروهای هتل هایت ریجنسی پیش آمد، و مشخص گردید که این راهروهای معلق بسیار ضعیف‌تر از آن‌گونه که آیین‌نامهٔ ساختمانی کانزاس[1] مقرر کرده است ساخته شده است. با وجود نظرات متفاوتی که کارشناسان ابراز می‌کردند، طی چند ماه پس از فرو ریختن راهروها مجموع رقم دعوی‌های طرح شده در دادگاه به حدود سه میلیارد دلار رسید. مدتی بعد نیز به کلیهٔ کسانی که در آن شب حادثه در هتل حضور داشتند پیشنهاد شد که در ازای دریافت یك هزار دلار از هرگونه ادعای خسارت و طرح دعوی علیه سازنده و یا هتل چشم‌پوشی کنند و رضایت کتبی بدهند. و هنوز تا امروز نیز صاحبان عقاید گوناگون در خصوص تقصیر یا بی‌گناهی عوامل حادثهٔ هتل هایت نتوانسته‌اند به یك نظر واحد دست یابند. پس از بیست ماه تحقیقات، دادستان آمریکا و بازرس ایالت میسوری[2] مشترکاً اعلام کردند که هیچ شواهدی که نشان‌دهندهٔ وقوع جرم در رابطه با حادثهٔ مذکور باشد نیافته‌اند. اما دادستان کل ایالت میسوری دیدگاه دیگری داشت و

---

1 - Kansas City Building Code
2 - Missouri

مهندسان را به " قصور بزرگ " متهم کرد. مهندسانی که درگیر پروژه بودند در معرض از دست دادن جواز حرفه‌ای کار خود قرار گرفتند، و نه البته از دست دادن زندگی‌شان، ولی پس از سه سال که این مطلب نوشته می‌شود هنوز رأی هیأت منصفه صادر نشده است.

فاجعهٔ هتل هایت کانزاس منجر به بیش‌ترین تلفات انسانی ناشی از خرابی یك ساختمان در تاریخ ایالات متحدهٔ آمریکا گردید و تا مدت‌ها در رأس اخبار و صفحات اول روزنامه‌ها قرار داشت. این واقعیت که حادثهٔ مذکور به‌صورت خبر مهم روز در آمده بود خود نشان‌دهندهٔ آن است که تعداد بی‌شماری از ساختمان‌ها و سازه‌ها، که بسیاری از آن‌ها از لحاظ اهمیت طراحی کم‌تر از آن هتل نیستند، ایمن می‌باشند لیکن چون حادثه‌ای برای آن‌ها نیافتاده است مورد توجه قرار نگرفته‌اند. طبق برآوردهای انجام شده، احتمال شکست و خرابی یك ساختمان بتنی مسلح یا فولادی در کشورهای پیشرفته‌ای مانند ایالات متحده یا انگلستان بین حدود یك در میلیون تا یك در یکصد هزار میلیارد می‌باشد، و احتمال تلفات انسانی بر اثر خرابی سازه‌ها تقریباً یك در ده میلیون در سال است. این میزان احتمال برابر حدود بیست و پنج تلفات سالانه در ایالات متحده می‌باشد، بنابراین مرگ ۱۱۴ نفر طی یك حادثه در شهر کانزاس به‌راستی نیز خبر و حادثهٔ بزرگی است.

حوادث رانندگی در ایالات متحده سالانه حدود پنجاه هزار نفر تلفات دارد، ولی از آنجا که این تلفات به‌صورت یك یا دو مرگ و میر در هر سانحه می‌باشد تأثیر احساسی چندانی بر روی افکار عمومی جامعه ندارد. فقط در بعضی از تعطیلات آخر هفته که مجموع تلفات انسانی حوادث رانندگی به صدها نفر می‌رسد توجه ما به اهمیت و بزرگی خطری که در اطراف ما است جلب می‌شود. همچنین معمولاً حوادث رانندگی فقط وقتی صفحهٔ اول روزنامه‌ها یا اخبار شب رادیو و تلویزیون را به‌خود

اختصاص می‌دهند که تعداد تلفات آن غیرعادی باشد و یا اینکه شخصیت مهم و مشهوری در این حادثه کشته شده باشد. در اینجا این گفتهٔ قدیمی به‌خاطر می‌آید که مضمون " سگی پاچهٔ مردی را گرفت " اصلاً خبر به حساب نمی‌آید، البته به استثنای وقتی که سگ مذکور سگ مشهوری باشد، اما مضمون " مردی پای سگی را گاز گرفت " خبر قابل توجهی است.

ما در برخورد با مسائل ناشناخته و جدید همان‌قدر که دچار نگرانی و احساس عدم اطمینان می‌شویم، به‌طرف آن‌ها جذب شده و علاقمند به دانستن بیش‌تر هستیم. هنگامی که تکنولوژی هوانوردی هنوز جدید و جوان محسوب می‌شد مردم به دلیل ترس از سقوط هواپیما از سفرهای هوایی اجتناب می‌کردند. حتی در حال حاضر نیز که صنعت هوانوردی متکی به تکنولوژی بسیار پیشرفته و مطمئن است، بسیاری از سالمندان که حاضر نیستند کمی در بارهٔ خطرات رانندگی با اتومبیل فکر کنند نگران پرواز با هواپیما هستند. اما نسل‌های جوان‌تر که استفاده از هواپیما برای آن‌ها همان‌قدر عادی است که استفاده از راه‌آهن و اتومبیل برای پدران و پدربزرگانشان بود چندان نگرانی به‌خود راه نمی‌دهند. علی‌رغم سقوط هواپیمای دی‌سی‌ـ ۱۰ در سال ۱۹۷۹ در شیکاگو، اینان بر اساس منطق و اصول عقلانی معتقد به ایمن بودن سفرهای هوایی هستند. به‌طوری که دو سال بعد از آن حادثه، طبق اعلام سازمان هوانوردی آمریکا[1] خطوط هوایی داخلی طی عملکرد خود در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۱ حتی یك مورد تلفات هم نداشته‌اند. طی این مدت بیش از پانصد میلیون نفر با ده میلیون پرواز مسافرت هوایی داشته‌اند. تجربه نشان داده است که خطرات تکنولوژی کاملاً قابل کنترل هستند.

---

1 - Federal Aviation Administration

به‌هرحال، همان‌طور که جنگ‌ها نیز ثابت کرده است، سازمان‌های دولتی همان‌قدر که به جان شهروندان خود اهمیت می‌دهند به مسائل مالی و سیاسی نیز توجه دارند، و این دو موضوع ممکن است که در بعضی موارد در تناقض باشند. در راه تلاش و کوشش برای ایجاد ایمنی کامل و مطلق، مخاطرات ناشی از سازه‌های مهندسی در زندگی انسان‌ها و همچنین مخاطرات ناشی از عوامل محیطی در جامعه غالباً با مسائل و مشکلات اقتصادی تعارض پیدا می‌کند. همهٔ ما به این موضوع آگاهی داشته و همواره در مسائل روزمره بین سلامت زندگی خود و موجودی جیب خود حالت فیمابینی را اختیار می‌کنیم، مثل وقتی که اتومبیل کوچک‌تر و ارزان قیمتی را می‌خریم که بدون تردید ناامن‌تر از اتومبیل‌های بزرگ‌تر و مجهزتر است. در صنایع اتومبیل‌سازی استفاده از کمربندهای ایمنی، سپرهای ضربه‌گیر، و دستگاه کنترل دود باعث کاهش خطرات می‌گردد، اما به‌دست آوردن چنین مزیت‌هایی به قیمت صرف هزینه‌های بیش‌تر برای خریداران تمام می‌شود. انجام هر کار اصلاحی بیش‌تر، همانند استفاده از سیستم بالشتك هوا در هنگام تصادف، نیازمند صرف وقت زیاد برای تکمیل طرح بوده و به قیمت اتومبیل نیز افزوده می‌شود. بنابراین همواره کشاکش مداومی بین سازندگان و مصرف‌کنندگان برای تولید اتومبیل ایمن با قیمتی قابل قبول وجود دارد.

بدین ترتیب مسائل اقتصادی در کنار مهندسی و ایمنی قرار می‌گیرند. همهٔ پل‌ها و ساختمان‌ها را می‌توان ده بار قوی‌تر از آنچه که اکنون ساخته می‌شود ساخت، لیکن این کار به بهای افزایش سرسام‌آوری در هزینه‌ها تمام خواهد شد. ضمن آنکه هنوز هم باب جدل باز خواهد بود که چرا ده بار قوی‌تر؟ زیرا با توجه به اینکه در حال حاضر پل‌ها و ساختمان‌های اندکی دچار خرابی می‌شوند، بدیهی است که قوی‌تر کردن آن‌ها به میزان ده برابر از نظر سازه‌ای نیز معقول نمی‌باشد. چنین

محافظه‌کاری غیرمنطقی اقتصاد ما را تحت فشار شدید قرار خواهد داد و ساختمان‌ها و تأسیسات ساخته‌شده در محیط ما آن‌قدر حجیم و غول‌آسا خواهند شد که بایستی تجدیدنظر اساسی در معماری و سیستم موجود به‌عمل آید. بله، ده بار قوی‌تر شدن واقعاً خیلی زیاد است، پنج بار چطور؟ ولی پنج بار قوی‌تر نیز قابل بحث است و گفته خواهد شد که این‌هم خیلی زیاد است. بالاخره انتخاب هر عددی که بین محدودهٔ عدم انجام هیچ‌گونه تغییری در مشخصات موجود تا قوی‌تر کردن سیستم به میزان پنج یا هزار درصد باشد دچار سرنوشتی خواهد شد که زنون[1] برای رسیدن خودش از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر مطرح کرد. البته در کشورهای توسعه نیافته شاید امکانات آنچنان نباشد که بتوانند در خصوص خطرپذیری و یا پارادوکس‌ها بحث و مجادله کنند، و لذا می‌توان انتظار داشت که میزان احتمال وقوع خرابی و انفجار ساختمان‌ها و بویلرهای آنان بسیار بیش‌تر از موارد مشابه در کشورهای توسعه یافته باشد.

گرچه غیرانسانی و سنگدلی به‌نظر می‌رسد اما به‌هرحال عواقب میزان قابلیت‌های سازه‌ای را علاوه بر ارزش زندگی انسان‌ها، بر اساس هزینهٔ مصالح نیز می‌توان ارزیابی کرد. این کار طی تحقیقاتی اخیراً توسط

---

۱ - Zeno ، (قرن چهارم و سوم قبل ازمیلاد)، فیلسوف یونانی و بانی مکتب رواقیون. پارادوکس معروف زنون چنین است: برای اینکه از جایی به جای دیگر بروم، ابتدا باید نیمی از آن مسافت را بپیمایم. لیکن برای پیمودن نیمی از مسافت باید نیمی از نصف را طی کنم، و همین‌طور تا بی‌نهایت. همچنین، برای اینکه هر مرحله‌ای را بپیمایم، مدت زمانی، هر اندازه هم کم، وقت خواهد گرفت. بدین ترتیب بایستی شماری نامتناهی از مسافت‌ها را در شماری نامتناهی از فواصل زمانی بپیمایم. بنابراین برای طی این مسافت، هر قدر هم کوتاه باشد، تا ابد زمان لازم خواهم داشت، و بنابراین در هیچ زمان متناهی قادر نخواهم بود آن فاصله را طی کنم. (م)

مؤسسه ملی استاندارد آمریکا[1] با همکاری آزمایشگاه بتل کلمبوس[2] صورت گرفت. این تحقیق نشان داد که پدیدهٔ شکست، که شامل موارد گوناگون و متنوعی مانند شکستن عینك و ترك برداشتن روسازی بزرگراه‌ها و خرابی پل‌ها و از کار افتادن ماشین‌آلات می‌شد، سالانه بیش از یکصد میلیارد دلار خسارت وارد می‌کند، این برآورد علاوه بر ارزش خود سازه شامل هزینهٔ بازسازی و جایگزینی آن و هزینه‌های بیمه نیز می‌باشد. بسیاری از این هزینه‌ها خصوصاً در مورد حمل و نقل و صنایع ساختمانی ناشی از عواملی از این قبیل می‌باشد: در نظر گرفتن تمهیداتی برای جلوگیری از شکست به‌طریق انجام طراحی دست‌بالا که منجر به سنگین‌تر شدن غیرضروری آن‌ها می‌شود، و هزینهٔ نگهداری به‌منظور مراقبت از امکان بروز ترك و توسعهٔ آن، و صرف هزینه‌های سرمایه‌ای در رابطه با خرید و نگهداری قطعات یدکی برای مصرف در مواقع ایجاد شکست. گزارش مذکور که در سال ۱۹۸۳ تهیه گردید خاطر نشان می‌سازد که با استفادهٔ صحیح از تکنولوژی موجود و با دست یافتن به تکنیك‌های پیشرفته در کنترل شکست از طریق انجام تحقیقات و توسعهٔ بیش‌تر می‌توان خسارات ناشی از شکست را به نصف تقلیل داد.

آخرین مطالعات انجام‌شده در خصوص وضعیت سازه‌ها و تأسیسات موجود نشان می‌دهد که سیستم‌های آبرسانی و سیستم‌های فاضلاب و شبکه‌های بزرگرادها و پل‌ها در نقاط مختلف کشور آمریکا دارای معایب و اشکالات عدیده‌ای هستند که بهسازی آن‌ها نیازمند صدها میلیارد دلار بودجه می‌باشد. (طبق بعضی از برآوردها هزینه‌های این بهسازی حدود سه هزار میلیارد دلار تخمین زده شده است). بخشی از این وضعیت ناشی

---

1 - National Bureau of Standards
2 - Battelle Columbus Laboratories

از عدم نگهداری صحیح و صرفه‌جویی مالی در سال‌هایی بوده است که بودجهٔ شهرداری‌ها توانایی تحمل هزینه‌های انرژی و پرسنل و غیره را نداشته است. بعضی از خطوط لولهٔ آب در شهرهای بزرگی چون نیویورك بیش از صد سال عمر دارند، در حالی که آن‌ها برای الی‌الابد طراحی و ساخته نشده‌اند و اصولاً چنین توقعی هم وجود ندارد. لذا چنین لوله‌هایی قاعدتاً بایستی طی یك برنامهٔ منظم و مستمر تعویض شوند تا کل سیستم شبکهٔ آبرسانی در شرایط مطلوبی قرار داشته باشد، و شکستگی شاه‌لوله‌ها و قطع آب به‌ندرت اتفاق بیافتد. چنین شکستگی‌های ناگهانی می‌تواند عواقب ناگواری داشته باشد، مثلاً وقتی که در سال ۱۹۸۳ شاه‌لوله‌ای که در مرکز مانهاتان[1] و در سال ۱۹۱۵ نصب شده بود شکست، یك نیروگاه برق که در زیر زمین بود پر از آب شد و آتش‌سوزی به‌وجود آمد. خرابی شش ترانسفورمر باعث قطع برق به مدت چندین روز شد. و این واقعه مصادف با روزهایی از سال بود که معمولاً هزاران خریدار از مناطق مختلف کشور برای خرید فصلی به ناحیهٔ فروش پوشاك نیویورك هجوم می‌آورند. مناطق خاموشی شهر نیز شامل محله‌های تجاری مذکور و سالن‌های نمایش مدل‌ها و پوشاك می‌شد. خسارت ناشی از این وقفه در تجارت پوشاك بالغ بر میلیون‌ها دلار شد.

برای فهمیدن اینکه مهندسان چه تلاشی برای حصول اطمینان از عدم وقوع چنین شکست‌های سازه‌ای و مکانیکی و سیستمی انجام می‌دهند، و همچنین برای فهمیدن اینکه اشتباهات چگونه پیش می‌آیند و حوادثی با عواقب دور از انتظار را به بار می‌آورند، لازم است که حداقل تا حدودی طبیعت کار مهندسی طراحی فهمیده شود. این ماهیت فرآیند طراحی است که مهندسی را از علم متمایز کرده و آن را با هنر پیوند می‌دهد،

۱- Manhattan ، بخشی از شهر نیویورک آمریکا

به‌طوری که طی این فرآیند قسمت‌های مختلفی از " دنیای موجود " دانشمندان و " دنیای ساختهٔ " مهندسان تلفیق و تغییرشکل یافته و چیزی به‌وجود می‌آید که طبیعت نظیر آن را ندیده باشد. همان‌طور که کار مهندس کم‌تر از کار شاعری که کلمات را بر کاغذ سفید می‌آورد، نقاشی که رنگ را بر روی بوم پخش می‌کند، یا آهنگ‌سازی که تکمه‌های خاموش را به صدا در می‌آورد، بر تجربیات تکنیکی استوار نیست، نتایج کارها و فعالیت‌های مهندسی نیز همانند یك شعر یا یك تابلو و یا یك قطعه موسیقی کاملاً برای شناخت و درك ارزش آن در دسترس است. در حقیقت، همان‌طور که همهٔ ما در دوران کودکی با شاهکارهای خود خلاقیت هنری را مزه مزه کرده‌ایم، و والدین خود را مغرور و سرمست، تك تك ما نیز با یاد گرفتن تعادل بدن بر روی پاها و بعدها نیز با حفظ تعادل در طی حرکت‌ها و وضعیت‌های دشوار ماهیت مهندسی سازه را تجربه کرده‌ایم. ما یاد گرفته‌ایم که چگونه تعادل خود یا اشیائی را که در دست ما است حتی در شرایط و حالات سخت نیز حفظ کنیم، همان‌گونه که مدت‌ها قبل از آن نیز یاد گرفته بودیم که با جثهٔ ناتوان و ناپایدار خود کم‌کم روی زمین بخزیم، از جای خود بلند شویم، و تاتی تاتی راه برویم. اگر می‌توانستیم آن تلاش‌های اولیه خودمان را برای بر پا ایستادن در میان پایه‌هایی از دست‌ها و پاهای پدر و مادر یا دوستان آن‌ها را به‌خاطر بیاوریم، آن‌گاه بهتر می‌توانستیم از کارها و موفقیت‌های مهندسان قدردانی کنیم، چه آن‌ها را به نام سازنده در بابل قدیم یا به نام دانشمند در لس‌آلاموس[1] بشناسیم. تمامی کوشش آنان برای رسیدن به این نتیجه است که چیزی را بر پا کنند که قبلاً امکان

---

۱ - Los Alamos ، شهری در کارولینای شمالی آمریکا و مرکز تسهیلات انرژی اتمی

نداشته است و با دستکاری طبیعت چیز جدیدی بسازند، و از همه مهم‌تر، از ایجاد شکست در این دستاوردها جلوگیری کنند.

اما با این وجود، از آنجا که بشر جایزالخطا است، ساخته‌های وی نیز مصون از اشتباه و نقص نمی‌تواند باشد. بنابراین، تاریخچهٔ مهندسی سازه، یا به‌طور کلی تاریخچهٔ مهندسی، از موفقیت‌ها و شکست‌ها انباشته شده است. اگرچه پیروزی‌ها و موفقیت‌ها بسیار با شکوه و ارزشمند هستند، اما ناکامی‌ها و شکست‌ها معمولاً بیش‌تر از آن‌ها آموزنده هستند. به همین دلیل است که هیچ تاریخچه‌ای را نمی‌توان بدون اشاره به اشتباهات و خطاها نوشت، چیزهایی که می‌توانند راهنمایی مناسبی برای شروع دوباره و پیروزی‌های جدید باشند. قانون حمورابی اگرچه می‌توانسته عامل فشاری برای محکم و سالم ساختن خانه‌های مشابه و تکراری بوده باشد، ولی مسلماً نمی‌توانسته عامل تشویق کننده‌ای در راه پیشرفت خانه‌سازی باشد، البته نه به‌خاطر اینکه از آسمانخراش یا پل اسم نبرده است، بلکه به این سبب که هیچ سازنده‌ای به‌دلیل وجود مقرارت غلاظ و شداد در قانون مذکور جرأت نمی‌کرده است اقدام به ساختن خانه‌ای بکند که به‌نظر او مناسب‌تر و بهتر بوده ولی تا آن زمان ساخته نشده بوده است. این سخن بدان معنی نیست که بایستی به مهندسان مجوز داده شود که با مرتکب شدن سهو و خطا تجربه‌اندوزی کنند، بلکه فقط برای جلب توجه افراد به این نکته است که طبیعت انسانی خواهان عبور از گذشته و دست یافتن به مرزهای جدید است، چه در ساختمان‌سازی و چه در هنر، و اینکه مهندسی یك فعالیت انسانی است.

هنگامی که دانشجوی مهندسی بودم همواره نگران مسؤولیت‌هایی بودم که پس از اتمام تحصیلات بر عهده من قرار می‌گرفت. واقعاً گیج کننده بود که چگونه می‌توانم این اطمینان کامل را به‌دست آورم که چیزی را که من طراحی خواهم کرد دچار خرابی نشود و عده‌ای از

مردم را هلاك نکند؟ خوب می‌دانستم که معلوماتی که از کتاب‌هایم کسب کرده‌ام کامل نیست، تکالیفی را که انجام می‌دادم به‌ندرت فاقد هر گونه اشتباهی بود، و نمرات من همگی بیست نبودند. این افکار تا مدت‌ها مرا پریشان ساخته بود، و بیش‌تر حیرت می‌کردم که چرا هم‌کلاسی‌های من، چه نمره بیستی‌ها و چه نمره دهی‌ها، دچار چنین تشویشی نیستند. این موضوع هیچ‌وقت در بین صحبت‌هایمان مطرح نمی‌شد، و بالاخره پس از اتمام تحصیلات با انتخاب کار تدریس به‌جای پرداختن به شغل مهندسی از مواجهه شدن با این موضوع پرهیز کردم. از آن موقع به‌بعد کم‌کم متوجه شدم که این نگرانی من امری غیرعادی در میان دانشجویان مهندسی نیست و بسیاری از دانشجویان مهندسی، اگر نگوییم همهٔ آن‌ها، دچار این شك و تردید و دل‌مشغولی در مورد موفقیت و شکست بوده‌اند. دانشجویان پزشکی نگران از دست رفتن بیمار هستند و دانشجوی وکالت نیز نگران از دست دادن یك دعوی مشکل است. اما اگر همهٔ ما این نگرانی‌ها و تشویش‌ها را از کار و حرفهٔ خود کنار بگذاریم، عملاً باعث ایجاد همان چیزی خواهیم شد که آرزوی اجتناب از آن را داریم. دقیقاً به همین سبب است که برای انجام هر کاری تمام سعی و تلاش خود را به کار می‌بریم، و همواره در فکر انجام کار به بهترین نحو ممکن هستیم. کم بودن حوادث و شکست‌های سازه‌ای گواه صادقی است بر اینکه حرفهٔ مهندسی، حتی در مورد کارهای بسیار نادر و مشکل، به‌سمت خطرپذیری نامسؤولانه منحرف نشده است.

بدین ترتیب، علاوه بر این سؤال که چرا حوادث سازه‌ای اتفاق می‌افتند، بایستی این سؤال هم مطرح شود که چرا حوادث سازه‌ای بیش از این اتفاق نمی‌افتند؟ آمار نشان می‌دهد شکست‌هایی که تیترها و صفحات اول روزنامه‌ها را به‌خود اختصاص می‌دهند خیلی کم بوده و همان‌ها نیز معمولاً دارای آن ارزش خبری که وانمود می‌شود نیستند، و برای دانستن

اینکه چرا خطر حوادث سازه‌ای کاملاً برابر صفر نمی‌باشد لازم است که به مسألهٔ انحصاری مهندسی یعنی طراحی چیزی که قبلاً وجود نداشته است توجه کنیم. با دانستن این نکتهٔ مهم علاوه بر اینکه ارزش این همه پایین بودن احتمال حوادث سازه‌ای روشن خواهد شد، بلکه معلوم نیز خواهد شد که کم‌تر کردن آن هم چقدر مشکل است. اگرچه از نظر تئوری می‌توان شاخص خطرپذیری را تا هر میزان دلخواه به صفر نزدیك کرد، لیکن چنین به‌نظر می‌رسد که طبیعت انسانی و تمایلات انفرادی و اجتماعی بشر با رسیدن به چنین جامعهٔ بی‌خطر سازگاری ندارد.

۲

افت و خیزهای رشد

ما همگی به مفهومی مهندس هستیم زیرا اصول ماشین‌ها و سازه‌ها در اسکلت بدن ما به‌کار رفته است. ما راه رفتن را یاد گرفته‌ایم و آموخته‌ایم که چگونه بدن خود را در مقابل نیروهای طبیعت استوار نگهداریم. با استفاده از کامپیوتر مغز خود مسیرهای دست‌ها و پاهای خود را محاسبه می‌کنیم، و بیس‌بال و فوتبال بازی می‌کنیم، کاری که بسیار مشکل‌تر و پیچیده‌تر از سیستم اسلحه‌های پیشرفته‌ای است که می‌توانند موشک‌ها را هدف بگیرند. لذا اعجاب‌آور نیست که خلقت انسانی برجسته‌ترین و عظیم‌ترین شاهکار مهندسی تمام دوران باشد. ولو اینکه بسیاری از ما فراموش کرده باشیم که چقدر در مورد اصول و کارهای مهندسی می‌دانسته‌ایم، شعرهای دوران بچگی و داستان‌های خیالی کودکانه نشانگر آن است که آگاهی‌های ما در این رابطه بسیار بوده است.

ما به دنیایی قدم نهاده‌ایم که مملو از آسایش و خطر است. و از لحظهٔ تولد عادت کرده‌ایم که همواره با احتمال توأم وجود یا عدم وجود شکست‌های سازه‌ای مصیبت‌بار زندگی کنیم. پزشك و پرستاری که ما را در اتاق زایمان می‌گیرند شوالیه‌ها و جرثقیل‌ها و بالابرهایی انسانی هستند که هزاران نوزاد را در اتاق زایمان کله‌پا نگهمیدارند، به مادر نشان

می‌دهند، تمیز می‌کنند، اثر پا را می‌گیرند، نوار دست می‌گذارند، سرپا نگهمیدارند، به پدر نشان می‌دهند، و به اتاق نوزادان تحویل می‌دهند. وقتی که فرزند خودم این مراحل را طی می‌کرد در حالی که نزدیك بود قلبم از جای خود در بیاید به این کارها خیره شده بودم، تجربهٔ نفس‌گیری بود که مرا از پا انداخت. حتماً در جایی یك وقتی بر اثر بی‌دقتی پزشکی یا کم‌توجهی پرستاری نوزادی به زمین افتاده است، اما نه والدین و نه نوزادان نمی‌توانیم و نباید هم بر این احتمالات بسیار بعید و ماجراهای مخوف تکیه کنیم، در غیراین‌صورت نژاد انسان را در همان اتاق زایمان به گور خواهیم سپرد. برای همین است که اشعار کودکانه ما را یاری می‌دهد که به این‌گونه مسائل با آرامش بیش‌تری فکر کنیم.

کودك نازی مشغول بازی
تاب می‌خوره بالای درخت،
باد که میاد
به هوا میره تاب.
اگه شاخه بشکنه،
پایین می‌افته تاب.
کودك نازی به همراه اون،
ولو می‌شن روی زمین.

در مسیر میان بیمارستان تا خانه، در میان دست‌های پدر و مادر و دوستان و بستگان و شاید هم خواهر و برادر نه چندان بزرگسال خود هستیم. ما را به‌زور روی پرزهای پرپشت و نرم قالی و روی موزائیك صاف و سخت سرپا نگهمیدارند، قبل از اینکه به‌راه بیافتیم سواری می‌گیریم و هر لحظه این خطر وجود دارد که یکی از زانوهای عمو ناگهان خم شود و ما به زمین پرت شویم. ما از روی پل‌هایی از بازوها

که بدون هیچ طرح و برنامه‌ای ساخته می‌شوند بین مادر و خاله، بین همسایه و پدر، بین برادر و خواهر، که هیچ‌کدام آن‌ها مهندس سازه با جواز رسمی نیستند، دست‌به‌دست می‌شویم. برای فراموش کردن ترس و وحشت خود به پدر و مادر پناه می‌بریم و یاد می‌گیریم که به تیرها و ستون‌های بازوهای آن‌ها و ننوی خود اعتماد کنیم. با دنیا خو می‌گیریم و در آغوش نیروی ثقل به خواب می‌رویم. خواب‌های رویایی می‌بینیم و در همان حال صدایی را که می‌خواهد ما را بیدار کند می‌شنویم. به نجواهای گرم و شیرینی که در دنیای سکوت ساختمانی از صدا بنا می‌کنند گوش می‌دهیم و به‌کمك پل‌های ارتباطی ـ لالایی‌ها و بازی‌ها در می‌یابیم که نه تنها ما بلکه ساختار اطراف ما هم نیاز به مراقبت دارند.

کودك نازم،
پل داره خراب می‌شه،
می‌افته پایین، می‌افته پایین،
پل داره خراب می‌شه.
کودك نازم،
بساز اونو از چوب و از سنگ،
چوب و سنگ، چوب و سنگ،
بساز اونو از چوب و از سنگ.

وقتی کم‌کم شروع می‌کنیم به غلت زدن و ایستادن و خزیدن و راه رفتن و به‌طور کلی نگهداشتن وزن بدن خود و همچنین بلند کردن اشیاء و حمل آن‌ها، به‌تدریج اعضاء بدن ما یاد می‌گیرند که چگونه همانند اهرم و تیر و ستون و حتی سازه‌هایی مانند دکل و پل عمل کنند. در ابتدا ما این کارها را به‌صورت ناشیانه و ناآزموده انجام می‌دهیم، ولی بعدها از اشتباهات خود پند می‌گیریم. هر بار که پل ـ بدن ما خراب

می‌شود، دو باره آن را استوار و برپا می‌کنیم. با دست‌ها و زانوهای خود روی رودخانهٔ زیرمان پل می‌زنیم و آهسته به جلو می‌رویم. بر چهار دست و پا راه رفتن تسلط پیدا می‌کنیم، و در این کار استاد می‌شویم، با چالاکی بیش‌تر و آزادانه‌تر حرکت می‌کنیم و کم‌تر به امکان خراب شدن تیرها و ستون‌های خود فکر می‌کنیم. تئوری سازه‌های کودکانهٔ خود را توسعه می‌دهیم و فرض می‌کنیم که می‌توانیم راه برویم و اعضاء شبه دایروی خود را در ارتفاع بالاتر به حالت طره‌ای نگهداریم. با من‌من کردن و ورور کردن به این بلندپروازی‌ها فکر می‌کنیم و با تکبر مخصوص جوانی به ستاره‌ها پر می‌کشیم. با هر تلاش متزلزل که برای راه رفتن انجام می‌دهیم، بدن ما از این افتادن‌ها یاد می‌گیرد که دفعهٔ بعد چه کاری را نباید بکند. و فقط وقتی می‌توانیم بدون فکر کردن راه برویم و بدون افتادن فکر کنیم که هم‌زمان با فراگیری راه رفتن نیافتادن را هم یاد گرفته باشیم. گاهی اوقات دچار حادثه می‌شویم و دست‌ها یا پاهایمان دچار شکست می‌شوند. آن‌ها را درست می‌کنیم و مثل سابق به راه خود ادامه می‌دهیم. در تمام طول عمر خود، بجز هنگام بیماری، مثل شاخ شمشاد راه می‌رویم تا اینکه به‌علت پیری و کهولت سن سازهٔ بدن ما رو به سستی می‌گذارد و به چوب‌دستی و مانند آن نیازمند می‌شویم. در بیش‌تر دوران زندگی می‌توانیم به راه رفتن خود تا حد قابل انتظار اعتماد داشته باشیم، اما اگر سازهٔ بدن خود را بیش از حد متعارف راه رفتن بارگذاری کنیم و به آن فشار آوریم، مثلاً به حالت دو ماراتن یا دو سرعت بدویم، آن وقت در معرض خطر شکست سازه‌ای از نوع کشش ماهیچه‌ای یا شکستگی استخوان قرار خواهیم گرفت. اما احساس درد بـــه ما کمك می‌کند که از تقلای زیاد دست بکشیم و بدن خـــود را دچار فرسودگی و اتصالات آن را دچار دررفتگی نکنیم.

دست در دست هم،
می‌چرخیم دور گل‌ها، می‌چرخیم و
می‌چرخیم، تا همگی می‌افتیم زمین،
گل‌ها می‌شن پرپر.

چنان‌که رشد و رویش با تکرار تکاملی صفات ارثی طی چند نسل باعث تکامل نژادی است، و چنان‌که همهٔ آن عوامل ِ تشکیل‌دهندهٔ نژادهای انسانی پیش زمینه‌ای از قرار دادن جنین در محیط خاص خود است، بازی‌های کودکانه نیز عاملی برای کمك به تکامل مهندسی سازه‌ای قطعات و اعضاء بدن انسان است. و نقش عملکرد این قطعات به صلابت سنگ بوده و همانند لوحه‌های تاریخی دوران طفولیت اثر می‌کنند، تأثیری که هیچ‌کدام از اسباب‌بازی‌های مدرن نمی‌توانند داشته باشند. اسباب‌بازی‌ها نیز با آشنا ساختن کودك با خصوصیات و محدودیت‌های فلز و چوب و پلاستیك تجربیات ارزشمندی به وی می‌آموزند. این آموزش‌ها در جعبهٔ ابزار ذهن کودك باقی می‌ماند و هر زمان کـه لازم باشد به کمك وی می‌شتابد.

روی چوب ضعیف که قدم می‌گذاری،
می‌شکند قلب مادر.

کودك با خاك و گل بازی می‌کند، و با آن‌ها کیك و آجر درست کرده و در زیر اجاق خورشید آن‌ها را می‌پزد. کودك یاد می‌گیرد که حوادث می‌تواند کمر مادرش را بشکند اما کودکان همانند فنر جهنده و همانند نهال ِ جوان انعطاف‌پذیر هستند. کودك ساخته شدن گل‌ها را بر روی ستون‌های گیاهان تماشا می‌کند و آن‌ها را به‌خاطر لبخند والدین خود می‌شکند. در تابستان ساختمان‌هایی از بوته‌ها و درختان بر پا

می‌شود. کودك مفهوم زمان را می‌آموزد، و سازه‌هایی را که در زمستان فرو می‌ریزند و دوباره از درون زمین تاریك ساخته شده و به‌سوی آسمان روشن بر پا می‌شوند تماشا می‌کند. خشونت کودك و تهاجم خشونت‌آمیز دیگر کودکان مفاهیم وحشی‌گری و خرابکاری، ویرانی و انهدام، زوال و فروپاشی، مدت عمر سازه‌ها، و همچنین ساختار زندگی را به وی می‌آموزد.

" پدربزرگ پرسید، چیست آن که صبح بر چهار پا راه می‌رود،
بعد از ظهر بر روی دوپا، و عصر بر روی سه پا؟ "

کودك یاد می‌گیرد که دست و پای عروسك‌ها کنده می‌شود، چرخ‌های ماشین‌ها و سه‌چرخه‌ها در جهت خلاف مسیر می‌چرخند، و توپ‌ها و دیگر اسباب بازی‌های آن‌ها همیشگی نبوده و مدت معینی دوام دارند. کودك گرچه بر زبان نمی‌آورد ولی می‌فهمد که اسباب‌بازی‌ها وسایلی هستند برای یادگیری. این‌ها به ما لغت یاد نمی‌دهند بلکه واقعیت شکست سازه‌ای و استحکام محصول را یاد می‌دهند. به ما یاد می‌دهند که هم‌زمان با رشد ما، اسباب‌بازی‌هایی که قادر به حمل آن‌ها نبودیم بزودی تحمل حمل ما را نخواهند داشت. این اسباب‌بازی‌ها همانند پل‌هایی هستند که برای ترافیك سبك‌تری ساخته شده‌اند، و لذا سازنده‌های آن‌ها نیز همانند سازنده‌های پل‌های سبك‌تر غیرقابل سرزنش هستند. یاد می‌گیریم که هیچ وسیله‌ای نمی‌تواند ثابت و پایدار باشد.

هامپی دامپی نشسته بود بالای دیوار،
هامپی دامپی یهو افتاد پایین و حسابی داغون شد.
نه مردان سلطان و نه مردان شهر
نتوانستند هامپی را دوباره درست کنند.

در نوجوانی یاد می‌گیرد که احتمال شکستن استخوان‌هایش وجود دارد. دست‌ها که به حفظ تعادل حرکت پاها کمك می‌کنند همان‌قدر شکننده هستند که آهن و فولاد پل‌های راه‌آهن در زیر هجوم بی‌امان قطارها در قرن نوزدهم در معرض شکستگی قرار داشتند. هزاران خاطرهٔ دوران طفولیت یادآور آن است که همان‌قدر که دست‌ها و پاهایشان قوی‌تر و درعین‌حال شکننده‌تر شده است، خودشان نیز بزرگ‌تر و عاقل‌تر شده‌اند. حالا کم‌تر و به‌ندرت زمین می‌افتند. کم‌کم تبدیل به جوانان و بزرگسالانی می‌شوند که دست‌ها و پاهایشان قادر به پرت کردن و گرفتن کودك در هوا، حتی بالاتر از آن که والدین خود کودك انجام می‌دهند، می‌گردد بدون آنکه واهمه‌ای به‌خود راه بدهند. احساس مسؤولیت و سنگین‌تر شدن کودك والدین را وامی‌دارد تا از زیاد پرت کردن کودك طرفنظر کرده و به چیزهایی فراتر از اطمینان به ستون‌ها و پل‌های استخوان‌ها و ماهیچه‌های خود فکر کنند. آن‌ها حتی اگر خود مهندس هم باشند ترجیح می‌دهند بازی‌ها و سرگرمی‌های دیگری انجام دهند.

جك و جیل برای آوردن آب
رفتند بالای تپه،
جك زمین خورد و سرش شکست
و جیل هم تا پایین غلت خورد.

با خو گرفتن به دنیای ساختهٔ دست بشر، به‌تدریج ماهیت شکننده بودن اشیاء را فراموش می‌کنیم. محدودیت‌های هر چیزی را رعایت می‌کنیم. نوك مداد را کاملاً تیز می‌کنیم ولی آن را بیش از حد بر روی کاغذ فشار نمی‌دهیم. یاد می‌گیریم که چگونه بدون اشکال بنویسیم، و داستان زندگی ما به آرامی می‌گذرد، تا اینکه خیلی زود به پایان آن

می‌رسد. (شاید خواننده آرزو بکند که کاش جای نویسنده بود تا قلمش را تا حد شکستن بر روی کاغذ فشار دهد). هر چه پیرتر می‌شویم افول زندگی را در استخوان‌هایمان بیش‌تر احساس می‌کنیم، و بیش‌تر اعتقاد پیـــدا می‌کنیم کـــه زندگی چقدر شکننده و در عین حـــال باشکوه است. می‌فهمیم که هیچ چیز همیشگی نیست.

سه نفر از عاقلان شهر دیوانه‌ها
رفتند داخل طشت آب که شنا کنند،
اگر طشت محکم‌تر بود،
قصهٔ من هم ادامه داشت.

حتی اگر رفتار بدن خودمان برای عادت دادن ما به محدودیت‌های سازه‌های مهندسی کافی نبود زبان دو پهلوی ما در مورد کارهای روزمره‌ای که موجودات جاندار و بی‌جان با آن سر و کار دارند بایستی موجب جلب توجه باشد. مثلاً هم در مورد انسان‌ها و هم در مورد تیرها می‌گوییم که تحت اثر تنش[1] و کرنش[2] قرار می‌گیرند به‌طوری که اگر تحت این عوامل متلاشی[3] نشوند حتماً دچار خستگی[4] خواهند شد. هرگاه از انسان و ماشین بیش از ظرفیت و تحمل آن‌ها کار بکشیم دچار از کار افتادگی[5] خواهند شد. زبان شبه‌انسانی مهندسی چندان هم نباید تصادفی باشد زیرا انسان نه تنها الگوی اولیهٔ ماشین بلکه برترین سازه نیز می‌باشد.

---

1 - stress
2 - strain
3 - collapse
4 - fatigue
5 - breakdown

مبلمان از قدیمی‌ترین سازه‌های مهندسی غیرجاندار است که برای تحمل بارهای نسبتاً مشخص در تحت شرایط نسبتاً مشخص طراحی می‌شده است. هرگاه یکی از این اثاث‌ها به‌طرزی که برای آن منظور ساخته نشده است مورد استفاده قرار گیرد و بشکند، ما نه تنها شگفت‌زده نمی‌شویم بلکه به‌جای گله و شکایت از آن مبلمان و یا طرح آن، بچه‌ای را که آن را به‌طرز غلط به‌کار برده است سرزنش می‌کنیم. صندلی بایستی یك نفر را در حالت نشسته تحمل کند، لیکن نبایستی توقع داشت که همین صندلی از یك زد و خورد جان سالم بدر برد. از یك تختخواب بچه انتظار تحمل یك کودك خوابیده را داریم، و از یك گهواره توقع تحمل یك نوزاد را. اما هرگاه تختخواب کودك بر اثر عملیات آکروباتیك بچه‌ای شیطان بشکند الزاماً نبایستی شکستن آن را به طراحی بد نسبت بدهیم، و یا اگر صندلی کودك بر اثر استفاده به‌جای یك تخته پرش بشکند نمی‌توانیم صندلی را مقصر بدانیم. پایه‌ها و بدنهٔ صندلی و تختخواب را، همانند اعضاء افرادی که از آن‌ها استفاده می‌کنند، نمی‌توان دارای توانایی و مقاومت نامحدود دانست.

قصهٔ " ماما اردك " همانند زندگی انسان‌ها پر از شکست‌های سازه‌ای است. اشعار کودکانه در مورد محدودیت مقاومت ساخته‌های دست بشر هشدار می‌دهد و داستان‌های افسانه‌ای به طبیعت شکنندهٔ انسان‌ها اشاره می‌کند. داستان گلدیلاك و سه خرس به ما می‌آموزد که چگونه ممکن است بر اثر غفلت به‌جای موفقیت دچار ناکامی می‌شویم. صندلی آقا خرس آن‌قدر بزرگ و محکم است و به‌راحتی تاب تحمل وزن گلدیلاك را دارد که وی بدون کوچك‌ترین فکر و واهمه‌ای، به مقاومت بقیهٔ صندلی‌ها اطمینان پیدا می‌کند. سپس نوبت به امتحان کردن صندلی خانم خرس می‌رسد که به بزرگی صندلی قبلی نبوده ولی از آن خیلی نرم‌تر است. گلدیلاك می‌بیند این صندلی هم با اینکه خیلی نرم‌تر است اما کاملاً

مقاومت تحمل وزن او را دارد. بدین ترتیب توجه به معیار مقاومت صندلی اهمیت خود را برای او از دست داده و بیش‌تر به طرف معیار راحتی آن‌ها جلب می‌شود. بالاخره گلدیلاك به صندلی بچه خرس که کوچك‌تر و ظریف‌تر از صندلی خانم خرس به‌نظر می‌رسد نزدیك می‌شود، ولی او دیگر به موضوع ایمنی فکر نمی‌کند چون بر اساس تجربهٔ قبلی خود تمام صندلی‌ها را قوی و محکم می‌پندارد. در ابتدا همه چیز بی‌عیب و نقص به‌نظر می‌رسد، اما همانند همهٔ طرح‌های مهندسی در حالت مرزی، حال می‌خواهد این طرح یك صندلی باشد یا راهروهای معلق، ناگهان صندلی در زیر گلدیلاك وا رفت و او نقش بر زمین شد.

شکست صندلی هم مانع از این نشد که گلدیلاك تختخواب‌ها را نیز بدون توجه به کفایت سازه‌ای امتحان نکند. با اینکه تختخواب آقا خرس خیلی محکم و سفت و تختخواب خانم خرس نرم بود، ولی ظاهراً هیچ به یاد مقایسهٔ آن‌ها با صندلی‌ها نیافتاد. تختخواب بچه خرس را هم بی‌عیب و نقص یافت و بدون هیچ‌گونه نگرانی درون آن لمید و به خواب رفت. این داستان تلویحاً به کودکان می‌آموزد که در این دنیای پر از موفقیت‌ها و شکست‌های سازه‌ای بدون اضطراب و بیم زندگی کنند. اگرچه که گلدیلاك از شکستن صندلی بچه خرس ناراحت شده ولی اصلاً نگران این نیست که ممکن است همهٔ صندلی‌ها و تختخواب‌ها بشکنند. به اعتقاد برونو بتلهام[1] داستان گلدیلاك و سه خرس از نظر اصول داستان افسانه‌ای دارای کمبودهای مهمی است، زیرا در آن از بهبودی کارها و تسلی دل‌ها خبری نیست، و نشانی از رفع مشکلات و ناسازگاری‌ها ندارد، و فرارکردن گلدیلاك از دست خرس‌ها پایان خوشی برای داستان نیست. با این وجود، داستان دارای تسلی خاطر سازه‌ای است و با توجه به شکسته

---

1 - Bruno Bettelheim

نشدن تختخواب پایان خوش سازه‌ای هم دارد.

اگر داستان گلدیلاك نشانگر حالتی است که چگونه استفاده‌کنندهٔ محصولات مهندسی منحرف شده و مقاومت آن‌ها را دست‌بالا می‌گیرد، داستان سه خوك کوچك نشان می‌دهد که چگونه ممکن است طراح مقاومت سازه را دست‌پایین گرفته و مقاومت لازم را برای حالات اضطراری، یا طبق استعمال جدید، برای شرایط بارگذاری نادر[1] و حوادث احتمالی در نظر نگیرد. هر سه تای این خوك‌ها یك هدف داشتند: ساختن خانه. وقتی که شروع به ساختن خانه‌هایشان می‌کنند، مادر خوك‌ها طی پندهایی به آن‌ها تذکر می‌دهد که خانه‌هایشان نه تنها بایستی آن‌ها را از باد و باران حفظ کند، بلکه باید پناهگاهی امن در مواقع نادر همانند حملهٔ گرگ بزرگ بدجنس نیز باشد.

هر سه خوك کوچك از ضرورت‌های سازه‌ای مورد نیاز برای ایمن نگهداشتن خانه از دست گرگ اطلاع یافته‌اند، اما هرکدام از آن‌ها تصورات مختلفی از شدت یورش گرگ دارند، و بعضی‌شان هم دوست دارند که وقت کم‌تری صرف ساختن خانه بکنند و بیش‌تر به بازی بپردازند. بنابراین برآورد هرکدام آن‌ها از اینکه خانه‌اش چقدر بایستی محکم باشد متفاوت بود، و در نتیجه مقدار مصالح مورد نیاز و مدت زمان ساخت آن هم فرق می‌کرد. هرکدام از خوك‌ها با فکر ساختن خانه‌ای مقاوم دست به‌کار شدند. وقتی خانهٔ دو تا از آن‌ها تمام شد شروع کردند به رقص و آواز که " کی از گرگ بزرگ بدجنس می‌ترسه؟ " و با خود فکر می‌کردند که خانهٔ آن‌ها به اندازهٔ لازم امن هست و برادر دیگرشان خودش را زیادی خسته می‌کند و قدرت گرگ را دست‌بالا گرفته و خانه‌اش را دست‌بالا طراحی کرده است. بالاخره، با به پایان

---

1 - extreme load condition

رسیدن سومین خانه، همگی با خوشحالی و اطمینان شروع به رقص و آواز کردند. و عاقبت فقط حملهٔ گرگ بود که معلوم کرد کار خوک سوم درست بوده است. اگر حملهٔ گرگ نبود هر سه خانه تا سال‌ها استوار می‌ماند و اشتباه دو خوک اول هرگز آشکار نمی‌شد.

بدین ترتیب، شعرهای کودکانه و چیستان‌ها و داستان‌های افسانه‌ای دوران کودکی، ما را با مهندسی آشنا می‌کند. از لالایی‌هایی که به ما آرامش می‌دهد، اگرچه که آوازی در بارهٔ شکستی سازه‌ای باشد، تا داستان‌های افسانه‌ای که به ما یاد می‌دهد که می‌توانیم خانه‌هایمان را آن قدر محکم بسازیم که حتی در مقابل یورش گرگ بزرگ بدجنس مقاومت کند، مقدمات مهندسی و انسانی بودن مهندسی را می‌آموزیم.

بدن‌های ما و فرهنگ عامیانهٔ زبان ما و شعرهای کودکانه که سینه به سینه نقل شده است، تجربیات ما از خاک و گل و آجر، همگی، ما را با این واقعیت که شکست سازه‌ای جزئی از شرایط انسانی است انس می‌دهند. بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد که ما به‌صورت پیش‌شرط‌شده، و یا حداقل به‌صورت آمادگی احساسی، توقع و انتظار شکست گاه‌به‌گاه پل‌ها و سدها و ساختمان‌ها و کشتی‌ها را داریم. اگرچه که هیچ‌وقت از این فکر که شاهکارهای سازه‌های مهندسی ما برخلاف خود ما فانی نباشند دست نکشیده‌ایم. مانند پیرمردانی که کودکی خود را فراموش می‌کنند به هر طریقی سعی می‌کنیم تا ساخته‌های ما به یادبودهای جاودانه تبدیل شوند و از بین نروند. مثل این است که مهندسان و غیرمهندسان به‌طور یکسان، از آن جهت که انسان هستند، آرزو دارند که ساخته‌هایشان قدرتی فوق بشری داشته باشد. و شاید هم چندان هوس خیالبافانه‌ای نباشد، هر چه باشد تار و پود سنگ و فولاد در مقایسه با تار و پود گوشت و استخوان انسان‌ها فناناپذیرتر به‌نظر می‌آید.

۳

درس‌هایی از بازی

درس‌هایی از زندگی

هر گاه که بخواهم دانشجویان را با مفهوم مهندسی خستگی آشنا سازم، یك جعبه گیرهٔ کاغذ با خودم به کلاس می‌برم. در سر کلاس یکی از این گیره‌های کاغذ را کاملاً باز می‌کنم و آن را آن‌قدر خم و راست می‌کنم تا بشکند. سپس توضیح می‌دهم که این نوعی شکست بر اثر خستگی است، و تعداد دفعات خم و راست کردن که منجر به شکستن می‌شود نه تنها به مقاومت گیره بلکه به نحوه و شدت خم و راست شدن نیز بستگی دارد. وقتی که گیره‌های کاغذ به‌طور عادی و برای نگهداشتن چند برگ کاغذ به‌کار برده شود، هزاران و شاید هم میلیون‌ها بار می‌توانند باز و بسته شدن اندك را در هنگام گذاشتن و برداشتن کاغذ تحمل کنند، و بنابراین ما به‌ندرت با شکستن آن‌ها روبرو می‌شویم. اما اگر گیرهٔ کاغذ را آن‌قدر باز کنیم که مثلاً تمام صفحات یك کتاب را نگهدارد، احتمالاً فقط پس از ده بیست بار باز و بسته شدن شکسته خواهد شد.

پس از این توضیحات مقدماتی، تعدادی گیره به دانشجویان می‌دهم و از آنان می‌خواهم که همانند من آن‌ها را کاملاً باز کرده و با خم و

راست کردن متوالی آن‌ها را بشکنند. زمانی که دانشجویان سرگرم انجام این آزمایش کم‌هزینه هستند من بر روی تختهٔ کلاس تعداد دفعات خم و راست شدن گیره‌ها را که منجر به شکست هر یك می‌شود می‌نویسم. هر بار که دانشجویی تعداد مربوط به آزمایش خود را اعلام می‌کند من آن را بر روی نموداری که نمودار تاریخچه نامیده می‌شود رسم می‌کنم. همواره نتایج حاصل کاملاً در زیر منحنی نرمال که به شکل زنگوله است و بیانگر توزیع آماری نتایج می‌باشد قرار می‌گیرند، و از دانشجویان می‌خواهم که توضیح بدهند چرا همهٔ گیره‌های کاغذ تحت اثر تعداد یکسانی از خم و راست شدن نمی‌شکنند. معمولاً همگی بر روی دو عامل اصلی به توافق می‌رسیم: همهٔ گیره‌های کاغذ دارای مقاومت یکسانی نمی‌باشند، و هرکدام از دانشجویان به شیوهٔ دقیقاً یکسانی گیره‌ها را خم نمی‌کنند. بدین ترتیب دانشجویان با پدیدهٔ خستگی آشنا می‌شوند و به این واقعیت توجه پیدا می‌کنند که شکست ناشی از خستگی حادثه‌ای نیست که دقیقاً قابل پیش‌بینی باشد.

بسیاری از دردسرهای ریز و درشتی که در زندگی روزانه بر اثر تکرار مصرف با آن‌ها مواجه هستیم شکست‌هایی قابل پیش‌بینی، البته نه آن‌قدر دقیق، هستند. از میان بسیاری اشیاء آشنا، بندکفش و لامپ چراغ از آن‌هایی هستند که اغلب ظاهراً به‌طور ناگهانی و سربزنگاه دچار خرابی می‌شوند. پاره شدن و سوختن آن‌ها ظاهراً تحت شرایطی صورت می‌گیرد که صدها و هزاران بار قبلاً کار می‌کرده‌اند. لامپی که ده‌ها سال به‌طور مداوم روشن مانده باشد شاید بتواند در کتاب رکوردهای جهانی جایی برای خود باز کند، لیکن از نظر مهندسی که با پدیدهٔ خستگی سر و کار دارد موضوع چندان قابل توجهی نیست. اما اگر این لامپ هر روز خاموش و روشن می‌شد آن‌گاه آن سال‌ها دوام می‌توانست فوق‌العاده باشد، زیرا عامل خراب شدن و سوختن لامپ سرد و گرم

شدن متناوب آن است و نه گرم ماندن مستمر آن. و به‌دلیل همین اثر خستگی‌آور ـ عامل تغییرات ـ یکسان است که کم‌تر می‌توان تابلوی امتیازاتی را یافت که حداقل یك لامپ آن نسوخته باشد.

اسباب‌بازی‌های کودکان کاملاً مستعد شکست خستگی هستند، نه فقط به‌دلیل آنکه بچه‌ها ساعت‌های متوالی با آن‌ها ور می‌روند، بلکه از آن جهت نیز که اسباب‌بازی‌ها معمولاً دست‌بالا طراحی نمی‌شوند. خیلی محکم و تنومند ساختن اسباب‌بازی باعث سنگین‌تر شدن آن برای بچه‌ای که با آن بازی می‌کند خواهد شد، ضمن آنکه از اسباب‌بازی‌های مشابه خود هم گران‌تر خواهد شد. برای همین است که می‌بینیم درز توپ‌های لاستیکی پس از مدتی پایین و بالا جهیدن باز می‌شود، اتصالات سه‌چرخه‌ها پس از مدت‌ها دور حیاط چرخیدن می‌شکند، و کلهٔ عروسك‌های پلاستیکی پس از بارها جلو و عقب برده شدن برای آره و نه گفتن کنده می‌شود.

حتی یکی از مدرن‌ترین اسباب‌بازی‌های الکترونیکی سال‌های اخیر خیلی زودتر از اینکه بچه‌ها (و پدر و مادرشان!) از بازی کردن با آن خسته شوند قربانی خستگی مکانیکی شد. کارخانهٔ تکزاس اینسترومنتز[1] در ساخت اسباب‌بازی " هجی لغات " به‌طرز جالب توجهی از اولین ترکیب کننده‌های میکروالکترونیکی صدا استفاده کرده است. این اسباب‌بازی پلاستیکی قرمز رنگ با صدایی که اکنون برای خیلی‌ها آشنا است هجی یکی از لغاتی را که در حافظهٔ اسباب‌بازی است از بچه می‌پرسد. بچه املاء لغت را به کمك فشار دادن حروف صفحهٔ کلید بر روی صفحهٔ نمایش اسباب‌بازی می‌نویسد. پس از تمام شدن لغت، کلید ENTER را فشار می‌دهد و اسباب‌بازی کامپیوتری به وی می‌گوید که هجی او درست

---

1 - Texas Instruments

بوده است یا خیر، و اگر املاء لغت غلط باشد دوباره از او می‌خواهد که همان را هجی کند. اسباب‌بازی هجی لغات اگر تا پنج دقیقه مورد استفادهٔ کودك قرار نگیرد و هیچ دکمهٔ آن فشار داده نشود خودبه‌خود خاموش می‌شود تا در مصرف چهار باتری آن صرفه‌جویی شود.

اسباب‌بازی هجی لغات پسرم تا قبل از اینکه دکمهٔ ENTER آن از محل مفصل پلاستیکی خود کنده شود او را صدها ساعت با شادی و لذت زائدالوصفی سرگرم کرده بود. اما از آنجا که انگشت کوچك استفان داخل حفرهٔ کلید کنده‌شده می‌رفت و آن را به‌کار می‌انداخت، باز هم از این اسباب‌بازی قشنگ ولی معیوب خود استفاده می‌کرد. چندی پس از آن، کلید حرف E کنده شد، و پشت سر آن هم کلیدهای حرف T و O. اگرچه او هنوز هم با آن کار می‌کرد ولی صفحهٔ کلید اسباب‌بازی کاملاً از شکل افتاده بود، تعدادی از دکمه‌های کنده‌شدهٔ آن گم شده بود و تعدادی نیز به کمك نوار چسب در محل خود نگهداشته شده بودند.

چیزی که در مورد شکستن دکمه‌های اسباب‌بازی هجی لغات استفان برای من جالب بود وجود ارتباط کامل بین حروف بسیار زیاد تکرار شونده در زبان انگلیسی با دکمه‌های کنده‌شده بود. تعجب‌آور نبود که ابتدا دکمهٔ ENTER کنده شد، زیرا بعد از هر کلمه این دکمه بایستی فشار داده می‌شد و بنابراین بیش از هر دکمهٔ دیگری به‌کار برده می‌شد. از هشت حرفی که بیش‌ترین مصرف را به‌ترتیب دارند، E , T , A , O , I ، R , S , N ، پنج حرف (R , S , O , T , E) جزء اولین کلیدهایی بودند که کنده شدند. وقتی که من گزارش این تجربهٔ غیرمترقبه در خصوص پدیدهٔ خستگی را در مجلهٔ تکنولوژی ریویو[1] منتشر کردم، غیر از حروف P و Y که ظاهراً شکستن آن‌ها غیرعادی به‌نظر می‌رسید، بقیهٔ

---

1 - *Technology Review*

حروف کنده‌شده این هماهنگی را با میزان به‌کارگیری آن‌ها داشتند.

اگر فرض کنیم که همهٔ کلیدهای اسباب‌بازی " هجی لغات " با توجه به امکانات ساخت به‌طور مشابه و یکسان ساخته شده باشند، بنابراین بایستی کنده شدن این کلیدهای پلاستیکی متناسب با میزان به‌کار برده شدن آن‌ها باشند. هماهنگی موجود بین میزان به‌کار برده شدن حروف در لغت‌های زبان انگلیسی با دکمه‌های کنده‌شده ثابت می‌کند که این وضعیت واقعاً وجود داشته است، و موارد به‌ظاهر غیرعادی نیز احتمالاً بر اثر استفادهٔ خیلی زیاد و غیرمتعارف آن کلیدها بوده است. پسر من راست دست است و بنابراین احتمالاً هنگام حدس زدن هجی لغات ناخودآگاه تمایل بیش‌تری به انتخاب دکمه‌های سمت راست داشته است، و یا اینکه هنگامی که از دستگاه صرفاً به‌منظور بازی کردن استفاده می‌کرده است از دکمه‌های سمت راست بیش‌تر استفاده می‌کرده است. از آنجا که هیچ‌کدام از حروفی که در اول کنده شدند شامل چهار حرف اولین ستون سمت چپ دستگاه نبودند، این مطلب می‌تواند توضیح قابل قبولی برای عدم کنده شدن حرف A و N که از حروف پراستعمال هستند به‌دست دهد. کنده نشدن غیرعادی دکمهٔ I را نیز می‌توان به احتمال زیاد به قوی‌تر بودن غیرعادی آن نسبت به دیگر دکمه‌ها نسبت داد. کنده شدن حروف P و Y نیز که از حروف کم‌استعمال هستند احتمالاً ناشی از ضعیف‌تر بودن غیرعادی آن‌ها و یا استفادهٔ بسیار زیاد آن‌ها توسط پسر من بوده است. او مرتباً اسم خودش و اسم گربه‌اش را روی دستگاه می‌نوشت که هر دو اسم دارای حرف P هستند.

اینکه عامل خستگی دکمه‌های پلاستیکی نقطهٔ ضعف این اسباب‌بازی مدرن الکترونیکی بوده و آن را از حیز انتفاع انداخته است باعث مطرح شدن سؤالی اساسی برای درک طراحی مهندسی می‌گردد. چرا طراحان اسباب‌بازی ظاهراً این مشکل را پیش‌بینی نکرده بوده‌اند؟ چرا از

دکمه‌هایی استفاده نکرده‌اند که تا آخر عمر این دستگاه الکترونیکی دوام بیاورند؟ چرا آن‌ها مشکل خستگی را برطرف نکرده‌اند، مشکلی که تعیین کنندهٔ عمر طرح‌های مکانیکی و سازه‌ای است؟ این سوال‌ها بی‌شباهت به سؤال‌هایی نیستند که پس از خراب شدن یك پل یا سقوط هواپیما به فکر می‌رسد. لیکن خرابی پل یا سقوط هواپیما جان صدها نفر را به مخاطره می‌اندازد، و بدین ترتیب خستگی محتمل برخی اعضاء آن گرچه می‌تواند درس آموزنده‌ای باشد اما برای قربانیان حادثه حاصلی ندارد. در حالی که شکسته شدن اسباب‌بازی بچه، اگرچه که اشك‌های او را سرازیر کند، می‌تواند درس آموزنده‌ای برای کودك باشد که در آینده نیز با سوختن لامپ‌ها و پاره شدن بندکفش‌ها روبرو خواهد شد. و سال‌ها بعد هنگامی که او با عجلهٔ بسیار برای رفتن به جایی مهم با پاره شدن بندکفش روبرو شود، خیلی بعید است بپرسد که چرا چنین شد.

پس از اینکه گزارش این تجربه را نوشتم، پسرم اسباب‌بازی‌اش را از من پس گرفت و مجدداً آن را مورد استفاده قرار داد، و طبیعتاً این تجربه هم ادامه پیدا کرد. بزودی دکمهٔ دیگری که مربوط به حرف U بود کنده شد. سپس نوبت به حرف A رسید که سومین حرف از پرمصرف‌ترین حروف است. این تجربه در این مرحله به اتمام رسید زیرا مدل جدیدی از " هجی لغات " را که تازه به بازار آمده بود و صفحهٔ کلید آن دارای طرح جدیدی بود برای استفان خریدم. در این طرح جدید به‌جای استفاده از کلیدهای مجزا، کلیهٔ حروف بر روی یك لایهٔ پلاستیکی که روی تمام دکمه‌ها را پوشانده بود حك شده بود. این مدل جدید که پس از نمایش فیلم تی‌تی آن موجود کوچولوی بیگانه به بازار آمده بود به هجی لغات تی‌تی نامیده شده بود، و هرگاه این وسیله را می‌بینم بی‌اختیار چشمم به پلاستیك اطراف حروف پرمصرف می‌افتد تا ببینم آیا غول خستگی باز هم پدیدار خواهد شد یا نه.

مدتی بعد از اولین مقاله‌ام در مورد دستگاه هجی لغات پسرم، از طریق تماس خوانندگان معلوم شد که فرزندان آن‌ها هم با چنین مشکلی دست به گریبان شده‌اند. با توجه به جذاب بودن این اسباب‌بازی و دلبستگی شدید بچه‌ها به آن، همهٔ آن‌ها با پیدا کردن راه چاره‌ای موقتی هنوز هم از آن استفاده می‌کردند، همان‌گونه که در سراسر زندگی خود در این دنیای غیرکامل در مواجهه با نقایص و شکست‌ها عمل خواهند کرد. بعضی از والدین نامه نوشته بودند که بچه‌هایشان متوجه شده‌اند که انتهای مداد کاملاً درون محل کلیدها فرو می‌رود و لذا آن‌ها می‌توانند به‌راحتی با استفاده از مداد محل کلیدهای کنده‌شده را فشار داده و حروف مربوطه را بنویسند و دیگر مجبور به استفاده از نوك انگشت کوچك خود نیستند. البته حدس می‌زنم که این راه‌حل توسط والدینی که علاقمند به بازی‌کردن با آن دستگاه بوده‌اند پیدا شده باشد، زیرا انگشت بیش‌تر بچه‌ها به‌راحتی داخل محل کلیدها فرو می‌رفت و الزامی به یافتن چیز دیگری برای فشار دادن حروف نداشته‌اند، ولی مسلماً انگشت پدر و مادر وی نمی‌توانسته است این کار را بکند.

اگرچه که این‌گونه برخوردهای استفاده‌کنندگان در مواجهه با این مشکل نشان‌دهندهٔ موفقیت تجاری اسباب‌بازی حتی علی‌رغم نقص مهم آن بود، لیکن شرکت سازنده طرح صفحهٔ کلید را اصلاح کرد تا مشکل خستگی کلیدها برطرف شود. صفحهٔ کلید جدید دارای دکمه نبوده و کارکردن با آن بسیار راحت است. سرگذشت تکامل صفحهٔ کلید دستگاه هجی لغات نمونه‌ای منحصربه‌فرد و غیرعادی در میان اقلام تولید انبوه نیست که طرح اولیهٔ آن‌ها بر اساس مسائلی که در حین استفاده پیش می‌آید تغییر داده می‌شود. اگرچه که حتماً بعضی از پدران و مادرانی که برای خرید این دستگاه مدرن سحرانگیز پول نسبتاً زیادی داده بودند ناراحت و عصبانی شده‌اند، ولی کودکان آن‌ها که به دوران افتان و

خیزان یادگیری، راه رفتن و دوران تته‌پته کردن‌های یادگیری، حرف زدن نزدیک‌تر بودند، با مشکل شکسته شدن دکمه‌ها برخورد راحت‌تری داشته‌اند. شاید شرکت سازنده که در هیجان و عجلهٔ فرستادن اولین دستگاه کامپیوتری ناطق به بازار بوده است، در طرح خود به بعضی موارد توجه لازم را نکرده بوده است، ولی وقتی مشکل شکسته شدن کلیدها بروز کرده فوراً به آن عنایت کرده و نقص مکانیکی اسباب‌بازی را رفع کرده است.

به یاد دارم که وقتی اولین دکمهٔ دستگاه هجی لغات پسرم شکست خود من هم کاملاً دلخور شدم. علی‌رغم آگاهی من به محدودیت‌های مهندسی و علی‌رغم تمام تلاشی که برای توضیح دادن به همسایه‌ها داشتم که امکان وقوع شکست‌هایی نظیر ماجرای راهروهای معلق هتل هایت و سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰ وجود دارد بدون آنکه بتوان صریحاً آن را مورد ملامت و قابل مجازات دانست، لیکن در آن مورد خاص نتوانسته بودم طراحان اسباب‌بازی را نیز مشمول این سعه صدر خود کنم. اما فرق مهمی در طراحی و توسعهٔ چیزهایی که به تعداد میلیونی ساخته می‌شوند با چیزهایی که به‌صورت تك و منحصر ساخته می‌شوند وجود دارد، به‌طوری‌که تولیدات انبوه اشیاء مکانیکی یا الکترونیکی این امکان را می‌دهد که قسمتی از اصلاحات و تغییرات آن‌ها را بتوان پس از عرضه شدن به مشتری و ظهور نقایص و مشکلات انجام داد. در حالی که این نوع اصلاحات و تغییرات که در حین تولید چیزهایی مانند مدل جدیدی از اسباب‌بازی و یا مدلی از اتومبیل امکان‌پذیر است، در سازهٔ بزرگی که همه چیز آن بایستی از اولین مراحل شروع ساخت مشخص شده باشد مقدور نیست. به‌هرحال، بایستی این سعه صدر من شامل حال طراحان اسباب‌بازی هجی لغات نیز می‌شد، زیرا مهندسان مکانیك و برق نیز همانند مهندسان ساختمان ممکن است دچار سهو و اشتباهات غیرعمد

شوند. شاید در تخمین مدت زمانی که کودك از اسباب‌بازی دلزده شده و آن را کنار خواهد گذاشت اشتباه کرده باشند. هر چه باشد بیش‌تر اسباب‌بازی‌ها مدت‌ها قبل از آنکه شکسته شوند کنار گذاشته می‌شوند.

اگرچه که ممکن است همهٔ ما هنگام سوختن لامپ یا پاره شدن بندکفش، مخصوصاً اگر در زمان یا موقعیت ناراحت‌کننده‌ای اتفاق بیافتد، دچار عصبانیت بشویم، لیکن بعید است که کسی از ما حتی این فکر به ذهنش خطور کند که آن را به علت کارکرد بد به فروشنده پس بدهد. همهٔ ما با ماجرای تلاش توماس ادیسون[1] برای یافتن فیلامان مناسب لامپ آشنا هستیم و ضمن آگاهی به این پیشرفت تکنولوژیکی قدرشناس آن هستیم. ساختن بندکفشی که اصلاً پاره نشود مستلزم پذیرش شرایطی است که برای ما قابل قبول نیست. چنین بندکفشی احتمالاً بسیار زمخت و سنگین و نسبتاً گران خواهد بود، و ما ترجیح می‌دهیم که از بندهای معمولی فعلی استفاده کنیم و ریسك پاره شدن احتمالی آن را در زمان نامطلوب هم پذیرا می‌شویم و یا اینکه با اندك زحمت فکری و پیش‌بینی لازم آن را به‌موقع عوض می‌کنیم. معمولاً بدون انجام کارهای پیشگیری‌کننده در مورد بندکفش‌های فرسوده یا لامپ‌هایی که زیاد کار کرده‌اند با آن‌ها سر می‌کنیم و عواقب آن را هم پذیرا هستیم. بنابراین اگرچه ممکن است باز هم هنگام مواجه شدن با خرابی آن‌ها فوراً بگوییم " چرا این‌طور شد؟ " ولی پاسخ مقبول آن قبلاً در ذهن ما موجود است.

به‌هرحال هر چقدر که عواقب شکست شدیدتر باشد دوراندیشی ما نیز اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. اتومبیل به تعداد هزاران هزار ساخته می‌شود، ولی نمی‌توان پذیرفت که همان‌طور که بندکفش یا لامپ چراغ به‌طور ناگهانی خراب می‌شوند اتومبیل نیز ناگهان در وسط بزرگراه

۱- Thomas Edison ، (۱۹۳۱-۱۸۴۷م)، مخترع آمریکایی

دچار شکستگی بشود. بنابراین تمام عواملی که می‌تواند باعث خرابی اتومبیل شود بایستی تا آنجا که ممکن است شناسایی و پیش‌بینی گردد تا بد عمل کردن آن باعث حوادث مرگبار نشود. با توجه به اینکه لاستیك چرخ‌ها همواره در معرض پنچری هستند، توقع داریم که هنگام پنچر شدن یکی از چرخ‌ها، وسیله نقلیه را بتوانیم به کنار جاده ببریم. چنین خرابی و نقص در اتومبیل همانند خرابی‌های لامپ و بندکفش قابل قبول بوده و لذا همواره یك لاستیك یدکی در اتومبیل می‌گذاریم. ولی بد عمل کردن‌هایی از انواع دیگر چندان قابل قبول نیستند. پذیرفتنی نیست که ترمزهای هر چهار چرخ و سیستم ترمز اضطراری به‌طور ناگهانی و هم‌زمان دچار خرابی بشوند. قابل قبول نخواهد بود اگر که فرمان اتومبیل در سر پیچ کوهستان از جای خود کنده شده و در دست ما بماند. در مورد هر قسمت از اتومبیل تمهیدات خاصی به‌کار برده شده است، و هرگاه در مواردی استثنایی دچار خرابی شوند و فاجعه‌ای اتفاق بیافتد امکان طرح دعوی سنگین وجود دارد. با توجه به رقابت‌های فشرده‌ای که بین سازندگان اتومبیل‌ها وجود دارد، هرگاه که خطر بالقوه‌ای شناخته شود، سازندگان مجبور هستند علل آن را برطرف کنند، حتی اگرچه که مواردی با احتمالات بسیار بعید در طراحی باشند.

اگرچه که اشتباهات ناشی از کار انسان است، لیکن هم خود اوست که همواره خواستار پرهیز و جلوگیری از آن است. قانون مورفی[1] ، مبتنی بر اینکه هر چیزی که بتواند خراب شود بالاخره خراب خواهد شد، قانون طبیعت نبوده و مزاحی بیش نیست. تمام لامپ‌هایی که آن‌قدر عمر می‌کنند تا ما از دست آن‌ها خسته می‌شویم، و تمام بندکفش‌هایی که

---

۱ - Murphy's Law ، قضیه‌ای است بصورت هزل و مطایبه که هر چیزی که امکان خراب شدن داشته باشد حتماً خراب خواهد شد.

بیش از خود کفش دوام می‌آورند، و تمام اتومبیل‌هایی که بدون ایجاد دردسر تا زمان تعویض کار می‌کنند، همگی لبخندهای تمسخرآمیزی بر قانون مورفی هستند. همان‌طور که خود مورفی عمر بیش‌تری از قانونش نخواهد داشت، هیچ چیز ساخته‌شده‌ای نیز نمی‌تواند و این انتظار هم وجود ندارد که تا ابد دوام داشته باشد. باتوجه به این واقعیت ابتدایی مشخص می‌شود که امکان اینکه یك دستگاه یا یك ساختمان، بر اساس همت و تلاش سازندگان آن، بتواند در طول عمر طراحی خود به حد کمال نزدیك بوده باشد، هدفی قابل تحقق برای مهندسان بوده و نیز توقعی معقول از جانب مصرف‌کنندگان می‌باشد. ولی هرگاه که در ذهنیت خود اهداف غیرواقع‌بینانه‌ای را طلب کنیم، مثلاً بخواهیم بندکفشی بخریم که هرگز پاره نشود یا ماشینی اختراع کنیم که حرکت جاودانه داشته باشد یا اتومبیلی بسازیم که هرگز دچار خرابی نشود، موجودی غیرمنطقی و ساده‌لوح به‌شمار خواهیم رفت.

شهرت الیور وندل هولمز[1] بیش‌تر به‌خاطر اشعار و فکاهیات وی است تا کارهای تحقیقاتی که تحت عنوان "مسری بودن تب زایمان"[2] و با سمت استاد آناتومی و فیزیولوژی در مدرسهٔ طبی هاروارد[3] انجام داده است. شاید همین دانش و تجربهٔ وی در خصوص قسمت‌های مختلف بدن بوده است که وی را در انتقال این تجربیات فیزیولوژیکی به‌صورت درسی آموزنده برای مهندسان مکانیك و سازه یاری داده است. اگرچه که در سنین بالا عده‌ای از ما ابتدا دست به کمر می‌شویم و عده‌ای نیز ابتدا دست به عصا می‌شوند، لیکن هیچ کس دچار از هم پاشیدگی هم‌زمان

---

۱ - Oliver Wendell Holmes ، (۱۸۹٤-۱۸۰۹م)، پزشک و نویسنده آمریکایی

2 - The Contagiousness of Puerperal Fever

3 - Harvard Medical School

همهٔ مفصل‌های بدن نمی‌شود. بنابراین هولمز به‌خوبی دریافت که تصور طراحی کالسکه‌ای که هیچ نقطه ضعفی نداشته باشد ساده‌لوحی و خیالبافی بیش نیست.

اگرچه که هولمز با این شعر قصد حمله و تعرض به آیین کالونی[۱] داشته است، و در این شعر با استفادهٔ استعاری از " کالسکه تك اسبه " نشان می‌دهد که هر سیستم منطقی، هر چقدر هم که کامل و بی‌نقص به‌نظر برسد، اگر بر مبنا و اساس غلطی بنیاد شده باشد حتماً فرو خواهد ریخت، لیکن به‌هرحال این شعر درس آموزنده‌ای نیز برای مهندسان می‌باشد. یك شرکت سازندهٔ وسایل و تجهیزات اندازه‌گیری تنش و کرنش در دستگاه‌ها و سازه‌ها، قطعه شعر " معجزه خادم "[۲] را که به شعر " کالسکه تك اسبه " نیز معروف است مناسب با کار تجاری خود یافته و از آن در تبلیغات خود استفاده کرد. این آگهی تبلیغاتی خاطر نشان می‌سازد که " . . . اگرچه که هولمز هنگام سرودن شعر در مورد وسیله نقلیه‌ای که هیچ کدام از قطعات آن نقطه ضعفی نداشته باشد یقیناً از تکنولوژی مدرن امروزی اطلاعی نداشته است، لیکن کاملاً بر عبث بودن هر گونه تلاشی در جهت رسیدن به ' شاهکار مهندسی بدون نقص ' واقف بوده است. "

در شعر هولمز، خادم تصمیم می‌گیرد که کالسکهٔ کاملی بسازد که همهٔ قطعات آن یکسان مقاوم باشند به‌طوری که هرگز دچار شکستگی نشوند. لیکن خادم این نکته را در نظر نگرفته بود که هر چیزی عمر معینی دارد، و اگر بر فرض اینکه بتوان کالسکه‌ای ساخت که " همهٔ

---

۱ - Calvinism ، فرقه‌ای منسوب به ژان کالون John Calvin ، (۱۵۶۴-۱۵۰۹م)، مصلح و عالم مذهبی فرانسوی که عقاید جبری داشت و در تعالیم خود به مشیت فائقه الهی و قضای محتوم در باره انسانها تکیه می‌کرد.

2 - The Deacon's Masterpiece

قطعات آن مقاومت یکسانی داشته باشند "، آنوقت همهٔ این قطعات در یك زمان فرسوده و خراب خواهند شد، و با توجه به اینکه به‌هرحال خادم زودتر از دست‌ساخته‌اش می‌مرد، بنابراین هر کس که این کالسکه را از خادم به ارث می‌برد یك روز با شگفتی بزرگی مواجه شده و راهی دیار باقی می‌شد. ظرافت شعر " معجزه خادم " در توجه آن به این مطلب است که خراب شدن سیستم به مفهوم خراب شدن یك قطعهٔ آن یعنی ضعیف‌ترین قطعه است، و هر نظری مبتنی بر اینکه همهٔ قطعات دقیقاً دارای عمر یکسانی باشند از دیدگاه تکنولوژیکی غیرمنطقی است. چنین چیزی با این واقعیت در تناقض است که ما فقط می‌توانیم بدانیم که این قطعه یا آن قطعه تقریباً تا فلان یا فلان مدت عمر خواهد داشت، درست همان‌طور که فقط می‌توانیم احتمال این را که یك گیرهٔ کاغذ پس از فلان تعداد خم شدن خواهد شکست تعیین کنیم. عمر دقیق هر قطعه یا هر دستگاه یا هر سازه فقط پس از شکسته شدن آن معلوم خواهد شد.

همان‌طور که هر کدام از ما بایستی از محدودیت‌های خویش آگاهی داشته باشیم، بایستی از محدودیت‌های جهان بی‌جان نیز اطلاع داشته باشیم. حتی اهرام سرزمین فراعنه، که راز و رمز آن‌ها خاطر نشان می‌سازد که ما قبل از راه رفتن ابتدا چهار دست و پا می‌خزیم و این توانایی راه رفتن نیز ابدی نیست، بر اثر ماسه و باد دچار فرسایش شده‌اند. هیچ چیز در این دنیای زمینی مصونیت ابدی نداشته، و هیچ کدام از دست ساخته‌های ما نیز با همان کیفیت و مقاومت اولیه نمی‌تواند تا ابد دوام داشته باشد. فولاد دچار خوردگی می‌شود و الماس چاك برمی‌دارد، حتی تشعشعات هسته‌ای نیز نیمه عمر دارند.

مهندسی هم در رابطه با انسان‌ها و غیر آن با طول عمر سر و کار دارد. اگر خستگی یا شکست وجود نداشته باشد، آن وقت خوردگی یا فرسایش دست به کار می‌شوند، اگر جنگ و خرابی نباشد، آن گاه سلیقه و

مد به سراغ چیزهایی که زمانی نو بوده‌اند خواهند رفت. در بعضی موارد طول عمر بر اساس مدت زمان معینی که از آن سازه استفاده خواهد شد تعیین می‌گردد. مثل سکوی نفتی دریایی که مثلاً برای بیست یا سی سال زمانی که لازم است تا بتوان نفت موجود در زیر دریا را استخراج کرد طراحی می‌گردد. لیکن تعیین پایان نیاز به یك پل بسیار مشکل است، در حالی که مهندسان نیاز دارند تصور روشنی از طول عمر پل داشته باشند تا حداقل بتوانند زمان لازم برای بازرسی و سرویس و یا تعویض بعضی قطعات مهم را تعیین نمایند. موارد استفادهٔ ساختمان‌ها بستگی به هوی و هوس و خواسته‌های مد و تجارت دارد، و شاید پنجاه سال دیگر کسی تمایل به خرید یا اجارهٔ آسمانخراش‌های مدرن امروزی نداشته باشد. از طرف دیگر، مهندسان برای بناهای یادبود از قبیل موزه‌ها و ساختمان‌های حکومتی بایستی عمری طولانی در حد چند قرن، و حتی برای یك کلیسای جامع بیش از هزار سال، در نظر بگیرند.

طول عمر یك سازه قابل قیاس با طول عمر انسان نیست، زیرا مدت زمانی که یك قطعهٔ مهندسی بایستی دوام داشته باشد می‌تواند عامل تعیین کننده‌ای در طراحی آن باشد. همهٔ ما بارها مشاهده کرده‌ایم که روشن و خاموش کردن مستمر یك اسباب‌بازی یا یك چراغ چه آسیب غیرقابل تعمیری می‌تواند به آن وارد کند، و در مورد سازه‌های مهندسی بزرگ نیز چنین‌حالتی امکان دارد. تلاطم مداوم دریا باعث می‌شود که اتصالات جوش‌شدهٔ سکوی نفتی دریایی تحت اثر نیروهای متناوبی همانند حالتی که گیرهٔ کاغذ یا یك تکه پلاستیك پس از بارها خم و راست شدن ترك برمی‌دارد قرار بگیرد. شکم دادن پل بر اثر عبور ترافیك و خم شدن جانبی آسمانخراش بر اثر وزش باد باعث ایجاد و توسعهٔ ترك و فرسودگی مقاومت کابل‌های فولادی و تیرهای بتنی می‌گردد، و یکی از مهم‌ترین محاسبات مهندسی مدرن تعیین و پیش‌بینی مدت زمان ایجاد ترك‌ها یا

فرسودگی‌های اولیه در مواد سازه و تأثیر آن‌ها در عمر سازه می‌باشد، ضمن اینکه گاهی اوقات تجربه بسیار آموزنده‌تر و سازنده‌تر از محاسبات می‌باشد.

چند سال بعد که پسرم بزرگ‌تر شده بود، و دوران بازی با اسباب‌بازی هجی لغات سپری شده بود، و از بازی‌های تلویزیونی نیز دلزده شده بود، سراغ اسباب‌بازی‌هایی را می‌گرفت که نیازی به باتری نداشتند. ابتدا تفنگ بادی خواست که مادرش و من مخالفت کردیم، بعداً قلاب‌سنگ خواست. این اسلحهٔ عهد عتیق کم‌خطرتر بود، ولی وقتی فهمیدم که او می‌خواهد یك قلاب‌سنگ آماده با بدنهٔ فلزی بخرد تا حد زیادی تعجب کردم. فکر نمی‌کردم که در زمان اسباب‌بازی‌های مدرن کسی به سراغ تولید انبوه قلاب‌سنگ برود و همان تصور قدیمی از ساختن دستی قلاب‌سنگ در نظرم بود.

وقتی استفان را به باغ کنار خانه‌مان بردم و دنبال شاخهٔ مناسبی برای درست کردن یك قلاب‌سنگ واقعی می‌گشتیم، استفان دودل به‌نظر می‌رسید. تعدادی شاخهٔ خشك جمع‌آوری کردیم و به خانه برگشتیم. متأسفانه من فراموش کرده بودم که شاخهٔ درخت کاج چقدر شکننده است و اولین تلاش‌های من برای پیچیدن نوار لاستیکی به دور دوشاخه‌های آن مواجه با شکست سازه‌ای شاخه‌ها شد. بالاخره پس از مدتی موفق شدیم از چند شاخهٔ قوی‌تر قلاب‌سنگ درست بکنیم و نوار لاستیکی را دور شاخه‌های آن ببندیم، ولی هرگاه که کش آن را کمی زیادتر می‌کشیدیم دوشاخه می‌شکست.

پسرم از ناتوانی من در ساختن قلاب‌سنگ خیلی دلخور شده بود، و وقتی پس از ناهار یکی دو ساعتی غیبش زده بود نگران شدم که نکند از من قطع امید کرده باشد. ولی وقتی که برگشت، چند شاخه درخت قوی‌تر و انعطاف‌پذیرتر از چوب‌های قبلی با خود آورده بود. ما به‌راحتی

کش‌های لاستیکی را دور این چوب‌ها پیچاندیم و هر چقدر هم که کش را می‌کشیدیم آن را تحمل می‌کرد. ولی هنوز هم مشکلی وجود داشت و نوارهای لاستیکی از دو سر چوب به‌طرف پایین می‌لغزیدند.

پس از یك هفته تلاش بی‌نتیجه برای ساختن یك قلاب‌سنگ مناسب، به پسرم قول دادم که اگر نتوانیم قلاب‌سنگ دلخواه او را بسازیم حتماً آماده‌اش را برایش خواهم خرید. یك تکه تختهٔ چند لایی از انباری پیدا کردم و شکل قلاب‌سنگ را روی آن کشیده و آن را بریدم، سپس در دو سر آن سوراخی برای عبور دادن کش لاستیکی درست کردم. پس از بستن لاستیك، به‌طور عملی به پسرم نشان دادم که این قلاب‌سنگ یك سنگ‌ریزه را تا چه فاصله‌ای می‌تواند پرتاب کند، ولی حداقل پیش خودم مجبور بودم اعتراف کنم که نگهداشتن سنگریزه در میان نوار لاستیکی باریك خیلی مشکل بود. پسرم مؤدبانه از آنچه که برایش ساخته بودم تشکر کرد ولی معلوم بود که خیلی رضایتش را جلب نکرده است. سنگ‌هایی که او پرتاب می‌کرد به هدف نمی‌رسید و معلوم بود که قلاب‌سنگ او نمی‌تواند همانند قلاب‌سنگی که دوستش از بیرون خریده بود کارآیی داشته باشد.

در ذهن خودم اقرار کردم که این قلاب‌سنگ دست‌ساز خوب طراحی نشده است، در حالی که خیلی مأیوس شده بودم به‌ناچار برای حفظ آبروی خود در مقابل پسرم، تصمیم گرفتم به نوار لاستیکی یك نوار دیگر اضافه کنم و برای نگهداری سنگ بر روی لاستیك نیز تکه‌ای به آن متصل کنم. این اصلاحات نتیجهٔ شگفت‌آوری داشت، فاصلهٔ برد قلاب‌سنگ تا حد بسیار زیادی افزایش یافت و کارکردن با آن راحت شده و دقت هدف‌گیری نیز عالی شد. حالا یك قلاب‌سنگ خیلی خوب داشتیم و پسرم آماده شد تا آن را آزمایش کند. تمام مدت تعطیلات آخر هفته را دوتایی مشغول تمرین و هدف‌گیری شیشهٔ نوشابه از فاصلهٔ

سی‌متری بودیم. اولین اصابت سنگ به شیشهٔ نوشابه یك حادثهٔ فراموش نشدنی بود و ما به‌تدریج با تمرین زیاد و آشنایی بیش‌تر برای تحت کنترل داشتن سنگ در هنگام نشانه‌گیری، از چیزهای کوچك‌تری برای هدف‌گیری استفاده کردیم.

کش‌های لاستیکی قلاب‌سنگ پس از استفادهٔ زیاد بر اثر خستگی پاره شد، ولی اصلاً باعث ناراحتی پسرم نشد، معلوم بود که پاره شدن لاستیك قلاب‌سنگ برایش امری عادی و پذیرفتنی بود، به‌هرحال این هم یك نوع اسباب‌بازی بود و نه معجزهٔ خادم. هر وقت که کش لاستیکی پاره می‌شد ما آن را عوض می‌کردیم. چیزی که دردسرآفرین بود لغزش لاستیك‌ها از روی بالای دو شاخه بود که بالاخره این مشکل را هم با پیچیدن لاستیك‌های پاره‌شده به دور قسمت بالایی دو شاخه‌ها برای نگهداشتن لاستیك‌های قلاب‌سنگ حل کردیم. این راه‌حل بسیار کارساز بود و مخصوصاً استفاده کردن از قسمت‌های به‌دردنخور قبلی برای اصلاح و تعمیر قلاب‌سنگ برای پسرم خیلی خوش‌آیند بود. او قبول کرد که حالا قلاب‌سنگ او با هر قلاب‌سنگ حاضری دیگر می‌تواند برابری کند، و ساختن آن هم از وسایل سادهٔ موجود برایش خیلی لذت‌بخش بود. و تمام مشکلاتی که برای ساختن کامل قلاب‌سنگ با آن مواجه شدیم برایش درس آموزنده‌ای در بارهٔ مهندسی سازه بود که اثربخش‌تر از هر کتاب علمی یا هر شعر خیالی بود. او یاد گرفت که با انجام اصلاحاتی مستمر بر روی چیزهایی که کارآیی کم‌تری دارند چیزهایی کارآمدتر بسازد. او یاد گرفت که از اشتباهات قبلی چیزهای جدیدی بیاموزد. پسرم در سن یازده سالگی یکی از درس‌های ابتدایی مهندسی را آموخته بود، و همچنین با غم‌ها و شادی‌های مهندس بودن آشنا شده بود.

ضمیمه

معجزه خادم
یا کالسکه تک اسبه

داستانی مستدل از
الیور وندل هولمز

شنیده‌ای آن داستان عجیب کالسکهٔ تك اسبه را،
که چنان مستدل ساخته شده بود
که تا یکصد سال به تاخت راند، تا روزی
بله، روزی ناگهان ـ نه، عجله نکن،
همه چیز را برایت تعریف خواهم کرد،
که چگونه کشیش را تا سرحد مرگ ترساند،
ترس و وحشتی که هوش از سر همه پراند ـ
هیچ شنیده‌ای آن را، هان ؟

سال یکهزار و هفتصد و پنجاه و پنج.
زمانی که ژرژ دوم هنوز زنده بود، ـ
آن پیر ترشروی آلمانی.

همان زمانی که زمین دهان باز کرد
و شهر لیسبون را فرو بلعید،
در همان روزی که آن زلزلهٔ وحشتناك اتفاق افتاد
خادم ساختن کالسکهٔ تك اسبه را به پایان برد.

اما باید به شما بگویم، در ساختن شاسی‌ها
همیشه، در جایی، حتماً ضعیف‌ترین نقطه‌ای وجود دارد،ـ
در توپی چرخ، در چرخ، در طوقه، در فنر یا در مال بند،
در قاب، یا میله، یا کفی، یا چارچوب،
در پیچ، مهره، تسمه، ـسپر،
آن را می‌توانی در جایی پیدا کنی،ـ
در بالا یا پایین، در این طرف یا آن طرف،ـ
و بدون تردید، به همین دلیل است که
شاسی می‌شکند، قبل از اینکه پوسیده شود.

اما خادم سوگند یاد کرد،
کالسکه‌ای بسازد بی‌نظیر در شهر
بی‌نظیر در کشور و جهان،
طوری ساخته شود که اصلاً نشکند،
خادم چنین می‌گفت، " چون آن‌قدر قوی خواهد بود
که ضعیف‌ترین قسمت آن تاب تحمل همهٔ فشارها را داشته باشد،
طوری درست خواهم کرد که آن قسمت هم
قدرتی یکسان با بقیهٔ قسمت‌ها داشته باشد. "

خادم از اهالی شهر پرس و جو کرد
کجا می‌توان قوی‌ترین چوب بلوط را یافت،

که نه شکافته شود نه خم شود نه بشکند،ــ
آن را برای پره‌ها و کفی و چارچوب می‌خواست،
برای ساخت مال‌بندها به سراغ چوب لانه‌لاتا فرستاد،
میله‌ها را از چوب زبان گنجشک ساخت، که از صاف‌ترین چوب‌هاست،
قاب‌ها را از چوب سفید، که چون پنیر بریده می‌شود،
اما برای چنین کارهایی عمری به درازای آهن دارد،
توپی‌ها را از کندهٔ چوبی بسیار سخت،ــ
از آخرین الواری بود که هنوز باقی مانده بود،
و هیچ تیشه‌ای تراشه‌های آن را ندیده است،
رکابی و پایه، پیچ و مهره،
فنر، چرخ، محور، و سگدست هم، از بهترین فولادها،
تسمه‌ها از چرم گاو، ضخیم و عریض،
چکمه و کروك و گلگیر، از چرم محکم قدیمی
که بعد از مرگ دباغ از انبار وی یافته شده بود.
بدین ترتیب بود که آن را ساخت.
" بفرمایید ! " خادم ندا سرداد " حالا آماده است ! "

آماده باشید که از من بشنوید
چیز بی‌نظیری بود، بدون کم و کاست !
کره‌ها اسب شدند، ریش‌ها سفید شدند،
خادم و همسرش به زیر خاك رفتند،
بچه‌ها و نوه‌هاشان ــ آن‌ها کجایند؟
اما کالسکهٔ تك اسبهٔ قدیمی محکم و استوار مانده است
به همان تر و تازگی روز زلزلهٔ لیسبون !

سال یکهزار و هشتصد، فرا رسید و
شاهکار خادم را قوی و سالم یافت.
ده سال به یکهزار و هشتصد گذشت،ــ
همچنان محکم و استوار بود.
سال یکهزار و هشتصد و بیست آمد،ــ
و همچنان می‌تاخت، همچون گذشته‌ها.
سال سی و چهل هم آمدند و رفتند،
بعد هم سال پنجاه، و سال پنجاه و پنج.

کوچك‌ترین آن‌ها از آن زمان
در صبح یکصد سالگی‌اش از خواب بیدار شد
هیچ احساس غریبی نداشت و ظاهرش هم همان بود.
اما در حقیقت، هیچ نشانی از جوانی‌اش نمانده بود
راهی است که بر همه می‌رود،
بفرمایید، وقت شما فرا رسیده است.

اول نوامبر، ــهمان روز زلزله،ــ
نشانه‌هایی از کهولت در کالسکهٔ تك اسبه هویدا است،
احساسی از یك تباهی عمومی،
ولی بدون هیچ مشکل موضعی.
چنین چیزی نمی‌توانست هم باشد، ــچون هنر خادم
همهٔ قطعات آن را چنان یکسان ساخته بود
که هیچ امکان نداشت یکی از آن‌ها زودتر به دردسر بیافتد.
چون چرخ‌ها به همان استحکام مالبندها بودند،
و کفی درست به همان استحکام چارچوب‌ها بود،
و قاب‌ها درست به همان استحکام کفی بودند،

و تیر مال‌بندها نه کم‌تر و نه بیش‌تر،
و میلهٔ عقبی درست به همان استحکام جلویی،
و فنر و محور و توپی هم همین‌طور.
و هنوز هم کسی نگران نیست
که تا ساعتی دیگر همگی از هم متلاشی خواهد شد !

اول نوامبر، سال پنجاه و پنج !
صبح امروز کشیش به بیرون خواهد رفت.
پسرك‌های بازیگوش در کنار جاده به انتظار کالسکه‌اند !
کالسکهٔ تك اسبهٔ بی‌نظیر آماده است،
اسب کهر دم کوتاهی آن را می‌کشد.
کشیش هی زد،ــ و به راه افتادند.
کشیش نطق یکشنبه‌اش را آماده می‌کرد،ــ
به خامساً رسیده بود، و غرق در فکر بود
که کدام نقل قول را از موسی به یاری بگیرد.
ناگهان اسب بی‌حرکت ایستاد،
درست در کنار تالار اجتماعات در بالای تپه.
ابتدا لرز، و بعد هیجانی غریب،
سپس چیزی شبیه وارفتن،ــ
و کشیش خود را در حالی یافت که روی تکه سنگی نشسته است،
ساعت تالار اجتماعات عدد نه و نیم را نشان می‌داد،ــ
درست همان ساعت زلزلهٔ وحشتناك !
فکر می‌کنید کشیش چه دید،
وقتی از جا برخاست و به اطراف نگریست ؟
شاسی پیر بینوا به کپه‌ای تبدیل شده بود،

مثل اینکه به آسیاب بوده و ساییده شده باشد !

می‌بینی، البته که می‌بینی اگر هوشیار باشی،
که چگونه همگی در یك لحظه از هم پاشیده شدند،ــ
همگی در یك لحظه، و نه هیچ کدام زودتر،ــ
مثل حبابی که می‌ترکد.
و عمر کالسکهٔ تك اسبه بی‌نظیر فرا می‌رسد.

٤

مهندسی و فرضیه

هر شماره از مجلهٔ استراکچرال انجینیر[1] ، نشریهٔ رسمی انجمن مهندسان سازهٔ انگلستان[2] ، تعریف خود از مهندسی سازه را به‌صورت کاملاً مشخص و نمایانی در داخل یك چارچوب در صفحهٔ مندرجات در بر دارد:

> مهندسی سازه عبارت است از علم و هنر طراحی و ساخت ساختمان‌ها و پل‌ها و اسکلت‌ها و بدنه و دیگر سازه‌های مشابه، با رعایت مسائل اقتصادی و زیبایی شناختی، به‌طوری که دارای مقاومتی ایمن باشند تا بتوانند بارهایی را که در معرض آن‌ها قرار خواهند گرفت تحمل کنند

علی‌رغم اینکه بعضی از مهندسان منکر علم یا هنر بودن مهندسی هستند، این انجمن نسبتاً رسمی اعلام می‌کند که مهندسی هم علم است و هم هنر. اصولاً نیز مفهوم طراحی یك سازهٔ جدید چنین اقتضاء می‌کند،

---

1 - *Structural Engineer*

2 - British Institution of Structural Engineers

زیرا که مستلزم خلاقیت و ترکیب تجربه و دانش است، یعنی همان چیزی که هر هنرمندی هنگام کار بر روی بوم یا کاغذ انجام می‌دهد. و مهندس علاوه بر اینکه همانند یك هنرمند بر روی طرح کار می‌کند بایستی همانند یك دانشمند و با روش‌هایی علمی این طرح را مورد آنالیز دقیق قرار بدهد.

تعریف این انجمن از مهندسی سازه به‌طور یکجا شامل مسائل اقتصادی و زیبایی‌شناختی می‌شود، زیرا در هر کار مهندسی ارزشمند از منابع فیزیکی و ذهنی کمال استفاده به عمل می‌آید. محدودیت‌های اقتصادی متأثر از وضعیت بازار می‌باشد، لیکن مسائل زیبایی‌شناختی در این حرفه نیز به‌صورت خود انگیزشی انجام می‌شود، که غالباً همانند کار هنرمندان و دانشمندان است که زیبایی و تکامل را در تابلوهای کوچك‌تر و ظریف‌تر و تئوری‌های جمع و جورتر جستجو می‌کنند ـ ویا مطابق با اصل " کوچك زیباست " که در طراحی‌ها و هنرهای زیبای کوچك‌گرایانه مورد پذیرش است.

و بالاخره، این تعریف شامل مفهوم ایمنی می‌باشد، که نهایتاً مهم‌تر از هر دو عامل اقتصادی و زیبایی می‌باشد، زیرا هرگاه تخریب سازه‌ای باعث مرگ حتی یك انسان گردد اقتصادی‌ترین سازه را تبدیل به پرهزینه‌ترین سازه‌ها و زیباترین سازه را تبدیل به سازه‌ای هولناك خواهد کرد. تعریف انجمن مهندسان سازه با این تأکید خاتمه می‌یابد که سازه‌ها وقتی ایمن هستند که " بتوانند بارهایی را که در معرض آن‌ها قرار خواهند گرفت تحمل کنند " ، لیکن با توجه به اینکه هر سازه در طول عمر خود در معرض نیروهای بی‌شماری قرار خواهد گرفت، جملهٔ مذکور نیز علی‌رغم آنکه جملهٔ کاملی به‌نظر می‌رسد به‌صورت نمادین دارای نقطهٔ پایان جمله نمی‌باشد.

مفهوم تحمل نیرو گرچه به‌ظاهر مفهوم سهل و ساده‌ای به‌نظر

می‌رسد لیکن در عمل مشکل و ممتنع می‌باشد، زیرا اولاً مقاومت مصالحی که قسمت‌های مختلف ساختمان را تشکیل می‌دهند به‌طور کاملاً دقیق شناخته نشده است، و همواره احتمال خطر وجود یك حلقهٔ ضعیف در میان یك زنجیر به‌ظاهر مستحکم را بایستی در نظر داشت. ثانیاً، پیش‌بینی و تعیین نیروهایی که در هر زمانی در آینده به سازه وارد خواهد شد مشکل و غیریقینی می‌باشد، و همانند پیش‌بینی وضعیت هوا می‌باشد که خود این مورد نیز عاملی مهم در تعیین تعدادی از این نیروها است. بدین ترتیب مهندسی سازه عموماً با احتمالات و ترکیب‌هایی از احتمالات سر و کار دارد. سازهٔ ایمن سازه‌ای است که ضعیف‌ترین قسمت آن بر اثر بزرگ‌ترین نیروهایی که به سازه وارد می‌شود هرگز متحمل بارهایی بیش از حد مجاز نگردد. به‌منظور برآورده ساختن نسبتاً دقیق چنین خواسته‌ای که بتوان بر اساس آن مقدار صحیح آهن یا بتن سازه‌ای را تعیین کرد، مهندس طراح بایستی اطلاعات لازم را برای مشخص کردن کاربری سازه و پیش‌بینی نیروهایی که به طرح سازهٔ پیشنهادی وارد می‌شود داشته باشد.

هدف علم عبارت است از ساختن نظریه‌هایی در بارهٔ رفتار هر آنچه که وجود دارد و مورد مطالعهٔ علم قرار می‌گیرد. مشاهده و تجربه، الهام و جرقه‌های لحظه‌ای، نبوغ و حدس‌های مناسب، همگی با حضور یا عدم حضور خود در مواقع حساس و تنگناها، زمینه‌ساز ایجاد دستورالعملی برای هر نظریهٔ علمی هستند. همانند هر دستورالعمل آشپزی که خود آشپز به‌عنوان عامل مهم ولی نانوشته در دستورالعمل مطرح است، شخصیت دانشمند و محقق نیز نقش غیرقابل توصیفی در تأثیر عامل انسانی نظریه‌ها دارد. این جنبه از علم، یعنی ساخت و ساز نظریه‌ها، دارای هیچ روش مشخص جهان شمول نمی‌باشد. ولی وقتی که نظریه‌ای ساخته و پرداخته شود، مثلاً با استفاده از یك نظریهٔ ابتدایی و نیم‌ساخته‌شده و تبدیل

آن به نظریه‌ای گویا و دقیق که شرایط دلخواه دانشمندان را برای ورود به حوزهٔ ساخته‌های جهان علم داشته باشد، آن‌گاه با استفاده از روش‌های علمی می‌توان درستی یا نادرستی آن نظریه و همچنین میزان شایستگی نسبی نظریه‌های مشابه را سنجید. نظریه‌هایی که به این میدان ساخته‌های علمی وارد می‌شوند فرضیه نامیده می‌شوند، و فرآیند سنجش آن‌ها را آزمایش فرضیه‌ها می‌نامند.

هر فرضیهٔ علمی از طریق مقایسهٔ نتایج آن با واقعیات موجود دنیا مورد آزمایش قرار می‌گیرد. ضمن آنکه هر تعداد از نمونه‌هایی که در توافق و تأیید این نظر به‌دست آید نمی‌تواند برای اثبات درستی فرضیه کافی باشد، زیرا می‌توان این ایراد را عنوان کرد که هنوز یکی از آن مواردی که می‌تواند به‌دلیل تعارض با واقعیت نادرستی فرضیه را اثبات کند مورد آزمایش قرار نگرفته است. به‌عبارت دیگر فقط یك نمونه از تعارض و عدم توافق بین فرضیه و واقعیات برای مردود شمردن بی‌چون و چرای فرضیهٔ مذکور کافی است. این فرضیه که زنبورعسل همواره کندوی خود را به‌صورت خانه‌های شش وجهی می‌سازد دارای آن‌قدر موارد تأیید می‌باشد که دیگر آن را به‌ندرت فرضیه می‌توان نامید. این پدیده به‌عنوان یك حقیقت در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، اگر روزی یك پرورش‌دهندهٔ زنبورعسل متوجه شود که زنبورهایش خانه‌های هفت وجهی درست می‌کنند، آن‌گاه نه تنها این فرضیه که زنبورعسل همواره خانه‌های شش وجهی درست می‌کند برای همیشه درهم شکسته خواهد شد، بلکه هیجان غریبی در میان متخصصین زنبورعسل نیز به‌وجود خواهد آمد. اینکه خورشید هر روز صبح طلوع می‌کند یك فرضیه است، و تجربیات ما در بارهٔ طلوع هر روزهٔ خورشید همگی در جهت تأیید، و نه اثبات، این فرضیه است. ولی کافی است که فقط یك روز صبح خورشید طلوع نکند تا غلط بودن قطعی این فرضیه ثابت

گردد. اگرچه که امکان وقوع چنین حادثه‌ای خارج از تصور ما می‌باشد، لیکن واقعیت امر این است که باور ما در خصوص حتمی بودن طلوع خورشید در فردا بیش از آنکه حاصل حقایق شناخته‌شده باشد بر اساس نوعی ایمان و اعتقاد استوار است.

همان‌گونه که برنده شدن در مسابقهٔ شیرینی‌پزی سال نمی‌تواند تضمینی باشد بر اینکه کیك برنده مطابق ذائقهٔ افراد در سال آینده نیز خواهد بود، موفقیت فعلی هر فرضیه، حتی اگر در خصوص موضوع آشکاری چون طلوع روزانهٔ خورشید باشد، تضمین کنندهٔ موفقیت آتی آن نمی‌باشد. به مدت بیش از دو قرن و علی‌رغم وجود بعضی پدیده‌های غیرقابل توجیه، همگان تصور می‌کردند که نیوتون[۱] حرف آخر را در مورد حرکت سیارات زده است، تا اینکه اینشتین[۲] فرضیهٔ کلی‌تر خود را ارائه کرد. اگرچه که ممکن است مطابق افکار سنتی ادعا شود که اینشتین قوانین نهایی جهان را کشف کرده است، ولی تاریخ علم خاطر نشان می‌سازد که چنین ادعایی گستاخانه بوده و بسیار غیرمحتمل است، و می‌توان پیش‌بینی کرد که روزی فرضیهٔ مناسب یك نابغهٔ دیگر جایگزین فرضیهٔ اینشتین شود. درعین‌حال، فرضیهٔ نسبیت و همچنین قوانین نیوتون، علی‌رغم محدودیت‌های شناخته‌شدهٔ آن، وسیلهٔ بسیار مناسبی برای هوانوردی در فضا و ساختن پل‌ها و سدها در زمین می‌باشند. این یکی از شگفتی‌های کارهای مهندسی و علم است که می‌توان بر اساس چنین فرضیه‌های تقریبی، مانند مکانیك نیوتونی، کارهای عظیمی انجام داد.

طراحی مهندسی دارای وجوه مشترك خاصی همانند موارد وضع فرضیه‌های علمی است، ولی به‌جای ساختن فرضیاتی در بارهٔ موضوعاتی از

۱- Isaac Newton ، (۱۷۲۷-۱۶۴۲م)، ریاضیدان و فیلسوف طبیعی انگلیسی

۲- Albert Einstein ، (۱۹۵۵-۱۸۷۹م)، فیزیکدان آمریکایی (متولد آلمان)

قبیل اتم‌ها و لانه‌های زنبورعسل و یا سیارات، مهندسان فرضیاتی در بارهٔ موضوعاتی مانند مجموعه‌هایی از بتن یا فولاد که در ساخته‌هایشان نیاز دارند به‌کار می‌برند. بدین ترتیب هر ساختمان یا پل جدید را می‌توان به نوعی یك فرضیه دانست. مثلاً یك فرضیهٔ مهندس سازه را می‌توان چنین بیان کرد که پلی با چنین مشخصات بر روی رودخانه‌ای با چنان وضعیت و در تحت فلان شرایط ترافیکی و نگهداری تا این قدر سال دوام خواهد داشت و خراب نخواهد شد. حال اگر چنین پلی ساخته شود و سال‌های سال بدون ایجاد مشکلی ترافیك را عبور دهد، فرضیهٔ فوق مستمراً تأیید خواهد شد ــ ولی تا وقتی که مدت زمان تعیین‌شده در طراحی منقضی نگردد نمی‌توان این فرضیه را ثابت‌شده تلقی کرد. و اگر قبل از به‌سر رسیدن مدت عمر طراحی این پل فرو ریزد برای هیچ کس شکی باقی نخواهد ماند که حتماً فرضیهٔ اولیه غلط بوده است.

مراحل کار طراحی مهندسی عبارت است از یك سری فرضیه‌هایی بدین صورت که چنین و چنان ترکیبی از اجزاء دارای کفایت کاری مورد نظر می‌باشند بدون آنکه دچار خرابی شوند. هر ترکیب فرضی از اجزاء به‌صورت نوشته یا شکل بر روی اوراق طراحی یا صفحهٔ نمایش کامپیوتر نشان داده می‌شود، و بایستی از طریق انجام آنالیزهای لازم مورد بررسی قرار گیرد. این آنالیز شامل تعدادی سؤال در بارهٔ رفتار اجزاء در تحت شرایط متصور در هنگام بهره‌برداری پس از ساخت می‌باشد. پاسخ به چنین سؤالاتی برای طرح‌هایی که چندان ابتکاری و بدیع نباشند آسان است، ولی در مورد یك طرح جدید و بی‌سابقه برای انجام آنالیز و محاسبات کامل حتی استفاده از کامپیوتر نیز ضرورت پیدا می‌کند. هرگاه بر اساس آنالیز انجام‌شده هرکدام از این اجزاء مشخصات لازم را ارضاء نکنند طرح کلی مردود شمرده می‌شود. در این حالت می‌توان با تغییر و تقویت اجزاء ضعیف، طرح جدید و اصلاح‌شده را

مجدداً آنالیز کرد. این فرآیند آن‌قدر ادامه می‌یابد تا طراح متقاعد شود که تحت شرایط تعیین‌شده هیچ امکان ایجاد خرابی در سازه وجود ندارد. بدیهی است چنانچه طراح در محاسبات اشتباه کند یا بعضی از موارد بروز خرابی را از نظر دور داشته باشد یا کامپیوتر را برای انجام صحیح آنالیز خوب برنامه‌ریزی نکرده باشد، اشتباهاً تصور خواهد شد که فرضیهٔ مورد نظر به‌طور صحیح ارزیابی شده است، در صورتی که در واقع می‌بایستی مردود شمرده شده باشد. در مورد صحت یا خرابی هر طرحی هرگز نمی‌توانیم به اطمینان مطلق و قطعی دست یابیم، زیرا هرگز نمی‌توانیم اطمینان داشته باشیم که سؤالات و اطلاعات ما از وضعیت طرح و آیندهٔ آن جامع و کامل بوده و شامل کلیهٔ جزئیات بوده باشد.

مشخصهٔ اصلی کلیهٔ فرضیات مهندسی به‌طور صریح یا ضمنی بر این اصل استوار است که سازهٔ طراحی‌شده اگر مطابق با شرایط مورد نظر در طراحی مورد استفاده قرار گیرد دچار خرابی نخواهد شد. بدین ترتیب خرابی‌ها و شکست‌های مهندسی را می‌توان به‌عنوان فرضیه‌های نادرست پنداشت. در نتیجه می‌توان گفت که خراب شدن راهروهای معلق هتل هایت ریجنسی این فرضیه را رد کرده است که راهروهای مذکور می‌توانند آن تعداد افرادی را که در هنگام خرابی روی آن بوده‌اند تحمل کنند، خراب شدن پل تاکوما نیز این فرضیه را مردود شمرد که آن دهانهٔ معلق پل می‌تواند ترافیك صبحگاهی را در هنگامی که سرعت باد شصت و هفت کیلومتر در ساعت باشد تحمل کند، و خراب شدن سد تتان[1] این فرضیه را که سد مذکور می‌تواند آب‌های رودخانه را برای آبیاری در خود ذخیره کند رد کرده است. به عبارت دیگر، موفقیت هر سازه تا زمان حاضر فقط تأییدکنندهٔ فرضیهٔ کارآمد بودن آن سازه به

---

۱ - Teton Dam ، در شمال غربی ایالت وایومینگ آمریکا

همان میزانی است که طلوع تاریخی و هر روزهٔ خورشید ما را در پیش‌بینی آینده مطمئن‌تر می‌کند. صحت و مقاومت سازه‌ای پل بروکلین[۱] تا این زمان فقط بیانگر پابرجا بودن آن به مدت بیش از یك قرن می‌باشد، و اینکه پل مزبور فردا نیز پابرجا باشد موضوعی احتمالاتی است، و اگرچه که احتمال آن بسیار زیاد است لیکن به‌هرحال امری یقینی نیست.

چنین موضوعاتی چندان بی‌شباهت به احتمال بروز بیماری در انسان‌ها نیست. هر کدام از ما حتی اگر سال‌های مدیدی زندگی سلامتی داشته باشیم به‌خوبی می‌دانیم که هیچ تضمینی وجود ندارد که فردا نیازمند پزشك و بیمارستان نشویم و یا حتی زنده باشیم. خویشان یا دوستانی را دیده‌ایم که به‌طور ناگهانی دچار سرطان یا کمردرد یا حملهٔ قلبی یا گزیدگی شده‌اند. کسانی را می‌شناسیم که در عنفوان جوانی بر اثر تصادف اتومبیل یا سقوط هواپیما یا یك حادثهٔ عجیب یا حتی یك شکست سازه‌ای جان خود را از دست داده‌اند. اگر ما آمادگی روبرو شدن با چنین حوادثی را نداشتیم احتمالاً در گوشه‌ای زمین‌گیر می‌شدیم زیرا قادر به فعالیت و حرکت کردن در دنیایی با چنین خصوصیاتی نبودیم. در این جهان صاعقه وجود دارد و ممکن است این صاعقه زمانی به ما اصابت کند. ما مجبور هستیم که خطر چنین احتمالی را در کنار همهٔ نعمات زندگی این دنیا بپذیریم، و چارهٔ دیگری هم نداریم. ما همه روزه به‌همراه استفاده از لذات و خوشی‌های این حیات در مخاطرهٔ خطرات دور و نزدیك آن نیز هستیم.

یکی از اصلی‌ترین و متداول‌ترین عناصر سازه‌ای عضوی است که مهندسان آن را تیر می‌خوانند. نقش و کاربرد تیر برای پوشاندن قسمتی

۱- Brooklyn Bridge ، در نیویورک.

از فضا و تحمل خمش و تغییرمکان ایجادشده بر اثر نیروهایی است که در جهت عمود بر طول آن وارد می‌شوند. با چند مثال آشنا می‌توان این تعریف خشك و مجمل را ملموس کرد. خانه‌ها دارای تیرهای کف هستند، که اگر قبل از به اتمام رسیدن پوشش کف‌سازی دقت کرده باشیم خواهیم دید که تیرها از دیواری تا دیوار دیگر امتداد دارند، و هرگاه که فاصلهٔ دیوارها نسبتاً زیاد باشد این تیرها دارای تکیه‌گاه‌هایی میانی از ستون‌ها نیز هستند. تیرها وزن خود و وزن کف روی آن و وزن وسایل و افرادی را که روی آن قرار می‌گیرند و یا عبور می‌کنند و باعث شکم دادن جزئی و غیرمحسوس تیرها به‌طرف پایین می‌گردند تحمل می‌کنند. از آنجا که خانه‌های معمولی دارای اندازه‌های معمولی هستند، سازندهٔ چنین خانه‌هایی کمتر به فکر اندازه و مقاومت تیرهای کف است، و هر خانهٔ جدید را به‌خوبی همهٔ خانه‌های خوب و موفقی که قبلاً ساخته است می‌سازد.

لیکن اگر در جزیره‌ای غیرمسکونی گیر افتاده باشیم و فقط الوارهای چوبی برای ساختن خانه در دسترس باشد و هیچ طرحی یا تجربهٔ یك معمار را نداشته باشیم، چه خواهیم کرد؟ هنگام این طرف و آن طرف کشیدن این تیرهای چوبی دراز که مقطع آن‌ها مثلاً پنج در بیست و پنج هستند متوجه خواهیم شد که این تیرها در یك طرف خیلی آسان‌تر نسبت به طرف دیگر خم می‌شوند. این خاصیت را در یك خط - کش نازك بلند بهتر می‌توان مشاهده کرد. اگر یك خط کش یك‌متری را در دست بگیریم متوجه می‌شویم که وقتی خط کش به حالت تخت قرار داشته باشد به‌سادگی خم می‌شود، و اگر انگشتان خود را در زیر دو انتهای خط کش به‌صورت تکیه‌گاه نگهداریم افت خط کش در قسمت وسط آن به‌سادگی قابل مشاهده است. این حالت به زبان مهندسی چنین بیان می‌شود که: " تیر دو سر مفصل تحت اثر بار یکنواخت وزن خود

قرار دارد. " همان‌طور که ما هرگز خانه‌مان را از چنین چوب‌های نرم و خم شونده‌ای نمی‌سازیم، بایستی توجه داشته باشیم که الوارهایی به مقطع پنج در بیست و پنج سانتیمتر نیز متناسباً دچار خمیدگی می‌شوند، مخصوصاً اگر که غیر از وزن خود آن‌ها چیزهای دیگری هم روی آن‌ها قرار بگیرد، و چنانچه کف اتاق را بر روی قسمت تخت الوار بسازیم، نه تنها بایستی انتظار ایجاد خمیدگی زیاد در آن‌ها را داشته باشیم بلکه هنگام راه رفتن در اتاق کف آن همانند فنر مرتعش خواهد شد. از طرف دیگر، اگر خط کش را طوری نگهداریم که دو لبهٔ آن به طرف بالا و پایین قرار بگیرند هیچ خمیدگی محسوسی نخواهیم دید. به زبان مهندسی، " تیر در مقابل خمش ناشی از وزن خود در این طرز قرار گرفتن بسیار مقاوم است، " و ما می‌توانیم این تجربه را تعمیم دهیم و بگوییم که تیرهای کف اتاق بایستی طوری نصب شوند که قسمت عمیق آن‌ها وزن کف را تحمل کنند و نه قسمت تخت آن‌ها.

عملکرد وزن یك مبلمان سنگین و یا وزن افراد بر روی کف اتاق را می‌توان با نگهداشتن دو انتهای خط کش و فشار دادن وسط آن توسط زانو آزمایش کرد. در این حالت مشاهده خواهیم کرد که بر اثر فشار زانو بر روی قسمت تخت خط کش خمیدگی بیش‌تری در آن ایجاد می‌شود، و همچنین اگر فشار زانو به‌طرف لبهٔ خط کش باشد آن‌گاه خط کش دچار پیچش خواهد شد. این نوع تغییرشکل را در مهندسی " ناپایداری "[1] یا " کمانش "[2] می‌گویند، و ما می‌توانیم کاملاً حس کنیم که‌این پدیده با افزایش تدریجی فشار زانو بر روی خط کش به‌طور ناگهانی اتفاق می‌افتد. ما برای اینکه مطمئن شویم تیرهای کف‌اتاق

---

1 - instability
2 - buckling

خانه‌مان دچار چنین رفتار غافلگیر کننده‌ای نخواهند شد آن‌ها را در یك یا دو نقطه از طول دهانه مهار می‌کنیم تا در مقابل حرکت جانبی نامطلوب تیر مقاوم شوند. حال، اینکه ما در اولین کوشش خود برای ساختن خانه در جزیره‌ای دور افتاده همهٔ این موضوعات را پیش‌بینی و رعایت بکنیم و یا نکنیم بستگی به این دارد که آیا امکان خم شدن الوار چوب برای ما مهم جلوه کرده باشد و یا نه، و آیا در همان اوانی که کار ساختمانی را در پیش روی داشته‌ایم با یك خط کش بازی کرده باشیم و یا نه، و آیا هنگام کار گذاشتن تیرها برای نصب مناسب‌تر آن‌ها به خودمان زحمت بیش‌تری داده باشیم یا نه. زیرا اگر ما کسی مانند جمعه[1] را نداشته باشیم که به ما کمك کند، مسلماً قرار دادن تیرها به‌صورت تخت بسیار آسان‌تر از قراردادن آن‌ها بر روی لبه باریك‌تر و ثابت نگهداشتن مجموعهٔ این تیرها در ارتفاع زیاد سقف و پوشاندن روی آن‌ها خواهد بود. چنین چیزی مستلزم صبر و حوصله و اقبال خوش همانند هنگام ساختن خانه‌ای با کارت‌های کاغذی است.

بدین ترتیب حتی کار پیش‌پاافتاده‌ای همچون ساختن کف اتاق را می‌توان به‌عنوان گزارهٔ یك فرضیه در نظر گرفت، اگرچه که انجام آن از طریق سعی و خطا صورت گرفته باشد و اصلاً به یك نتیجهٔ قطعی و روشن نرسد. وقتی که تیرهای کف را به‌طرز خاصی قرار می‌دهیم، به‌طور ضمنی اذعان داریم که تیرها در این حالت بدون افت زیاد و بدون از جا در رفتن و بی‌آنکه شکسته شوند کف را تحمل خواهند کرد. اگر اختلاف عملکرد تیر را در حالت تخت قرار گرفتن یا به عمق قرار

---

۱ ـ اشاره‌ای است به خدمتکار رابینسون کروزو که بر اساس داستان کتابی مشهور، بعد از شکسته شدن کشتی‌اش بمناچار سالهای بسیاری را در جزیره‌ای غیرمسکونی می‌گذراند و پس از سالها بطور اتفاقی جان انسانی بدوی را از دست آدمخواران که با قایق به آن جزیره آمده بودند نجات می‌دهد و نام وی را جمعه می‌گذارد. (م)

گرفتن درك نکرده باشیم، اگر فکر نکرده باشیم قطعه سنگ صاف بزرگی را که برای میز چای‌خوری می‌خواهیم استفاده کنیم هرگاه روی کف جابه‌جا کنیم ممکن است باعث از جا در رفتن تیرها بشود، و یا اگر هنگام بالا و پایین پریدن در ورزش صبحگاهی احتمال نداده باشیم که ممکن است فشار آن از قدرت تحمل تیرها بیش‌تر باشد، آن‌گاه بایستی انتظار آن را داشته باشیم که روزی با فرو ریختن کف، غلط بودن فرضیهٔ ما اثبات شود. از طرفی، اگر هم خانهٔ ما پابرجا بماند لزوماً به این معنی نخواهد بود که ما، از طریق طراحی و یا به‌علت خوش‌اقبالی، در قرار دادن تیرهای کف روش بهینه را اختیار کرده بوده‌ایم. زیرا ممکن است که ما تیرها را به حالت تخت قرار داده باشیم ولی به‌علت بسیار کوچك بودن دهانهٔ اتاق، افت یا ارتعاش آن را هنگام راه رفتن احساس نکنیم. یا ممکن است مهارهای جانبی تیرها را نگذاشته باشیم ولی به‌دلیل عدم علاقه به میز چای‌خوری و نداشتن آن در اتاق مشکلی بروز نکرده باشد. یا اینکه عادت داشته باشیم که ورزش صبحگاهی را در بیرون اتاق انجام دهیم و بدین ترتیب حدود توانایی مقاومت تیرهای کف تحت اثر چنین حالتی آزمایش خود را پس نداده باشد. بنابراین ممکن است که هرگز وضعیتی پیش نیاید که این فرضیهٔ ساختن کف مورد آزمایشی بحرانی قرار بگیرد.

هرگاه مدتی بعد کشتی دیگری در نزدیکی جزیرهٔ ما غرق شود و کسی با مقداری الوار به جزیره پناه آورد، بدیهی است که ما تجربهٔ خودمان در خانه‌سازی را در اختیار وی قرار خواهیم داد. اما ممکن است که الوارهای وی درازتر باشند و یا اندازهٔ مقطع آن کوچك‌تر باشد و یا اینکه وی بخواهد خانه‌ای بزرگ‌تر از خانهٔ ما بسازد. چنانچه ما طی مدت گذشته دچار چند شکست سازه‌ای شده بوده باشیم و بدین ترتیب چندین فرضیهٔ خاص را مورد آزمایش قرار داده باشیم و نقص آن‌ها بر ما معلوم

شده باشد، می‌توانیم به این فرد تازه‌کار آنچه را که نبایستی انجام دهد متذکر شویم. همچنین، اگر خانهٔ اولیهٔ ما هنوز استوار مانده باشد، همسایهٔ ما ممکن است صرفاً به نمونه‌برداری از طرح ما اکتفا کرده، و آن را در یك مقیاس بزرگ‌تر با استفاده از الوارهای بلندتر خود، سازهٔ جاه‌طلبانه‌تر خود را بسازد. و اگر الوارها زیاد بلندتر نباشند و یا زیاد لاغرتر نباشند یا صاحب‌خانه به سنگینی ما نباشد یا مثل ما هوس استفاده از میز سنگی نکند و خانه‌اش را با وسایل زیاد مبلمان نکند ممکن است که خانه‌اش پابرجا باقی بماند. اما اگر وی روزی تصمیم به تغییر دکوراسیون بگیرد، و ما دوتایی میز سنگی بزرگی را در وسط اتاقش قرار دهیم، آن‌گاه ممکن است که نادرست بودن فرضیهٔ کفایت سازه‌ای اتاق وی ثابت شود.

هر خانه‌ای بر اثر عوامل دیگری غیر از خراب شدن کف نیز می‌تواند دچار شکست بشود، مثلاً می‌توان تصور کرد که دیوارها یا سقف نیز دچار ضعف‌های خاص خود باشند. با شبیه‌سازی از طرح‌های موفق می‌توان از همهٔ این مشکلات پرهیز کرد، اما همانند مثال ساکنان جزیرهٔ ما، کوچك‌ترین تغییری نسبت به نمونهٔ اصلی می‌تواند مصیبت‌آفرین گردد. و تغییرات اجتناب‌ناپذیر هستند، چه بر اثر کم‌دقتی یا خست، و چه به‌علت فرضیات جدید به‌منظور ساختن خانه‌ای بزرگ‌تر و یا افزایش سرعت ساختن خانه و یا کاهش مقدار مصرف الوار. اما سازنده‌ای که بیش از حد به تغییرات جدید اطمینان داشته باشد و یا چارچوب طرح را به درستی مهاربندی نکرده باشد ممکن است خانه بر اثر طوفانی در نیمه‌شب فرو ریزد. و زمستانی سخت و استثنایی ممکن است باعث انباشته شدن انبوهی برف بر روی بام‌ها شود و سقف‌های بسیاری را در آن ناحیه خراب کند. بارش فراوان برف در زمستان ۱۹۷۹ باعث انباشته شدن برف‌های بسیار روی بام‌های انبارهای نواحی اطراف شیکاگو گردید به‌طوری که تعدادی از آن‌ها که سالیان متمادی زمستان‌های عادی را

گذرانده بودند خراب شدند.

وقتی ساختن یك خانه یا انباری با این همه مشکلات و خطرات همراه باشد، آن‌گاه می‌توان پی برد مهندسی که می‌خواهد طویل‌ترین پل دنیا را بسازد، که می‌توان آن را مثل یك تیر بسیار عظیم در نظر گرفت، و یا بلندترین آسمانخراش دنیا را بسازد، که می‌توان آن را مثل تیر بسیار بلندی که در زمین کاشته شده باشد در نظر گرفت، چه مسؤولیت خطیری به‌عهده دارد. در چنین حالت‌هایی چیزی وجود ندارد که بتوان از آن تقلید کرد، و یا در رابطه با آن‌ها آزمایش‌هایی شبیه به آزمایش با خط کش انجام داد. حتی اگر هم برای مهندس طراح موقعیت‌هایی فراهم شده باشد تا تجربیاتی در مورد سازه‌های مشابه ولی کم‌اهمیت‌تر از سازه‌ای که مسؤولیت طراحی آن را بر عهده گرفته است کسب کرده باشد، باز هم همواره این سؤال مطرح است که تعمیم دادن این تجربیات تا چه حد می‌تواند اعتبار داشته باشد و طراح تا چه مقدار می‌تواند از آخرین فرضیهٔ تأییدشده پا فراتر بگذارد. در اینجاست که مهندسی به طریقی به کار علمی شباهت پیدا می‌کند، چون لازم می‌شود که مهندسان تیرها و دیگر اجزاء ساختمانی را همچون مباحث علمی مورد مطالعه قرار دهند. به‌همین سبب است که مباحث مربوط به مطالعهٔ اجزاء سازه‌ای را علم مهندسی می‌نامند، که تاریخچه‌ای طولانی و مستقل از علم محض دارد.

گالیله[1] با منش دانشمندان مهندسی مدرن در کتاب خود به نام محاوراتی در باب دو علم جدید[2] به مقاومت جامدات در برابر گسیختگی پرداخته است. یکی از موضوعاتی که سالویاتی با ساگردو و سیمپلیچیو بحث می‌کند در بارهٔ مقاومت، چیزی است که امروزه آن را

---

۱ - Galileo ، (۱۶۴۲-۱۵۶۴م)، منجم و فیزیکدان ایتالیایی

2 - *Dialogues Concerning Two New Sciences*

به نام تیر طره‌ای می‌شناسیم. این تیری است که فقط از یك طرف آن نگهداشته می‌شود و تمام وزن و نیروی وارده در سراسر طول آزاد تیر را تحمل می‌کند. درخت‌ها و آسمانخراش‌ها در برابر فشار نیروی باد که می‌خواهد آن‌ها را واژگون سازد همانند تیر طره‌ای عمل می‌کنند. بازوهای ما در حالت بازشده و میله‌های پرچم و بالکن نیز همانند تیر طره‌ای عمل می‌کنند. تیر طره‌ای گالیله به‌صورت الواری بود که یك انتهای آن درون دیوار قرار گرفته بود و قطعه سنگ بزرگی را که در انتهای دیگر آن گذاشته شده بود نگهداری می‌کرد. این نقشهٔ قرن هفدهمی بارها و بارها چاپ شده است، و آراستگی این طرح به گل و گیاه و سایه روشن‌ها مایهٔ شرمساری نقشه‌های مهندسی خشك و خالی امروزین است.

اگرچه تیر طره‌ای گالیله بسیار آراسته و مزین بوده است، اما آنالیز وی از مقاومت تیر کم‌ارزش و بی‌محتوا می‌باشد. وی به‌درستی، و البته بدون تردید پس از شکستن عملی چندین تیر طره‌ای، همانند بازماندهٔ کشتی غرق‌شده‌ای که در جزیره اقدام به ساخت خانه کرد، متوجه شده بود که تیر بر اثر افزایش وزن ترك برداشته و از ناحیه اتصال به دیوار می‌شکند. اما به سبب آنکه وی ظاهراً اولین کسی بوده است که با روشی منطقی و مستدل به این مسأله می‌پرداخته، قاعدتاً پذیرفتنی خواهد بود که در بارهٔ نحوهٔ توزیع واقعی نیروی شکست در عمق تیر فرضیات اشتباهی هم کرده باشد. (این موضوع تا هفتاد و پنج سال بعد نیز همچنان ناشناخته بود، تا اینکه یك فرانسوی به نام پرنت[1] در سال ۱۷۱۳ دو مقاله راجع به خمش تیرها منتشر کرد). با وجود این، گالیله حتی با همین تصور اشتباه از نحوهٔ مقاومت تیر در مقابل شکست، به نتیجهٔ درستی دست

---

1 - Parent

یافت که مقاومت تیر با مجذور عمق آن متناسب است. این نتیجه با تجربهٔ ما نیز سازگار است که شکستن الوار از طریق خم کردن آن در جهت اندازهٔ کوچك‌تر مقطع آسان‌تر از جهت اندازهٔ بزرگ‌تر است، و الواری به مقطع یك در ده سانتیمتر در مقابل خمش در جهت عمق ده سانتیمتری دارای مقاومتی صد برابر خمش در جهت عمق یك سانتیمتری می‌باشد. بدین ترتیب دستاورد گالیله بیانگر موضوعی است که قبلاً در بارهٔ خط کشی که فقط یك انتهای آن را در دست گرفته باشیم می‌دانستیم، یعنی همان که خط کش در یك جهت دارای مقاومت بیش‌تری در برابر خم شدن است. درخت‌ها، این موجودات طره‌ای قائم، دارای ساقه‌های مناسب تقریباً مدوری هستند که در هر جهت وزش باد مقاومت یکسانی دارد. در حالی که آسمانخراش‌ها را معمولاً به‌صورت مدور نمی‌سازند، زیرا در تعیین شکل ساختمان‌های بلند ملاحظات سازه‌ای از قبیل مقاومت در برابر باد به‌ندرت اهمیتی همچون عوامل کاربردی و معماری دارد.

آنالیز گالیله در مورد تیر طره‌ای در برگیرندهٔ نکتهٔ بسیار مهمی برای درك چگونگی امکان وقوع حوادث سازه‌ای می‌باشد: وی با بررسی مسألهٔ مقاومت تیر به پاسخی دست یافت که اصولاً از لحاظ کیفی صحیح بود، ولی پاسخ وی از نظر کمّی مطلقاً صحیح نبود. گالیله با استدلال غلط کمّی به پاسخ صحیح کیفی دست یافته بود. بدین ترتیب گالیله می‌توانست هر معماری را به‌درستی راهنمایی کند تا تیرها را طوری سامان دهد که بهترین نتیجه را بگیرد، ولی چنانچه از وی خواسته می‌شد که حداقل اندازهٔ تیر را برای تحمل وزن مشخصی در انتهای تیری طره‌ای به طول معلوم تعیین کند، پاسخی که او از فرمول خود محاسبه می‌کرد تا حد سه برابر ضعیف‌تر می‌بود. در بحثی که راجع به ایدهٔ ضریب اطمینان خواهیم داشت به این نوع خطاها اشاره خواهیم کرد، لیکن نکتهٔ بسیار مهمی که اینجا وجود دارد آن است که ظاهراً می‌توان با استدلال غلط

هم به پاسخ‌هایی صحیح دست یافت. به‌منظور بیان ساده‌ای از چنین وضعیتی، این نظریه را در نظر بگیرید که حاصل‌ضرب هر عددی در خودش برابر حاصل‌جمع آن عدد با خودش است. این نظریه هرگاه که عدد مربوطه ۲ باشد به‌طور کامل کارآمد می‌باشد زیرا حاصل ۲×۲ همان نتیجه‌ای را می‌دهد که حاصل ۲+۲ به‌دست می‌دهد.

اگر کسی علاقه زیادی به باور کردن این نظریه داشته باشد و آن را بجز حالت عدد ۲ مورد آزمایش قرار نداده باشد، می‌توان تصور کرد که وی برای محاسبهٔ مجذور کلیه اعداد به دو برابر کردن آن‌ها اکتفا خواهد کرد. حال فرض کنید که مجذور عددی بیانگر مقدار بار وارده به تیر باشد. آن شخص تا زمانی که به دقت زیاد نیاز نداشته باشد و احتیاجی به مجذور کردن اعدادی غیر از اعداد نزدیك به ۲ نداشته باشد، گرفتار آثار چنین اشتباهی نخواهد شد. اما اگر روزی به مجذور ۲۰ نیاز داشته باشد، این روش غلط به‌جای ۴۰۰ فقط عدد ۴۰ را خواهد داد، و میزان فاحش اشتباه نهایتاً باعث کشف آن خواهد شد، زیرا تیر در حالی خواهد شکست که طبق نظریهٔ مورد استفاده نبایستی بشکند. در واقع چنین شکستی برای کشف خطای موجود ارزشی بیش از همه تأییدهای موفقیت‌بار آن نظریهٔ ناصحیح دارد.

در این زمان دانشجوی سال دوم مهندسی که اولین درس مقاومت مصالح را می‌گذراند، به‌سادگی می‌تواند اشتباه آنالیز گالیله را دریابد، ولی نمی‌توان توقع داشت که این اشتباه برای گالیله و معاصرین وی نیز می‌بایستی روشن بوده باشد. میزان بینایی ما همیشه ۲۰/۲۰ می‌باشد، اما برای بسیاری از ما پیش آمده است که هنگام برگشت به گذشته و بازبینی و نقد کارهای قبلی خود متوجه شده‌ایم گاهی اوقات دچار نزدیك‌بینی بوده‌ایم. چه بسا اشتباهات چاپی که پس از بارها نمونه‌خوانی از نظر دور مانده است. چه بسا افرادی که به‌دلیل وجود اشتباه محاسباتی و علی‌رغم

چندین بار کنترل حساب بانکی خود مدت‌ها دچار سرگردانی شده‌اند.

مهندسان امروز نیز همانند گالیلهٔ سه و نیم قرن پیش سوپرمن نیستند. در فرضیات و محاسبات و نتیجه‌گیری‌های خود اشتباهاتی می‌کنند. اینکه آن‌ها دچار اشتباه می‌شوند بخشودنی است، و اینکه آن‌ها این اشتباهات را کشف می‌کنند الزامی است. این ماهیت مهندسی مدرن است که هر شخصی می‌تواند نه فقط کار خود بلکه کار دیگران را هم بررسی کند و کار وی نیز توسط دیگران قابل بررسی است. برای اینکه چنین چیزی صورت پذیرد، بایستی کارها بر طبق روال خاصی انجام شود و با استانداردهای معینی مطابقت داشته باشد و امری قابل فهم در زمینهٔ ارتباطات متقابل فنی باشد. چون طراحی با ابتکار و خلاقیت همراه است، بنابراین آنالیز مهندسی است که بایستی حالت زبان بین‌المللی این حرفه را داشته باشد و روش مهندسی - علمی نیز داوری استنتاجات متفاوتی را که از این آنالیز برمی‌آید به عهده داشته باشد. و اختلافات نیز وجود خواهد داشت، زیرا مسائلی که مطرح می‌شوند شامل اجزاء بغرنج‌تری از تیر طره‌ای یا تیر ساده می‌باشند، به‌طوری‌که روابط فیمابین این اجزاء گوناگون نه فقط در واقعیت بلکه حتی در آنالیز انتزاعی موضوع نیز کمتر ملموس و قابل درك مستقیم می‌باشد. درك احساسی ملموس از سازهٔ عظیم‌الجثه‌ای همچون جمبوجت یا پل معلق چیزی نیست که از راه خم کردن خط کش و مثل آن حاصل شود. و این فرضیه که فلان سازه می‌تواند به‌طور ایمن از میان طوفان و باران پرواز کند، ارزشی معادل میلیون‌ها دلار و صدها جان انسان دارد.

۵

پیش‌بینی شکست

همهٔ موفقیت‌های مهندسی، از اهرام تاریخ باستان تا آسمانخراش‌های لجام گسیختهٔ عصر مدرن، با هدف دست‌یابی به چیزی بدون شکست شروع شده‌اند، که " بدون شکست " از دیدگاه مهندسان نه فقط به مفهوم برپا ماندن و عدم فرو ریختن است بلکه همچنین به مفهوم پایداری و تداوم به کیفیتی است که می‌توان آن را " سلامت سازه‌ای " نامید. سازه‌های ناسالم را ـ از قبیل آن‌هایی که خیلی زود دچار خوردگی می‌شوند، آن‌هایی که تحت شرایط عادی مکرراً نیاز به تعمیرات دارند، آن‌هایی که پس از اندك سالی مبتلا به ترك خستگی می‌شوند ـ می‌توان به‌صورت سازه‌هایی پنداشت که در همان دوران ِ ساخت دچار شکست شده بوده‌اند. و اگر طراح حتی فقط در یك مورد غفلتی بکند که باعث شکست سازه گردد، هر چقدر هم که طرح وی چه در ذهن او و چه بر روی کاغذ دارای خلاقیت و جذابیت باشد، همگی بر فنا خواهد بود.

قدیمی‌ترین سازه‌های مهندسی احتمالاً به طریق سعی و خطا ساخته شده‌اند، و شاید بتوان مدعی شد که اهرام مصر نیز به همین روش ساخته شده باشند. گرچه نحوهٔ ساختن اهرام، با همهٔ آن تعداد و اندازه‌های

سرسام‌آور قطعات سنگ‌ها و انبوه کارگران، ممکن است هرگز دقیقاً معلوم نشود، اما تصور اینکه چرا شکل آن‌ها بدین صورت است چندان مشکل نیست. شکل هرم، شکل بسیار پایداری است، که شاید از شکل تودهٔ شنی پایین ساعت شنی تداعی شده باشد. اما شکل آن را نمی‌توان به زمان خاصی نسبت داد، این شکلی است که شبیه کوه‌ها است، شکلی است که هرگاه از دور به آن نگریسته شود چنین به‌نظر می‌رسد که این ظاهر یکپارچه می‌تواند حتی در مقابل سهمگین‌ترین طوفان‌ها نیز پایداری کند و سرنگون نشود. و حتی اگر هرم چهار وجهی منظمی نباشد که بتوان آن را جزء اجسام افلاطونی[1] قلمداد کرد، مطمئناً شکل خوش‌آیندی است، اگر نگوییم که اسرارآمیز. قاعدهٔ اهرام مصر کم و بیش مربع است و قطعات گوشه‌ای آن در هر ردیف نیز به شکل مربع است، که راه ساده‌تر و طبیعی‌تری برای سرهم‌بندی کردن قطعات مکعب شکل سنگ است، تا به شکل مثلث که سطوح جانبی هرم آن را ایجاب می‌کند. با وجود همهٔ این تصمیم‌های کم و بیش بدیهی که خواهی نخواهی اتخاذ شده است، نحوهٔ دقیق سوار کردن سنگ‌ها و میزان شیب دقیق سطوح جانبی هرم تصمیم حیاتی و مهمی بوده است که به این سادگی‌ها به آن نرسیده‌اند.

هرگاه مقداری ماسه از ارتفاع به زمین ریخته شود زاویهٔ مخروطی طبیعی به خود خواهد گرفت، که این زاویه با توجه به نوع ماسه و شرایط انباشته شدن تغییر می‌کند. اگر ماسه بر روی تودهٔ ماسه‌ای موجود ریخته شود، وزن ماسهٔ اضافه‌شده ممکن است باعث فرو ریخته شدن مقداری از ماسه‌های موجود نیز گردد، همان‌طور که وقتی می‌خواهیم ماسه‌های ساحل را در ارتفاع بلندتری کپه کنیم بیش‌تر آن فرو می‌ریزد.

---

1 - Platonic solids

گفته می‌شود که اهرام اولیه از توسعه مصطبه‌ها شروع شده‌اند، و این مصطبه‌ها آرامگاه‌های نسبتاً کوتاه و مستطیل شکلی بودند که دیواره‌های آجری شیبداری داشتند. ایمهوتپ[۱] ، اولین معماری که نام وی در تاریخ آمده است، ۳۱۰۰ سال قبل از میلاد به دستور زوسر[۲] ، فرعون مصر از سومین سلسلهٔ فراعنه، مأمور ساختن مقبره‌ای برای او گردید، و ایمهوتپ برای این کار تصمیم گرفت مصطبه‌های اولین سلسلهٔ فراعنه را توسعه دهد. وی ابتدا طرح مصطبه‌های قدیمی را اختیار کرد و سطوح آن را با سنگ پوشاند، سپس روی آن طبقه طبقه قطعات سنگی گذاشت تا به‌صورت هرم پله‌ای در آمد. احتمالاً ایمهوتپ با افزودن مرحله‌ای لایه‌های سنگ و حصول اعتماد بیش‌تر، به‌تدریج هرم فرعون زوسر را بزرگ‌تر کرده است.

پس از کامیابی ایمهوتپ در بالا بردن هرم پله‌ای، دیگران می‌توانسته‌اند بدون نگرانی از شکست، آن را تقلید کنند. اما طراحان بعدی که ظاهراً چندان رغبتی به هرم پله‌ای نداشته‌اند، تغییراتی در طرح ایمهوتپ دادند و قسمت‌های پله‌ای آن را پر کردند و اهرام کنونی مصر با یال‌های مستقیم و سطوح جانبی صاف پدیدار شد. موفقیت هرم میدوم[۳] که سطوح جانبی آن شیب تیزتری نسبت به اهرام قبلی داشت، طراحان بعدی را به تغییرات دیگری راغب کرد. آن‌ها سعی کردند این تغییر را در هرمی که در داشور[٤] ساخته می‌شد اعمال کنند، و سطوح جانبی این هرم با زاویهٔ ۵۴ درجه که تا آن زمان کار نشده بود آغاز گردید. لیکن ظاهراً در هنگام عملیات ساختمانی اتفاقی افتاده است که باعث تغییر

---

۱ - Imhotep ، (ح ۳۱۰۰ ق م)، طبیب و معمار مصر باستان

2 - Zoser

3 - Meidum pyramid

٤ - Dahshur ، شهری در مصر

طرح اصلی شده است. زیرا در هرم داشور تقریباً از وسط آن به بالا فقط جنس سنگ به کار برده‌شده بلکه شیب سطوح جانبی آن نیز تغیر داده شده است. شیب دیواره‌ها از ۵۴ به ۴۳ درجه کاهش یافته است، به‌سبب همین شکل سازه‌ای آن را هرم شکسته[1] می‌نامند. طبق یك نظریه شکستگی داده‌شده به هرم شکسته به این دلیل می‌باشد که هنگام ساخت آن با شیبی که تا آن زمان اجرا نشده بوده است، شکستی سازه‌ای اتفاق افتاده است و طراحان آن را وادار ساخته تا در بلندپروازی‌های خود تجدیدنظر کنند. توجیهی که بر مبنای وجود توده‌های زیادی از مصالح شکسته‌شده در اطراف هرم ارائه شده است، توجه آدمی را به این نمونه قدیمی از طراحی سازه‌ای که در نتیجهٔ جسارت جاه‌طلبانه به حد شکست رسیده است جلب می‌کند. چنین به‌نظر می‌رسد که سازندگان هرم‌های بعدی، که هرم‌های مرتفع‌تری ساخته‌اند ولی جرأت ساختن هرم‌های تیزتر را نکرده‌اند، به موفقیت‌های کوچك‌تر بسنده کرده‌اند.

سازندگان اهرام مصر تنها کسانی نیستند که خواست آنان برای انجام کاری که قبلاً انجام نشده است با محدودیت‌های سازه‌ها تقابل پیدا کرده است. کلیساهای جامع قرون وسطی به‌طور یقین از نظر سازه‌ای بسیار بغرنج‌تر از اهرام بوده‌اند، با این وجود شواهد زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد ساختمان کلیساها نیز بر اساس تجربیات و سعی و خطاهایی نه‌چندان بی‌شباهت به مورد اهرام مصر تکامل پیدا کرده است. حتی شخص غیرمتخصصی چون هنری آدامز[2] در کتاب خود راجع به کلیساهای جامع فرانسه، اشاره کرده است که چگونه معمارانی که در اواخر قرن دوازدهم و اوایل قرن سیزدهم مشغول ساختن کلیساهایی به

---

1 - Bent pyramid

۲ - Henry Adams ، (۱۹۱۸-۱۸۳۸م)، مورخ آمریکایی

فواصل هفتاد یا هشتاد کیلومتری حومهٔ پاریس بودند، می‌بایستی " تقریباً به‌طور روزانه " کارها و تجربیات یکدیگر را بررسی کرده و تأثیر پذیرفته باشند. موفقیت‌ها و شکست‌های سازه‌ای و معماری سازندگان آموزندهٔ درس‌ها و برانگیزانندهٔ دیگران بوده است.

کلیسای جامع بووی[1] در سال ۱۲۸۴ دچار خرابی بزرگی شد، و این حادثه باعث چرخش و تغییر مهمی در روند توسعهٔ سازه‌های گوتیك بوده است. چنین به‌نظر می‌رسد از آن پس معماران در کارهای سازه‌ای خود محافظه‌کارتر شده باشند، گرچه که منتقدان خبره اعتقاد دارند نوآوری‌ها و بلندپروازی‌های سازه‌ای در قرن چهاردهم تجدید حیات کرده است. رابرت مارك[2] ، که به‌منظور آنالیز نیروهای وارد بر کلیساهای گوتیك از مدل‌های مهندسی مدرن استفاده کرده است، به عنوان مثال، ابداعات جدید مهمی را در ارتفاع و لاغری سالن کلیسای جامع پالما[3] ، در جزیره ماجورکا[4] در اسپانیا، ملاحظه کرده است، اگرچه که به اعتراف خود وی این کمال هرگز در حد اعلای شاهکار کلیسای بووی نبوده است.

با این حال ممکن است گفته شود که اهرام و کلیساهای جامع به دوران ماقبل خرد مهندسی سازه تعلق دارند، زیرا که عمدتاً به تجربیات اجرایی و اصلاحات حین ساخت اتکاء داشته‌اند تا به مجموعه‌ای از نقشه‌های معتبر و تغییرناپذیر از قبل طراحی‌شده. قوس‌های اتکاء[5] که از بیرون و برای نگهداری جانبی کلیساهای جامع به کار برده شده‌اند، به

---

۱ - Beauvais ، ناحیه‌ای در شمال غربی پاریس

2 - Robert Mark

۳ - Plama ، ناحیه‌ای بندری در جزیره ماجورکا اسپانیا

٤ - Majorca ، جزیره‌ای در اسپانیا

5 - flying buttress

احتمال بسیار قوی ابتدا بر اثر به‌وجود آمدن ترک‌هایی در این ساختمان‌های بنّایی قرون وسطی اضافه شده و بعدها تکامل پیدا کرده است. حتی چنین به‌نظر می‌رسد که اضافه کردن برج نوک تیز[1] ظاهراً تزیینی در بالای این ساختمان‌ها به‌دلیل یك نیاز فنی بوده است تا از باز شدن ترك‌های ناشی از نیروی بسیار زیاد باد که به این کلیساهای جامع عظیم‌الجثه و مرتفع وارد می‌شود، مخصوصاً در زمان‌های قدیم که ارتفاع ساختمان‌های همجوار بسیار کوتاه‌تر بوده است، جلوگیری کند.

سازه‌های عظیم و شکوهمند قرن نوزدهم و بیستم، پل‌ها و آسمانخراش‌های فلزی و بتنی هستند که دارای آنچنان رعنایی و ارزش سازه‌ای می‌باشند که سازندگان بناهای سنگی هرگز نمی‌توانسته‌اند تصورش را بکنند. استحکام فولاد باعث افزوده شدن بعد جدیدی به عنوان قدرت کشش در سازه‌ها گردیده، و آن را از تسلط همه جانبهٔ قدرت فشاری به‌عنوان عامل پایداری رها کرد، تقریباً مثل اینکه از نیروی کشش ثقل کاسته باشد، لیکن آمار بی‌شمار پل‌های فلزی قرن نوزدهم که دچار شکست شدند مانع از غرور و نخوت مهندسان جدید در بارهٔ توانایی خود در ساختن سازه‌های عظیم گردید. به‌راستی، مشکلات دیرینهٔ پل‌های فلزی، که با توسعهٔ راه‌آهن نیز بیش‌تر گردید، تا امروز مفصل‌ترین مباحث و شرح وقایع را در تاریخچهٔ مهندسی سازه تشکیل می‌دهد.

توسعهٔ گستردهٔ راه‌آهن در قرن نوزدهم، انسان معمار را به چالش جدیدی واداشت. اهرام در واقع تودهٔ انباشته‌ای از سنگ بود، و تنها فضایی که سنگ‌ها بایستی دهانه آن را پوشش دهند راهروهای باریك پرپیچ و خمی بودند که به دخمهٔ آرامگاه منتهی می‌شد که آن هم از نظر اندازه

---

1 - pinnacle

چندان بزرگ‌تر از اتاق خواب‌های امروزی نبود. از طرف دیگر، در کلیساهای جامع، همانند بناهای عظیم گنبدی شکل روم باستان، سعی شده است مرتفع کردن بنا نه از طریق حجیم و تنومند کردن آن بلکه با ظرافت و ایجاد فضای باز انجام شود. برای معماران این بناهای تاریخی و یادمانی، مسائل اقتصادی و تولید انبوه اهمیت ویژه‌ای نداشته است، در حالی که این واقعیت‌های خشن در روند تکامل پل‌ها از عوامل اصلی بوده است. البته این بدان معنی نیست که موفقیت یك پل فلزی کم‌تر از موفقیت یك بنای کلیسای گوتیك مورد توجه بوده است. در واقع، به‌دلیل مسائل مالی، شرکت‌های راه‌آهن حتی کم‌تر از متولیان کلیساهای جامع، که انگیزه‌های آنان فراتر از سود و زیان مالی است، حاضر به تقبل ریسك شکست‌های سازه‌ای بوده‌اند. با این حال باز هم می‌توان ادعا کرد شرکت‌های راه‌آهن ناچاراً جسورانه‌تر عمل می‌کرده‌اند، زیرا آن‌ها مجبور بودند هر پل را در شرایط مطلقاً متفاوت و جدیدی برپا سازند، و شبیه‌سازی محض نمونه‌ای که آزمون زمان را با موفقیت پشت سر گذاشته است همواره امکان‌پذیر نبوده است.

همراه با توسعهٔ راه‌آهن، نیازهای جدیدی در سازه‌های مهندسی پدیدار شد. پل‌های راه‌آهن نه فقط بایستی وزن خالص لکوموتیوهای سنگین و دیگر واگن‌ها را تحمل کنند، بلکه می‌بایستی نیروی دینامیکی ناشی از موتورهای رفت و برگشتی و تغییر مداوم موقعیت قطار در روی پل را نیز تحمل کنند. راه‌آهن، ماشین‌های مهندس مکانیك و سازه‌های ایستای مهندس ساختمان را یك جا گرد آورد، و نیازهای هرکدام آن‌ها باعث ایجاد انگیزه‌ای برای تکامل دیگری شد ــ که البته خالی از رویدادهای ناگوار هم نبود. با توسعهٔ روزافزون خطوط راه‌آهن به دوردست‌ها برای ارائه خدمات، تقاضاهای بیش‌تری برای قطارهایی سنگین‌تر و با سرعت‌های بیش‌تر و در مسیرهای مشکل‌تر ایجاد می‌گردید.

هر تپه‌ای که قطار ناچار به بالا رفتن از آن نمی‌شد یا هر دره‌ای که قطار ناچار نبود به درون آن برود، صرفه‌جویی در وقت و انرژی بود، و این به مفهوم هزینهٔ کم‌تر بود. لیکن به‌زودی، هنگامی که مقاومت پل‌های راه‌آهن که برای نسل‌های اولیهٔ لکوموتیوها ساخته شده بود کفایت لکوموتیوهای نسل‌های بعدی را نکرد، خرابی‌های پل‌ها شروع شد. هر پل آسیب‌دیده‌ای بیانگر نیاز به افزایش مقاومت پل مشابه بعدی بود، و بدین گونه پل‌های راه‌آهن به‌طریق جبرانی سعی و خطا تکامل پیدا کرد. همان‌طور که رالف والدو امرسون[۱] در مقاله‌ای در بارهٔ جبران کارها اشاره کرده است، " هر فزون‌خواهی سبب زیان می‌شود، و هر زیانی سبب فزون‌خواهی. "

در قرن نوزدهم به‌تدریج آگاهی تکنولوژیکی به‌وجود آمده بود و قطارهای راه‌آهن و تأسیسات آن به‌عنوان جزئی از دنیای متحول مقبول می‌افتاد. به‌همین علت است که ویلیام وردزورث[۲] ، شاعری که ستایشگر طبیعت بود، با ورود فرهنگ جدیدی به میان فرهنگی قدیمی‌تر و روحانی‌تر به جدال برخاست. انقلاب صنعتی در حال تغییر دادن سیمای کشور انگلستان بود، و وردزورث در یکی از اشعار خود مردم را ترغیب می‌کند تا نسبت به آنچه که وی آن را خراب کردن محیط طبیعی لیك دیستریکت[۳] می‌داند، اعلام انزجار کنند:

می‌شنوید زوزه‌اش را ؟ آن قطار گیس بلند را
که گذر می‌کند، آیا نمی‌آلاید منظر دیدگانتان را ؟

۱- Ralph Valdo Emerson ، (۱۸۸۲-۱۸۰۳م)، مقاله‌نویس و شاعر آمریکایی

۲- William Wordsworth ، (۱۸۵۰-۱۷۷۰م)، شاعر انگلیسی

۳- Lake District ، ناحیه‌ای در شمال غربی انگلستان که دارای دریاچه‌ها و بلندی‌های بسیاری است.

بلی، باید هم که شوکه بشوید، ــ آن‌گاه که مقایسه می‌کنید،
آنچه را که از دست داده‌اید و آنچه را که وعده‌اش را داده‌اند،
ای کوه‌ها و دره‌ها و رودها، بشنوید این ندا را
و در اندوه این تحقیر ناروا با ما هم‌صدا شوید.

ولی این انزجار در شعر دیگری، به نام " کشتی‌های بخار و پل‌ها و راه‌آهن "، تخفیف پیـــدا می‌کند، آنجا که وردزورث اذعان می‌کنـــد تکنولوژی مظهری است از طبیعتی باشکوه‌تر:

با وجود آن همه زیبایی‌ها که از دست می‌رود
در برابر آن چهره‌های خشمگین شما، طبیعت در آغوشش می‌گیرد
این فرزند عزیزش را که زادهٔ صنعت بشری است ، و زمان،
از پیروزی شما بر برادرش مکان، خرسند است،
تاجی از امید و آرزو را از دستان پینه بستهٔ شما می‌پذیرد
و بر شما با مهری آسمانی لبخند می‌زند.

دلسردی و تمایل صادقانهٔ وردزورث در سرگردانی بین طبیعت تغییر یافته و طبیعت تغییرنیافته، واکنش شاعر نسبت به کار مهندسان در وارد کردن تغییراتی در طبیعت موجود بوده است. وردزورث در چاپ بعدی این شعر، در خط آخر عبارت نسبتاً سرد " بر شما لبخند می‌زند " را با عبارت صمیمانه‌تر " بر شما خوش‌آمد می‌گوید " عوض کرد. احساس وی نیز همانند پل‌های مهندسان قرن نوزدهم دستخوش اصلاح بود. اما شکست‌های متعدد پل‌ها مانع از آن بود که وردزورث یا معاصرین وی به‌سادگی پذیرای تکنولوژی جدید شوند. آن‌ها همگی کاملاً از تلاش‌ها و لغزش‌هایی که نه فقط در انگلستان بلکه در آمریکا نیز صورت می‌گرفت آگاهی داشتند.

ناتانیل هاثرن[1] در سال ۱۸۴۳ با اقتباس از کتاب سفر زائران[2] جان بانیان[3] مشتمل بر حکایاتی مذهبی از زیارت مردان خدا در سیر زندگی، داستان‌هایی متناسب با دوران انقلاب صنعتی منتشر کرد. در داستان " راه‌آهن آسمانی "[4] مسافری به‌همراه راهنمایی به نام آقای جاده صاف‌کن از شهر تباهی عازم شهر آسمانی می‌شود. راهنما به وی توضیح می‌دهد که تکنولوژی جدید شرایط زندگی انسان را که مدت‌های طولانی از اصلاح و تغییر گریزان بوده است بهبود خواهد بخشید. اما چنین به‌نظر می‌رسد که مسافر همچنان از شرایط پل‌هایی که از روی آن عبور می‌کنند پریشان‌خاطر است. یکی از پل‌ها، گرچه " ساخت برازنده‌ای " داشت، اما به‌نظر وی " نحیف‌تر از آن بود که بتواند وزن زیادی را تحمل کند " . و پل دیگر " به‌طرز سهمگینی ارتعاش داشت و بالا و پایین می‌رفت، " به‌طوری که مسافر " با وجود گواهی آقای جاده صاف‌کن در بارهٔ استحکام آن، هنگام عبور از روی پل، مخصوصاً به‌همراه انبوه مسافرانی که هرکدام بار و بنهٔ سنگینی داشتند، وحشت کرده بود. " با رسیدن به همت تپه، ترس شکست سازه‌ای همچنان بر ذهن این شخصیت افسانه‌ای سایه افکنده است:

> در میان اعماق دل این کوه سنگی، تونلی با معماری شکوهمند ساخته شده بود که قوسی رفیع و فضایی کافی برای عبور دو خط داشت، چنان با ابهت بود که به‌نظر می‌آمد به‌صورت یادبودی

۱- Nathaniel Hawthorne ، (۱۸۶٤-۱۸۰٤م)، داستان نویس آمریکایی

2 - *The Pilgrim's Progress*

۳- John Bunyan ، (۱۶۸۸-۱۶۲۸م)، واعظ و مؤلف انگلیسی

4 - The Celestial Railroad

جاودانی از مهارت و تهور سازنده استوار باقی بماند، مگر آنکه زمین و زمان آن را در هم فرو ریزد. در حین ساختن آن از امتیاز ضمنی بسیار ارزشمندی نیز بهره جسته بودند، و از مصالحی که از دل همت تپه بیرون آمده بود برای پر کردن درهٔ مصائب استفاده کرده بودند، و بدین ترتیب هنگام عبور دیگر لزومی نداشت به داخل این گودال ناگوار سرازیر شوند. الحق که پیشرفت خارق‌العاده‌ای بود.

دوگانگی و سرگردانی خاصی که توسط نویسندگانی چون وردزورث و هاثرن بیان می‌شد به نشریات آن زمان نیز راه یافته بود. از طرفی، ثمره‌های شیرین انقلاب صنعتی در نشریاتی مثل ایلاستریتد لندن نیوز[1] و هارپرز[2] همچون گل‌هایی شاداب به مردم ارائه می‌شد تا از آن لذت ببرند. و از طرف دیگر، هارپرز حوادثی را که اتفاق می‌افتاد گزارش می‌کرد، و پانچ[3] راه‌آهن را مسخره کرده و دست می‌انداخت. راه‌آهن و پل در آن زمان، همانند هواپیما در یك قرن بعد، اذهان عموم مردم را با امیال و اوهام آمیخته کرده بود. این پیشرفت‌های تکنولوژیکی برای همه بود و مختص شاهان و خدایگان نبود، وعدهٔ آنان برای راه‌هایی دلنشین‌تر به‌سوی شهر آسمانی مزیت‌هایی در بر داشت که خطرات حوادث آن را پذیرفتنی می‌کرد. علی‌رغم همهٔ استهزاء هاثرن، قهرمان داستان وی داوطلب می‌شود که " برای ارضاء حس کنجکاوی خود " مسیر راه‌آهن آسمانی را بپیماید.

---

1 - *Illustrated London News*
2 - *Harper's Weekly*
3 - *Punch*

طبق مستندات فرهنگ انگلیسی آکسفورد[1] کلمهٔ engineer[2] تا بیش از یکصد سال پیش به کسی که تدبیر و طراحی و ابداع می‌کند اطلاق می‌شده است، تا اینکه اخیراً به معنی کسی که ماشین و موتور را اداره می‌کند نیز به‌کار برده می‌شود. این معنی دوم از سال ۱۸۳۹ به‌کار برده شد، یعنی از سالی که راه‌آهن به‌عنوان سمبل با عظمت انقلاب صنعتی پدیدار شد، و چندان هم عجیب نیست که مغالطهٔ لفظی بین مفاهیم طراح این وسیله و رانندهٔ آن به‌وجود آمده باشد. در آن زمان مهندسان ماشین‌های بخار و مهندسان پل‌های فلزی برای انجام کارهای خود در جایگاه راننده مستقر می‌شدند. در حالی که این پیشتازان مکانیك و سازه عزم رساندن راه‌آهن به فراسوی محدوده‌های تکنولوژی را داشتند، چنین به‌نظر می‌رسید که اینان در راه‌آهن آسمانی در حال کنترل کردن سرعت و رساندن مسافران به مقصد هستند. گرچه هاثرن در ضمیر خود تردیدهایی نسبت به وعده‌های راه‌آهن داشت که بتواند در خشکاندن باتلاق دلسردی‌ها، که از دیرزمان در برابر این تلاش‌ها مقاومت می‌کرد، موفق گردد، با این حال آقای جاده صاف‌کن به " پل آسایش " اشاره می‌کند و چنین توضیح می‌دهد:

> ما با انداختن کوهی از کتاب‌های اخلاقیات و فلسفه و حکایات و مواعظ و مقالات مذهبی و چکیده‌هایی از افلاطون[3] و کنفسیوس[4] و حکمای هند به همراه تفسیرهای بخردانه‌ای از متون

---

1 *Oxford English Dictionary*

۲ ـ کلمه engineer در زبان انگلیسی عمدتا به دو مفهوم کسی که در یکی از رشته‌های مهندسی تخصص داشته باشد و کسی که به اداره کردن و راهبری یا نظارت موتورها و ادوات فنی می‌پردازد به‌کار برده می‌شود.

۳ ـ Plato ، (۳٤۷- ؟ ٤۲۷ق م)، فیلسوف یونانی

٤ ـ Confucius ، (ح ٤۷۹-۵۵۱ ق م)، فیلسوف چینی

مذهبی، به درون این باتلاق، توانسته‌ایم همگی آن‌ها را از طریق نوعی فرآیند علمی به توده‌ای همچون گرانیت تبدیل کرده و پایهٔ محکمی برای پل مهیا کنیم. همهٔ این باتلاق را می‌توان با چنین ماده‌ای خشکاند.

بدین ترتیب از زمانی در حدود اواسط قرن بیستم، و با تغییر کار مهندسان از تأملات مرسوم به محاسبات دشوار، به‌تدریج کار مهندسی حتی از دید افراد غیر اهل فن درگیر " نوعی فرآیند علمی " شده است. از زمانی که مهندسی شروع به استفاده از روش‌های علمی در مسایل سازه‌ای کرد، به‌تدریج از ملاحظات زیبایی‌شناسی محض دور شده و از معماری جدا شد. بنیان مباحثات این دو کاشته، همچون ریشه‌هایی در تمام جهات در عهد ملکه ویکتوریا گسترده شد، و به‌طور متناوب همانند گل‌های قاصدك در میان چمنزار بهاری از اینجا و آنجا سر بر آورد. با این حال، مسألهٔ اینکه چه چیزی فرع است و سبزه و چه چیزی گل است و جوهر، هنوز هم به همان مشکلی یك مسألهٔ علم طبقه‌بندی گیاهان در دوران وردزورث باقی مانده است.

وقتی که مهندسی به‌صورت به‌کار بردن روش‌های علمی در پل‌های راه‌آهن و دیگر سازه‌های عظیم درآمد، دست‌اندرکاران این حرفه می‌بایستی بتوانند مسألهٔ شکست سازه‌ای و موفقیت سازه‌ای را با وضوح و صراحت بیش‌تری تبیین کنند. شکست‌های اهرام و کلیساهای جامع عمدتاً شکست‌هایی بودند که در حین ساخت اتفاق می‌افتادند، و نه در حین استفاده از آن‌ها پس از اتمام عملیات ساختمانی. اما شکست پل راه‌آهن نه فقط می‌توانست برای کارگران ساختمانی که درگیر یك کار پرخطر بودند فاجعه‌بار باشد، بلکه جان انسان‌های بی‌گناهی را نیز که ایمنی خود را به دست مهندسان سپرده بودند به خطر بیاندازد. خرابی‌های ناگهانی و

مصیبت‌بار پل، جزئی از زندگی روزمره شده بود، و پرداختن به این مشکلات می‌بایستی نه از طریق روش مرسوم سعی و خطا، بلکه از طریق روش جدیدتر و انتزاعی‌تری صورت می‌گرفت، که ابزار آن به‌جای سنگ و قلم‌تراش، کاغذ و قلم مداد باشد. مهندسان قرن نوزدهم، به‌جای سعی و خطا بر روی مصالح، سعی و خطا در ذهن را پرورش و توسعه داده و تحویل مهندسان قرن بیستم دادند. آن‌ها یاد گرفتند که برای جلوگیری از شکست مصالح سازه‌ای چگونه محاسبه کنند، اما نمی‌دانستند که برای جلوگیری از قصور ذهن چه بکنند.

هیچ‌کس تمایلی به یادگیری و پیشرفت از طریق کارهای اشتباه ندارد، لیکن آموخته‌های ما از موفقیت‌ها، برای رسیدن به مقاصدی در فراسوی محدوده‌های فعلی هر حرفه کافی نمی‌باشد. علی‌رغم اینکه مهندسان به‌عنوان روشنفکرانی محافظه‌کار شهرت یافته‌اند، آنان به‌راستی از شخصیت‌های پیشرو و بانیان کارهای جدید به‌شمار می‌روند. همواره در جستجوی یافتن راه‌ها و به‌کار بردن روش‌هایی هستند تا وزن سازه‌ها و در نتیجه هزینهٔ آن را کاهش بدهند، و همواره در تلاش هستند که از کم‌ترین چیز بیش‌ترین بهره را بیابند تا در سازهٔ مورد نظر استفادهٔ بهینه‌ای از مصالح بشود. مهندسان همواره گمان می‌کنند در تلاش انجام کاری بدون خطا هستند، اما واقعیت موضوع آن است که هر سازهٔ جدید آزمون جدیدی به‌شمار می‌رود. همان‌طور که کار شاعران و نویسندگان در معرض شکست‌ها و موفقیت‌ها است، اصولاً نه فقط ماهیت علم و مهندسی بلکه ماهیت همهٔ فعالیت‌های انسانی چنین است.

٦

طراحی،
عزیمت از نقطه‌ای به نقطه‌ای

طراحی پل یا هر سازهٔ بزرگ دیگر چندان بی‌شباهت به برنامه‌ریزی برای رفتن به مسافرت یا تعطیلات نیست. هدف نهایی کاملاً مشخص و معلوم است: رفتن از این محل به آن محل. ولی نحوهٔ رفتن به تدابیر و تصورات ما بستگی دارد.

فرض کنید که در شیکاگو زندگی می‌کنیم و به بچه‌ها قول داده‌ایم آن‌ها را در دو هفته تعطیلات تابستان به نیویورك ببریم. یکی از اولین تصمیماتی که باید گرفته شود وسیلهٔ رفت و برگشت است، که در همان ابتدا می‌توان آن را به سه یا چهار مورد محدود کرد. ما می‌توانیم با اتومبیل شخصی خودمان به مسافرت برویم یا اینکه از اتوبوس یا قطار یا هواپیما استفاده کنیم. برای مسافرت‌های خانوادگی معمولاً راه‌هایی مانند استفاده از بالن یا دوچرخه‌سواری یا قایقرانی مطرح نیست، مگر برای کسانی که علاقه زیادی به بالن‌سواری یا دوچرخه‌سواری یا قایقرانی دارند و وسیلهٔ مسافرت برای آن‌ها اهمیت بیش‌تری‌از خود مقصد مسافرت دارد.

بسیاری از خانواده‌ها یکی از دو راه اتومبیل شخصی یا هواپیما را انتخاب می‌کنند، و این انتخاب به عواملی چون ملاحظات اقتصادی

(استفاده از اتومبیل شخصی برای خانواده‌های پرجمعیت ارزان‌تر تمام خواهد شد)، و راحتی سفر (استفاده از اتومبیل شخصی آزادی بیش‌تری در برنامه‌ریزی سفر می‌دهد و امکان سیر و سیاحت در مسیر و در حومهٔ نیویورك را هم میسر می‌کند)، و لذت سفر (با اتومبیل شخصی می‌توان از دیدن مناظر طول مسیر لذت برد)، و هیجان‌زدگی (سفر با هواپیما بعضی‌ها را بیش‌تر از سفر با اتومبیل دچار اضطراب می‌کند)، و یا حتی عادت (بعضی‌ها همواره عادت به مسافرت با اتومبیل دارند) دارد. بعضی خانواده‌ها نیز با توجه به عواملی از قبیل ارزان بودن نرخ هواپیما در مقایسه با عوارض بزرگراه‌ها و هزینهٔ بنزین و دردسرهایی که داشتن اتومبیل در شهری مثل نیویورك دارد و علاقهٔ آن‌ها به دیدن ابرها و مناظر از هواپیما و ایمنی بیش‌تر مسافرت با هواپیما در مقایسه با مسافرت با اتومبیل شخصی و عادت همیشگی آن‌ها برای مسافرت با هواپیما، استفاده از هواپیما را انتخاب خواهند کرد.

بعد از اینکه تصمیم اصلی گرفته شد، هنوز موارد بی‌شمار کوچك‌تری وجود دارد که بایستی در مورد آن‌ها نیز تصمیم‌گیری شود. چه ساعتی حرکت کنند؟ اگر با اتومبیل شخصی می‌روند، از کدام راه بروند؟ آیا یك‌راست تا نیویورك رانندگی کنند یا اینکه شب را در جایی توقف کنند؟ در کجا توقف کنند؟ در کدام هتل اقامت کنند؟ کجا غذا بخورند؟ اگر با هواپیما مسافرت می‌کنند، چطوری به فرودگاه بروند؟ با کدام شرکت هواپیمایی پرواز کنند؟ در کدام فرودگاه نیویورك به زمین خواهند نشست؟ از فرودگاه نیویورك چطوری به هتل بروند؟ به کدام هتل بروند؟

تعداد انتخاب‌ها بی‌شمار به‌نظر می‌آید. بسیاری از این انتخاب‌ها با توجه به هدف اصلی که گذراندن دو هفته تعطیلات در نیویورك است چندان تفاوتی ندارند، و بنابراین ارزش ندارد که بیش از اندازه روی

آن‌ها صحبت شود. اما تصمیماتی از قبیل اقامت در یك هتل ارزان قیمت در نیوجرسی و آمدن هر روزه از آن جا به نیویورك و یا اقامت در هتلی در نیویورك و در محلی که با پای پیاده بتوان به جاهای مورد نظر رفت، تأثیر مهمی در نحوهٔ گذراندن تعطیلات و گردش خواهد داشت.

کلیهٔ تصمیماتی را که در مورد نحوهٔ گذراندن تعطیلات در نیویورك گرفته می‌شود می‌توان به‌صورت تلاش‌هایی برای به حداکثر رساندن خوشی و لذت هر خانواده از مسافرت خود تعبیر کرد. هر خانواده برای اتخاذ تصمیم در هر مورد، به‌جای ترجیح دادن این راه‌حل در مقایسه با آن راه‌حل، می‌تواند از روش مشخص‌کردن آنچه که نبایستی بشود و یا آن‌ها آن را دوست ندارند، استفاده کند. مثلاً یك خانوادهٔ پرجمعیت می‌تواند مسافرت با هواپیما را به دلایلی از قبیل گران تمام شدن و محروم شدن از داشتن وسیلهٔ نقلیهٔ شخصی در نیویورك و عدم امکان لذت بردن از مناظر دیدنی طول مسیر و اضطراب ناشی از پرواز رد بکند. همچنین، این خانواده عملاً می‌تواند با رعایت ملاحظاتی از قبیل نرفتن به فلان رستوران که دفعهٔ قبل غذاهای آن موجب ناراحتی آن‌ها شده بود، و منتظر نشدن در صف‌های طویل میدان تایمز برای خرید بلیط تأتر، و عدم استفاده از اتومبیل شخصی در ساعات شلوغی مرکز شهر، موفقیت تعطیلات خود را بیش‌تر تضمین کند. به‌طور خلاصه، این خانواده می‌تواند با پیش‌بینی آنچه که می‌تواند به مسافرت آن‌ها لطمه وارد سازد موفقیت مسافرت را بیش‌تر کند.

طراحی مهندسی نیز چندان متفاوت نیست. بسیاری از طراحی‌ها زیاد مرموزتر و پیچیده‌تر از موضوع مسافرت دو هفته‌ای به نیویورك نیست. حتی اگر شما و خانواده‌تان قبلاً به چنین مسافرتی نرفته باشید، افراد زیادی هستند که می‌توانند اطلاعات و نصایحی در خصوص آنچه که باید بکنید و آنچه که باید از آن پرهیز کنید در اختیار شما بگذارند.

کتاب‌هایی در بارهٔ شهر نیویورك و دیگر شهرها و اطلاعاتی از قبیل موزه‌ها و رستوران‌ها و مراکز خرید آن‌ها وجود دارد. در روزنامه و مجلات نیز می‌توان چیزهایی در خصوص تجارب مسافرت و جاهای دیدنی یافت. و از طریق تلفن نیز می‌توان اطلاعاتی در خصوص محل و قیمت هتل‌ها و تاُتر و رستوران کسب کرد. به‌طور خلاصه، تجربیات و اطلاعات ارزشمند فراوانی در این مورد برای طالبان آن وجود دارد. حتی شاید در میان دوستان و همسایهٔ آن‌ها کسی باشد که تجربیاتی در بارهٔ نکات منفی بازدید از نیویورك از قبیل شلوغی و ازدحام و شیادان و جیب‌برها و تبهکاران داشته باشد. کم‌ترین خطر مواجه شدن با چنین مسائلی می‌تواند همهٔ خوشی‌ها و لذت‌های آن مسافرت را از بین ببرد و لذا بایستی در محاسبات و تصمیم‌گیری مورد نظر قرار بگیرد.

مهندسی هم که پل جدیدی برای بزرگراه طراحی می‌کند، به اطلاعات تجربی ارزشمندی دسترسی دارد. همگی ما هر چند وقت یکبار از زیر یا از روی ده‌ها و صدها پل موجود در راه‌ها عبور می‌کنیم، و گرچه که هنوز هم بعضاً تعدادی پل‌های چوبی وجود دارد ولی عمدتاً تصور ما از آن‌ها پل‌هایی فلزی و بتنی است. بسیاری از پل‌ها آن‌قدر به یکدیگر شباهت دارند که پس از مدتی همان‌قدر توجه عابرین را به‌خود جلب می‌کنند که درختان کنار جاده. ولی گه‌گاهی به پلی برخورد می‌کنیم که وجه تمایز خاصی دارد، مثلاً پلی بسیار مرتفع یا پلی قوسی[1] و پیچ‌دار که روی مسیل عمیقی ساخته شده و یا پل عظیم معلقی[2] بر روی رودخانه‌ای عریض و یا پل جدیدی از نوع کابل ایستا[3] که بر روی رود بزرگی زده شده است. وجه تمایز خاص بعضی از پل‌ها نیز طوری

---

1 - arch bridge
2 - suspension bridge
3 - cable-stayed bridge

است که غالباً برای عابر عادی قابل تشخیص نبوده، و فقط گاه‌گاهی آن هم پس از فاجعهٔ فرو ریختن بعضی از آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. در بعضی از مواقع این اشتباهات فاحش منجر به شکست وقتی به‌وجود می‌آید که طراح پل قصد انجام کاری را داشته است که قبلاً مشابه آن انجام نشده بوده است، چیزی شبیه به آنکه کسی بخواهد دست به سفر بسیار عجیب و غریبی بزند که انجام ترتیبات آن از عهدهٔ آژانس‌های مسافرتی موجود برنیاید. به استقبال طرح‌های خارق‌العاده و عجیب رفتن به معنی ماجراجویی است و برای اطمینان از سلامت خود و رسیدن به نتیجهٔ مطلوب لازم خواهد بود که کلیهٔ عواملی که احتمالاً می‌توانند باعث خراب شدن طرح شوند شناسایی و پیش‌بینی گردند. و البته همان‌گونه که اولین سفر فضانوردان به کرهٔ ماه ثابت کرد، رفتن به جاهایی که تجربهٔ قبلی از آن‌ها وجود ندارد الزاماً از قبل محکوم به شکست نیست.

سیر صعودی پیشرفت فن پل‌سازی از تکه چوبی که توسط آدمیان نخستین بر روی نهرها انداخته شد شروع می‌شود، و تاریخچهٔ غرورآمیز آن شامل آباره‌های روم قدیم می‌شود. لیکن پل‌های مدرن نه از الوار و نه از توده‌های سنگی ساخته می‌شوند. این پل‌ها طرح‌های حساب‌شده‌ای از بتن و فولاد برای برآورده ساختن و مطابقت با نیازهای کاربردی و اقتصادی و زیبایی‌طلبی جوامع ما هستند. با توجه به اینکه نیازها و خواسته‌ها به‌طور روزافزونی در حال تغییر و افزایش است ـ در جهت درخواست پل‌های بزرگ‌تر یا زیباتر یا ارزان‌تر ـ طراح، حتی اگر بخواهد، همیشه نمی‌تواند از نمونه‌ای که قبلاً با موفقیت امتحان خود را پس داده است نمونه‌برداری کند. نمونه‌برداری از یك پل قبلی شاید برای بزرگراه معمولی چاره‌ساز باشد، ولی اگر این راه، رودخانهٔ عریض‌تری را قطع کند و یا از روی درهٔ عمیق‌تری عبور کند که قبلاً مشابه آن نبوده

است، بدیهی است که نمی‌توان نمونه‌برداری کرد. در چنین حالتی مورد مشابهی برای نمونه‌برداری وجود ندارد و تجربهٔ موفقی وجود ندارد که بتوان از آن تبعیت کرد. بنابراین تاریخچهٔ پل‌های مدرن در حقیقت تاریخچهٔ پیشرفت و توسعهٔ روش‌های علمی‌تری برای طراحی سازه‌های مهندسی عظیم، فراتر از اهرام و کلیساهای تاریخی و آباره‌های رومی، نیز می‌باشد.

اولین پل فلزی در سال ۱۷۷۹ در کول‌بروکدیل[1] انگلستان و در نزدیکی کارخانهٔ ذوب فلزی که تیرهای قوسی آن را ریختگی کرد نصب گردید. طول پل آهنی[2] صد فوت بود و بر روی رودخانهٔ سورن[3] احداث شده بود که هنوز هم در حال حاضر مورد استفادهٔ عابران پیاده است. شکل و جزئیات طرح این پل تقلیدی از شکل پل‌های قوسی سنگی و چوبی بود. پل آهنی در زمان ساخت خود تجربهٔ متهورانه‌ای از به‌کار بردن مصالح جدید ساختمانی به‌شمار می‌رفت، و این تجربهٔ جدید با توجه به اینکه الگوی طرح و جزئیات سازه‌ای خود را از شکل پل‌های سنگی قوسی گرفته بود در عمل نیز کارکرد موفقی داشت. وقتی کاربرد آهن به‌عنوان مصالح ساختمانی جدید و بادوام در کول بروکدیل به اثبات رسید، تقاضای استفاده از آهن در پل‌های بزرگ‌تر و همچنین نیاز به دانستن بیش‌تر در مورد خواص آن بیش‌تر شد. از آنجا که این مصالح جدید در حالت کشش نیز دارای مقاومت زیادی بود، چیزی که ساختارهای سنگی نداشتند، طرح‌های جدید در جستجوی راه‌های استفاده از این خاصیت ارزشمند برآمدند. چنین وضعیت و خاصیتی در اعضاء جدیدی که به‌کار برده می‌شدند، عامل هشداردهنده‌ای بود که

---

1 - Coalbrookdale
2 - Ironbridge
3 - Severn River

نمی‌توان از تجربیات فراوانی که طی قرون متمادی در بارهٔ کاربرد سنگ به‌دست آمده بود به‌عنوان راهنمایی برای توسعهٔ پل‌های آهنی استفاده کرد، و تعجب‌آور نبود که سازندگان پل‌های آهنی وارد دوره‌ای از انجام کارهایی به‌صورت سعی و خطا شدند تا از تجربیات خود و دیگران بهره جویند.

توسعهٔ خطوط راه‌آهن در قرن نوزدهم مستلزم ساختن پل‌های بسیاری بود، و چوب به‌عنوان یکی از مصالح اصلی در پل‌های قدیمی راه‌آهن به کار برده می‌شد. چوب مصالح شناخته‌شده‌ای بود که معمولاً در نزدیکی محل ساخت نیز در دسترس بود. اما پل‌های چوبی نیازمند مراقبت و نگهداری مستمر بودند تا از عدم پوسیدگی آن‌ها اطمینان حاصل شود، و همچنین این پل‌ها همیشه در معرض خطر آتشی بودند که درون لکوموتیوها بود. جایگزین شدن آهن به‌جای چوب در پل‌ها اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسید، اما این تغییر و جایگزینی به مدت مدیدی در قرن نوزدهم طول کشید، که یکی از علل اصلی آن نه فقط تازگی داشتن پل‌های آهنی بود بلکه غیرقابل اطمینان به‌نظر رسیدن آن‌ها بود. این پل‌های آهنی به تعداد فراوانی فرو می‌ریختند، به‌طوری که هنوز هم مورد بحث قرار می‌گیرند.

در سال ۱۸۴۷ ملکه ویکتوریا[1] هیأتی را مأمور کرد که استفاده از آهن در پل‌ها را بررسی کنند و این هیأت را موظف کرد که " تلاش لازم برای معین کردن اصول و تدوین قوانین مورد نیاز را به‌عمل آورند، به‌طوری که مهندسان و مکانیک‌ها هر کدام در حوزهٔ کاری خود بتوانند از فلز با اطمینان استفاده کنند، و رفتار پل‌های آهنی ساخته‌شده

---

۱ - Alexandrina Victoria ، (۱۹۰۱-۱۸۱۹م)، ملکه بریتانیای کبیر طی سال‌های ۱۹۰۱-۱۸۳۷

در راه‌آهن تحت شرایط مختلف به‌صورت تئوری و تجربی بررسی و نشان داده شود. " در واقع چیزی که در آن زمان داشت اتفاق می‌افتاد، دچار شدن پل‌ها به پدیده‌ای بود که ما امروزه آن را به نام شکست خستگی[1] می‌شناسیم، یعنی فرو ریختن ناگهانی و بدون هیچ نشانهٔ هشدار دهندهٔ قبلی پل در هنگام عبور قطار. گزارش هیأت که در سال ۱۸۴۹ منتشر شد نظریهٔ گمراه‌کننده‌ای در بارهٔ خستگی فلزات را ترویج داد، مبتنی بر اینکه بر اثر ارتعاش پدیدهٔ " تبلور " ایجاد می‌شود، و این تصور نادرست تا قرن بیستم نیز تداوم داشت. با وجود این، گزارش مذکور بدانجا منجر شد که وزارت اقتصاد و بازرگانی انگلستان بعضی از مشخصات الزامی در پل را در رابطه با تنش‌ها فرمول‌بندی کرد، و بدین ترتیب اثر سودمندی بر ایمنی پل‌ها گذاشت، گرچه که توجیه نادرستی از پدیدهٔ خستگی ارائه کرده بود.

تعداد قابل توجهی پل تمام فلزی نیز در دهه ۱۸۴۰ در آمریکا ساخته شد، ولی در سال ۱۸۵۰ که پلی در پنسیلوانیا هنگام عبور قطار شکسته شد، دستور داده شد که تمام پل‌های فلزی راه‌آهن نیویورك و اری[2] با پل‌های چوبی جایگزین گردد. علی‌رغم چنین مسائلی، توسعهٔ این تکنولوژی جدید به کمك طراحان و سازندگان زبدهٔ پل، که نوید مزایای بسیار از نظر کارآیی و هزینه را می‌داد، ادامه یافت و همچنان پل‌های آهنی جدیدی ساخته می‌شد. پل‌های آهنی با وجود خطرات ظاهری آن‌ها به‌تدریج در نیمه دوم قرن نوزدهم بر سازه‌های چوبی تفوق پیدا کرد، بخشی از این برتری به دلیل فراوانی روزافزون آهن و کاهش قیمت آن بود که توانست آن را با چوب، که در بعضی مناطق به

---

1 - fatigue failure

۲ - Erie ، شهری در شمال غربی ایالت پنسیلوانیا در نزدیکی دریاچه اری یکی از پنج دریاچه گریت لیکز

علت کمیابی بسیار گران بود، قابل رقابت سازد.

در اشاره به تاریخچهٔ پل‌ها حتماً بایستی از تعدادی از طرح‌های جاه‌طلبانهٔ بی‌شماری که سرانجام دچار شکست شدند یاد کرد. مشهورترین آن‌ها از قبیل شکست پل تی[۱] در سال ۱۸۷۹ و شکست پل کبك[۲] در سال ۱۹۰۷ و فرو ریختن پل تاکوما[۳] در سال ۱۹۴۰ همیشه مورد اشاره قرار می‌گیرند، ولی شکست تعداد فراوانی از پل‌های بی‌نام و نشان راه‌آهن در قرن نوزدهم همگی به‌صورت گروهی و آماری مورد توجه قرار می‌گیرند. در کتابی که اخیراً چاپ شده بود عنوان شده بود که طی دوره‌ای از هر چهار پل خرپایی یکی دچار خرابی می‌شده است، و این موضوع باعث سرازیر شدن تعداد بسیاری نامه به مجلهٔ تکنولوژی اند کالچر[۴] ، فصل‌نامهٔ بین‌المللی انجمن تاریخ تکنولوژی[۵] ، شد که در خصوص این ادعا به بحث پرداخته و منابع و آمار دیگری را نیز ارائه می‌کردند. این مباحثات خصوصاً که چندین اومانیست را به مجادله بر سر ارقام کشانده بود جالب توجه بود. برای هر مهندس تعداد دقیق پل‌های راه‌آهن که در طی قرن نوزدهم دچار خرابی شدند آنچنان اهمیتی ندارد بلکه واقعیت خود شکست است که دارای اهمیت می‌باشد. خراب شدن حتی یک پل که از مصالح نسبتاً جدیدی ساخته شده و یا دارای طراحی جدیدی است بایستی برای جلب توجه مهندسان و کارفرمایان و ملحوظ کردن آن در تکنولوژی جدید کافی باشد. تکرار خرابی‌های پی‌درپی پل‌های راه‌آهن فقط می‌توانست باعث بدگمانی و سوءظن به صحت

۱- Tay Bridge ، پلی در روی رود تی در شرق اسکاتلند

۲- Quebec Bridge ، پلی در شهر کبک کانادا

۳- Tacoma Bridge ، پلی در بندر تاکوما در غرب واشینگتن

4 - *Technology And Culture*

5 - Society for the History of Technology

فرضیات تکنولوژیکی شده و در میان اهل فن و عامه مردم تردید زیادی نسبت به توسعه صنعت راه‌آهن به‌وجود آورد. و چنان بود که تردیدها در حال افزایش بود.

حادثهٔ خراب شدن پلی در دیکسن[۱] ایالت ایلینویز[۲] ، انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا[۳] را بر آن داشت که کمیته‌ای برای یافتن و تعیین روش‌هایی به‌منظور جلوگیری از چنین حوادثی تأسیس کند. اگرچه که این کمیته دارای نظریات متفاوتی بود، طی گزارشی که در سال ۱۸۷۵ منتشر کرد نه فقط برای پل‌های راه‌آهن بلکه برای پل‌های بزرگراه‌ها نیز توصیه‌هایی ارائه کرد. حادثهٔ خاص دیگری که با خراب شدن پلی خرپایی به طول ۱۵۷ فوت در اشتبیولا[۴] در ایالت اوهایو[۵] در سال ۱۸۷۶ باعث مرگ حدود یکصد نفر شد، مجلهٔ هارپرز را وادار به درج این سؤال کرد که " آیا هیچ راهی برای ساخت ایمن و قابل اعتماد پل‌های آهنی وجود ندارد؟ "

با نزدیك‌تر شدن به اواخر قرن نوزدهم، ظاهراً وضعیت پل‌ها در انگلستان نیز آنچنان که جان تنیل[۶] تصویرگر کتاب آلیس در سرزمین عجایب[۷] ، در ترسیمی خوفناك نشان داده است چندان تفاوتی نداشته است. کاریکاتور وی که با عنوان " در روی پل! " در سال ۱۸۹۱ در مجلهٔ پانچ به چاپ رسید، غول مرگ را نشان می‌دهد که بر روی پلی که تیر آن ترك خورده است سوار شده است. این تصویر با همان عنوان

۱- Dixon ، شهری در شمال غربی ایالت ایلینویز آمریکا
۲- Illinois ، ایالتی در شمال مرکزی آمریکا
3 - American Society of Civil Engineers
٤- Ashtabula ، شهری در شمال شرقی ایالت اوهایو در کنار دریاچه اری
۵- Ohio ، ایالتی در شمال مرکزی آمریکا
٦- Jhon Tenniel ، (۱۹۱٤-۱۸۲۰م)، کاریکاتوریست و تصویرگر انگلیسی
7 - *Alice's Adventures in Wonderland*

در داستانی با نام مستعار نیز مورد استفاده قرار گرفت که، طبق مقدمهٔ داستان، برگردان جدیدی از داستان " رویای میرزا "[1] نوشتهٔ جوزف آدیسون[2] بود (که به سال ۱۷۱۱ در مجلهٔ اسپکتیتور[3] چاپ شده بود). در حکایت آدیسون، راوی داستان که میرزا نام دارد با راهنمایی یك پری به بالای پرتگاهی در درهٔ زمان می‌رود که روی آن پلی زده شده است که شروع خلقت را به انتهای دنیا متصل کرده است و نمادی از حیات انسان است. میرزا مشاهده می‌کند که پل وضعیت خرابی دارد و هر کس که تلاش می‌کند از آن عبور کند به نحوی از آن سقوط می‌کند. میرزا سرگشته و حیران در میان آن سازهٔ عجیب و شگفت‌انگیز مدتی نظاره می‌کند، ولی قلب او آکنده است از " غم و اندوه عمیق از دیدن مردمان بسیار که در عین خوشی و نشاط ناگهان سقوط می‌کنند و برای نجات خویش به هر چیزی دست می‌آویزند. "

آدیسون در خاتمهٔ داستان نتیجه‌ای اخلاقی می‌گیرد، همان‌طور که همتای نویسندهٔ وی در داستان خود در مجلهٔ پانچ نیز چنان می‌کند. در برگردان جدید داستان، راوی که ماتیو نام دارد در فکر " بیهودگی به تعطیلات رفتن انسان‌ها " است، که بر روی کتابچهٔ برنامهٔ حرکت قطارها به خواب می‌رود. وی در خواب می‌بیند که با همراهی یك پری به بالای قلهٔ " دره مسافرت " رفته است که " شبکه سراسری راه‌آهن بزرگ " از روی آن عبور می‌کند و دو انتهای آن در ابر مه‌آلود " انحصار و هرج و مرج " گم گشته است. پری توجه میرزای قرن نوزدهم را به پلی آهنی جلب می‌کند که ماتیو آن را چنین توصیف می‌کند:

---

1 - The Vision of Mirzah

۲ - Joseph Addison ، (۱۷۱۹-۱۶۷۲م)، مقاله نویس و شاعر انگلیسی

3 - *Spectator*

پل خیلی لرزان و نااستوار به‌نظر می‌آمد، و همچنین شکاف یا ترك بزرگی به شکل نامنظم در آن وجود داشت، اسکلت پل با هر حرکت به این سو و آن سو تکان می‌خورد. همان‌طور که مشغول تماشای این چیز بدیمن بودم، پری برایم توضیح داد که این پل ابتدا سالم بوده و بر اساس اصول علمی ساخته شده بوده، اما با گذشت سال‌ها و فرسودگی زیاد و ارتعاشات ملکولی شدید و بدتر از این‌ها بر اثر سهل‌انگاری در نظارت بر کارها، پل به این وضعیت اسفبار افتاده است. . . .

در آن جا منظری استخوانی و غول‌آسا خودنمایی می‌کرد که در چهرهٔ از خودراضی آن حالت انتظار هویدا بود، و از دور دورها سوسوی بی‌رمقی داشت، همانند شبحی بود که از میان مه انتهای پل برای دید زدن منظره و خوش‌آمدگویی به فاجعه‌ای که انتظار آن را می‌کشد پدیدار شده باشد. غژغژ و زوزهٔ دلخراشی که از فلز برمی‌خاست سایه‌های درون ترك‌هایی را که شبح به آن زل زده بود می‌شکافت، به‌نظر می‌آمد که نوسان ارتعاش سهمگینی، همانند کوبش مستمر و خسته‌کنندهٔ چکشی بر روی کفی فلزی، به عرشهٔ پل وارد شده باشد، پل به لرزه در آمده بود و چنین به نظرم آمد که ترك ِ همچون آذرخش ِ پل را بیش‌تر پدیدار کـرده و آن را بیش از پیش از شکل انداخته است.

وقتی ماتیو راجع به شبح پرسید، پری بدون تـامل پاسخ داد کـه " این شبح سیری‌ناپذیر مرگ است که در انتظار حوادث غیرقابل اجتناب کمین کرده است. " وقتی ماتیو در مورد " انحصار و هرج و مرج " سؤال کرد متوجه شد که پری ناپدید شده است. ماتیو از خواب بیدار می‌شود و از فکر مسافرت با قطار به شهرهای اطراف صرفنظر می‌کند. و

به‌جای رفتن به تعطیلات روز خود را با پرسه زدن در خیابان‌ها و پارك‌ها " در امنیت کامل ـ و با سیگار کشیدن! " می‌گذراند. داستان پانچ با این عبارت به پایان می‌رسد: " صبح روز بعد مطلبی در روزنامه‌ها خواندم که مرا به این باور رساند که اصحاب راه‌آهن مصمم هستند ' به هر قیمتی که باشد ' به این ماجرا خاتمه داده و آن روح پلید شیطانی را فراری دهند، و اکنون منتظر فرا رسیدن تعطیلات بعدی هستم تا با آسایش خاطر و با قوت قلب به مسافرت بروم. "

این مطالب نشان می‌دهد که حتی خود شرکت‌های راه‌آهن نیز به کثرت غیرقابل قبول خرابی پل‌ها اعتراف داشته‌اند، اما اینکه تعداد دقیق پل‌های خراب‌شده چقدر بوده است بیش‌تر جنبهٔ تاریخی دارد. طرفنظر از آمار این پل‌ها، داستان مجلهٔ پانچ و کاریکاتور تنیل ـ همانند داستان قدیمی‌تر ناتانیل هاثرن در بارهٔ غیرایمن بودن پل‌های راه‌آهن آسمانی ـ حکایت از آن دارد که واقعیت خطر این شکست‌ها تا چه حد زیادی ملموس بوده است.

موارد شکست‌های تکنولوژیکی دوران معاصر نیز می‌تواند نشانگر عمق چنین احساس خطری باشد. فقط سقوط یك هواپیمای دی‌سی ـ ۱۰ در سال ۱۹۷۹ در شیکاگو کافی بود که تمامی پروازهای این نوع هواپیما متوقف گردد، و فاجعهٔ خراب شدن راهروهای معلق هتل هایت ریجنسی کانزاس در سال ۱۹۸۱ که حادثه‌ای نادر بود هرگز از یادها نرفت. سرسری گذشتن و بی‌اعتنایی به حتی یك شکست سازه‌ای با این توجیه که موردی غیرمعمول و اتفاقی است به‌هیچ‌وجه عاقلانه و قابل قبول نمی‌باشد.

شکست هر سازهٔ مهندسی عاملی است برای جلب توجه، و هر اتفاق می‌تواند روشنگر یك عیب موجود در مصالح یا خطای طراحی باشد که می‌تواند باعث اصلاح تعداد بی‌شماری از سازه‌های ظاهراً موفق گردد. در

مهندسی ارقام و تعداد فقط وسیله هستند و نه هدف، و فقط شکست یك پل بایستی برای زیر سؤال بردن کفایت سازه‌ای هر پل دیگر کافی باشد. مراعات چنین اصلی، طبق اطلاعات موجود، به‌طور یکسان برای عوام و خـواص در قرن نـوزدهم ملمـوس بوده است. امـروزه نیز ما از نوعی " ادبیات تکنولوژیکی " صحبت می‌کنیم و نیاز به آگاهی غیرمهندسان از مسائل و کارهای مهندسی را مطرح می‌کنیم. نه ملکه ویکتوریا و نه مسافر قطار قرن نوزدهم هیچ‌کدام به‌نظر نمی‌رسیده است که در مواجهه با مطالب فنی آن زمان در خود احساس حقارت کرده یا عقب‌نشینی می‌کرده‌اند، و این موضوع نمونهٔ خوبی برای مردم قرن بیستم است. اگر چه که برخی از جزئیات مهندسی ممکن است محرمانه و اختصاصی باشد، لیکن اصول طراحی و ایمنی و موارد مربوط به خطرپذیری و سود و زیان آن چنین نیست، زیرا ساختن یك پل فعالیت انسانی کم‌تری از رفتن به یك مسافرت نمی‌باشد. توقع مشترك مهندس و فرد عامی آن است که جاده به پلی ختم نشود که دچار خرابی خواهد شد.

اینکه کدام کار جدید به موفقیت منتهی خواهد شد و کدام‌یك دچار ناکامی و شکست خواهد شد به‌طور کامل قابل پیش‌بینی نیست. در مورد هر طراحی جدید، پل یا هواپیما یا آسمانخراش یا هر چه که باشد، طراح با راه‌حل‌ها و انتخاب‌هایی که بی‌شمار به‌نظر می‌رسد روبرو می‌گردد. طراح ممکن است که تصمیم بگیرد تمامی نکاتی از طرح‌های موجود را که با موفقیت نیروهای وارده را تحمل کرده‌اند و مناسب به‌نظر می‌رسند اخذ کرده و عیناً به کار ببرد، همین‌طور نیز ممکن است تصمیم بگیرد که آن نکاتی از طرح‌های قبلی را که تکامل و اصلاح آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد تغییر دهد. بدین ترتیب پلی که ده‌ها سال استوار برجا مانده است ولی تعدادی ترك بی‌خطر در بعضی نقاط آن ایجاد شده است ممکن است که به‌عنوان الگویی برای طراحی و ساخت پلی بهتر و

اصلاح‌شده، برای مورد مشابهی از نظر دهانهٔ پل و ترافیك، در نظر گرفته شده و تغییراتی در آن داده شود. یا سازه‌ای که سال‌ها و حتی ده‌ها سال بدون نشان دادن هیچ‌گونه عارضهٔ منفی مورد استفاده قرار گرفته است، ممکن است که طراح را به این فکر بیاندازد که به‌دنبال راه‌هایی برای کاهش وزن آن و کم‌هزینه‌تر کردن آن باشد، زیرا نمونه‌هایی که مشکل‌ساز نبوده باشند این ذهنیت را تقویت می‌کنند که طراحی آن‌ها احتمالاً دست‌بالا بوده است.

تصمیم‌گیری‌ها در طراحی، نهایتاً چیزی شبیه به تصمیم‌گیری‌ها در کارهای زندگی انسان‌ها است. مهندس طراح می‌تواند بر روی کاغذ دو یا حتی چندین طرح مختلف را اختیار کند که همگی الزامات و مشخصات ضروری مورد نظر را برآورده سازند، ولی در مرحلهٔ آخر فقط یك طرح برای ساختن انتخاب می‌شود، درست همان‌طور که نهایتاً برای مسافرت از شیکاگو به نیویورك فقط یك راه برگزیده می‌شود، هر چند که راه‌های بسیاری در هنگام برنامه‌ریزی مسافرت مورد بررسی قرار گرفته باشند. این انتخاب که در نهایت کدام طرح ِ کاغذی بر روی زمین پیاده شود، طراح یا گروه مسؤول تصمیم‌گیری را با مشکلی روبرو می‌سازد که بی‌شباهت با وضعیت مطرح‌شده در شعر رابرت فراست[1] نیست:

در جنگلی سبز دو راه جدا می‌شدند،
اما من هر دو را نمی‌توانستم رهسپار شوم
و یك تن بیش نبودم، ایستادم
و چشمانم در امتداد یکی به راه افتاد

---

[1] - Robert Frost ، (۱۹۶۳-۱۸۷٤م)، شاعر آمریکایی

تا بدانجا که به‌درون بوته‌زار می‌پیچید؛

طراح با آینده‌نگری سعی می‌کند مشخص کند که طرح‌های مختلفی که در نظر دارد هر کدام به کجا ختم خواهند شد، لیکن راه‌هایی که در پیش است هر چه بیش‌تر جلو برود شاخه شاخه‌تر می‌شود، تا حدی که در قسمت‌های آخر همانند بوته‌زار می‌شود. مهندسی که محافظه‌کاری شدیدی را اختیار کند راهی را انتخاب می‌کند که قبلاً دیگران رفته‌اند و پل شناخته‌شده‌ای را برمی‌گزیند، حتی اگر از یك طرح جدید بسیار گران‌تر تمام شود و یا از نظر زیبایی ظاهری چندان تناسب و جذابیتی نداشته باشد. مهندسی که جسارت به خرج دهد و دارای خلاقیت فوق‌العاده‌ای باشد ممکن است با تصمیم‌ها و انتخاب‌های خود عامدانه و آگاهانه تغییراتی در آن بدهد، چنانچه که فراست در مواجهه با دو راهی جنگل کرد. رابرت میلارت[1] ، مهندس سویسی که به هنرمند سازه‌ها مشهور شده بود، طرح‌های بتنی جدیدی را ابداع و عرضه کرد که هم از نظر اقتصادی و هم از لحاظ زیبایی تغییراتی اساسی در ساخت پل‌ها در اوایل این قرن به‌وجود آورد، و می‌توان گفت که وی از این شاعر تبعیت کرده است که :

در جنگلی دو راه جدا می‌شدند ، و من ـ
بدان رهسپار شدم که کم‌تر رهگذری داشت،
و تمام تفاوت‌ها در این بود.

---

1 - Robert Maillart

۷

طراحی و اصلاح

تصویری از نویسنده‌ای که جلوی روی خود کاغذ سفیدی دارد و سبد کنار میزش انباشته از کاغذهای مچاله‌شده است تجسمی آشنا برای همه است. این تصویر اگر واقعاً نیز درست نباشد به‌طور تمثیلی حقیقت داشته و بیانگر ناکامی‌ها و تلاش‌های بی‌ثمر در طول کارهایی خلاق چون نویسندگی و هنر و مهندسی می‌باشد. می‌توان گفت که نویسنده در صدد کنار هم قرار دادن ترکیب جدیدی از کلمات برای رسیدن به هدف خاصی است. نویسنده خواهان آن است که کلمات وی خواننده را آن‌گونه به‌طور طبیعی و واقعی از اینجا به آنجا ببرد که خواننده قادر شود صحنه‌ها و ماجرای داستان یا مثال‌ها و مباحث مقاله را در ذهن خود تصور کند. کاغذهای مچاله‌شدهٔ درون سبد و اطراف آن نشانگر تلاش‌هایی است که به نتیجه نرسیده است و یا نتیجهٔ آن مطابق ذوق و احساس هنری یا خواستهٔ تجاری نویسنده نبوده است. گاهی اوقات کارهای دور ریخته‌شده فقط شامل یك جمله است، گاهی نیز تمام فصل و یا حتی تمام کتاب را در بر می‌گیرد.

انتخاب نویسنده در دور انداختن این یکی و نگهداشتن آن دیگری

را می‌توان به قضاوت ضمنی یا آشکار وی در خصوص کارآمد بودن یا نبودن آن‌ها نسبت داد. قضاوت در خصوص کارآمد بودن چیزی همواره بسیار مشکل‌تر از قضاوت در مورد عدم کارآیی آن است، و چه بسا که نویسنده با در معرض انتقاد عینی قرار ندادن موضوع دچار خودفریبی شود. در نتیجه نسخه‌های دست‌نویسی که پر از عیب است از نظر مؤلف آن شاهکار قلمداد می‌شود. دست‌نویس‌هایی که دارای معایب آشکاری باشند توسط ویراستار به مؤلف عودت داده می‌شود، و معمولاً نیز دلایل عدم موفقیت آن ذکر می‌گردد. دست‌نویس‌هایی که به چاپ سپرده می‌شوند توسط منتقدین خبره و عامهٔ خوانندگان مورد قضاوت قرار می‌گیرند. گاهی منتقد و خواننده قضاوت یکسانی در مورد کتاب داشته و گاهی نیز اختلاف نظر دارند. در قضاوت‌های مثبت، با اشتیاق به طرفداری از کتاب، به موارد بسیاری از آن اشاره شده و با دیگر کتاب‌های موفق مورد مقایسه قرار می‌گیرد، در قضاوت‌های منفی عمدتاً و به فراوانی به مواردی اشاره می‌شود که دلایل عدم موفقیت آن را نشان دهد. منتقدان معمولاً به ناهماهنگی‌ها و نامناسبی‌های طرح، و پرداخت ضعیف شخصیت‌ها یا شخصیت‌های غیرمنطقی اشاره کرده، و به‌طور کلی متقابلاً نظریات مخالفی در مقابل نظر نویسنده و ویراستار و ناشر مبنی بر خوب بودن کتاب ارائه می‌دهند. به‌طور خلاصه، منتقد به دلایل و چگونگی شکست کتاب می‌پردازد.

این موضوع در نقدی از اجرای جدید نمایشنامهٔ تری واگنر[1] به نام مردی که از آینده خبر داشت[2] کاملاً آشکار است؛ در این نمایشنامه مباحثه‌ای بین یك پروفسور فیزیك و یك مجسمه‌ساز جوان در بارهٔ علم و

---

1 - Terri Wagener
2 - *The Man Who Could See Through Time*

هنر وجود دارد که فرانك ریچ منتقد نیویورک تایمز[1] در مورد اجرای آن چنین می‌نویسد:

> حتی بهترین نمایشنامه‌های دو نقشی آن‌قدر کم‌جان به‌نظر می‌رسند که آدمی فراموش می‌کند چقدر هنر و مهارت در آن‌ها به کار رفته است. . . . به‌هرحال، دیدن نمایشنامه‌ای دو نقشی که با شکست مواجه می‌شود، دقیقاً به مفهوم درك اهمیت و ارزش واقعی فورم است.

و همین‌طور است در مورد سازه‌های مهندسی. بزرگ‌ترین پل‌های معلق از نظر اصول طراحی و شکل بسیار ساده به‌نظر می‌رسند، اما تاریخچهٔ شکست‌های این پل‌ها خاطر نشان می‌سازد که طراحی آن‌ها نیازمند دست همکاری نوابغ بوده است. و با اطمینان می‌توان گفت که نابغه‌هایی مثل واشینگتن روبلینگ[2] و اتمار امان[3] از شکست‌های بزرگ پیشینیان، فراموش‌شدهٔ خود درس‌های بسیاری از آنچه که نبایستی انجام دهند آموخته بوده‌اند، بسیار بیش‌تر از آنچه که می‌توان از طراحان امروز انتظار داشت تا برای طراحی پل معلق بعدی درس‌هایی از پل بروکلین یا پل ورازانو[4] فرا گرفته باشند.

بعضی از نویسندگان دست‌نویس‌های ناموفق خود را، حتی اگر قصد انتشار آن را نیز نداشته باشند، دور نمی‌ریزند. آن‌ها هر خط یادداشت و هر تکه ورقی را نگهمیدارند و گویی بر این باور هستند که این مطالب هرگز به حد کامل نهایی نخواهند رسید و آنان از میان نوشته‌های

---

1 - *New York Times*
2 - Washington Roebling
3 - Othmar Amman
4 - Verrazano Narrows Bridge

مختلف بالاخره ناچاراً آن را که نقص کم‌تری دارد انتخاب خواهند کرد. این یادداشت‌ها و مطالب اگر مربوط به دست‌نویس‌های متن نهایی یك کتاب موفق باشند چندان ارزشی نخواهند داشت. در حالی که نویسنده‌ها عموماً علاقمند هستند که از دست‌نویس‌ها و یادداشت‌های اولیهٔ کتاب چیزهایی یاد بگیرند که نمی‌توان از نسخهٔ نهایی منتشرشده یاد گرفت زیرا خلق یك کتاب را می‌توان به صورت یك سری انتخاب‌ها و اصلاحات متوالی در نظر گرفت که دانستن سیر این تحول آموزنده خواهد بود. یك جمله و یا حتی یك کلمه ممکن است پس از بررسی و ردکردن ده‌ها مورد به نتیجهٔ نهایی رسیده باشد. گاهی اوقات نمونهٔ نهایی از همهٔ نمونه‌های دیگر به نمونهٔ اولی نزدیك‌تر می‌باشد، گاهی نیز کلمه‌ای حذف می‌شود و به‌جای آن یك سری کلمات مترادف یا نسبتاً هم‌معنی و یا حتی متضاد مورد توجه قرار می‌گیرند تا آنجا که نهایتاً ممکن است نویسنده دوباره همان کلمهٔ اولی خود را برگزیند. این تکرارها و آزمون‌های سازنده بیانگر آن است که انتخاب حتی یك کلمه توسط نویسنده را می‌توان به‌صورت ردکردن چیزی به‌جای تأیید چیزی یا به‌صورت شکست خوردن موردی به‌جای موفق بودن موردی و یا به‌صورت شکل منفی به‌جای شکل مثبت، بسیار ساده‌تر درك کرد. دست‌نوشتهٔ تمیز و عاری از تغییرات، اطلاعات اندکی، و شاید هم هیچ اطلاعی، در رابطه با دلایل دقیق نویسنده برای کنارگذاشتن آنچه که در متن اولیه نوشته بوده به‌دست نمی‌دهد. اما تغییر کلمات یا حذف جملات یا بعضی دیگر تغییراتی که می‌توان رد پای آن‌ها را با بررسی دست - نویس‌های متوالی یك متن یافت، کاملاً بیانگر آن است که نویسنده معتقد بوده که آنچه در ابتدا نوشته درست نبوده است. چنین مواردی برای رسیدن به نتیجه‌ای که نویسنده به دنبال آن بوده است کفایت نداشته‌اند. البته از این گفته نمی‌توان نتیجه گیری کرد که هر آنچه که از ابتدای

متن اولیه تا متن نهایی دست نخورده باقی مانده باشد از نظر نویسنده کامل و بی‌عیب بوده است، چنین مواردی صرفاً بیانگر آن هستند که، چه به‌طور صحیح و چه از روی اشتباه، نویسنده هیچ نقص غیرقابل قبولی در آن‌ها نیافته است یا اینکه جانشین مناسب‌تری برای آن‌ها نداشته است. قسمت‌های دست‌نخورده و تغییرنیافتهٔ استخوان‌بندی کتاب این نویسنده، ما را به هیچ نتیجه‌گیری متقنی در بارهٔ ساختار آن نمی‌رساند.

تعدادی از اربابان بنام قلم هیچ‌وقت از کار خود به‌طور کامل رضایت نداشته‌اند. جیمزجویس[1] به‌عنوان نویسنده‌ای که حتی هنگام حروف‌چینی شاهکارهای بزرگش چون اولیس[2] و بیداری فینگان[3] دست به تغییرات عمده و زیاد در متن می‌داده است انگشت‌نما است. وی بعد از حروف‌چینی نیز باز هم در نمونه‌های چاپی اصلاحاتی انجام می‌داد. پس از اینکه انتقادات بسیاری از نسخهٔ اصلی اولیس که در سال ۱۹۲۲ چاپ شده بود منتشر شد، ویرایش جدیدی از آن در سال ۱۹۸۴ چاپ شد که گفته می‌شود بیش از پنج هزار اشتباه که به چاپ اول راه یافته بوده است در این چاپ اصلاح شده است. به عقیدهٔ منتقدی این چاپ جدید نیز آن‌قدر دچار تغییرات شده و تعدادی از جملاتی که قبلاً حذف شده بوده دوباره در ویرایش جدید آمده است که کل داستان شرح و تفسیر دیگری می‌طلبد.

بعضی از نویسندگان مشهور نیز گاهی به‌جای تکمیل کردن کار آن را رها می‌کنند. این کار آن‌ها به این معنی است که تشخیص داده‌اند علی‌رغم تمام تلاش‌ها و اصلاحات انجام‌شده، دست‌نویس مذکور هرگز نمی‌تواند کامل شود، و آن‌ها بایستی بالاخره تصمیم بگیرند که کی

---

۱ - James Joyce ، (۱۹۴۱-۱۸۸۲م)، نویسنده ایرلندی

2 - *Ulysses*

3 - *Finnegans Wake*

اشکالات و نواقص مهم آن برطرف شده است و کی این متن تا حد ممکن و بدون انجام کارهایی بیش از حد منطقی به نقطهٔ کمال نزدیك شده است. حتی بیست و چند سالی که جویس بر روی متن بیداری فینگان کار می‌کرد نتوانست وی را متقاعد کند که نسخهٔ تحویل‌شده به حروف‌چین کامل شده است، و همهٔ نویسنده‌ها به‌طور ضمنی معترف هستند که اصلاحاتی که روی دست‌نویس انجام می‌شود به حدی می‌رسد که پس از آن متن را دچار انحطاط و نقصان بیش‌تر می‌سازد.

کار مهندس نیز بی‌شباهت به کار نویسنده نیست. طراحی یك پل جدید تا رسیدن به طرح اصلی و نهایی، همانند دست‌نویس اول یك داستان، طی مراحلی دستخوش تغییرات و اصلاحات بسیاری می‌گردد. طراح راه‌حل‌ها و طرح‌های بسیاری را که به تشخیص وی و به دلایل مختلف کارآیی مورد نظر را نداشته‌اند کنار می‌گذارد تا طرح وی را دچار شکست نسازند. چیزی که مهندس در نهایت بر روی کاغذ می‌آورد اگرچه که ممکن است باز هم نقایص آشکاری داشته باشد، ولی این موارد به اعتقاد وی در آن حدی نخواهند بود که بتوان بیش از آن به آن‌ها پرداخت و به‌موقع نتیجهٔ بهتری گرفت. با وجود این، گاهی پس از طراحی و پیاده کردن طرح بر روی کاغذ، مهندس طراح ممکن است به این نظر برسد که طرح انتخاب‌شده وی را به نتیجهٔ مطلوب و مورد نظر نخواهد رساند، و بنابراین نقشهٔ نامناسب پل را همانند نویسنده‌ای که طرح و دست‌نویس بی‌ثمر خود را مچاله می‌کند کنار بگذارد.

تعدادی از طرح‌ها مدت بیش‌تری از بقیه بر روی کاغذ دوام می‌آورند. سرانجام یکی از آن‌ها به‌عنوان طرح اصلی سر بر می‌آورد، و همان‌طور که نویسنده مطالب دست‌نویس خود را کلمه به کلمه مورد بررسی قرار می‌دهد، این طرح نیز قسمت به قسمت از نظر صحت کارآیی کنترل می‌شود. وقتی معلوم شود که قسمتی از طرح فاقد توانایی و

مشخصات لازم برای انجام کار مورد نظر می‌باشد طراح آن قسمت را با چیز دیگری که در ذهن خود دارد جایگزین می‌سازد، همان‌گونه که نویسنده در گنجینهٔ ذهن خود لغت مناسبی را جستجو می‌کند تا جایگزین کلمه‌ای کند که به تصور وی کارآیی لازم را نداشته است. بالاخره، مهندس طراح نیز همانند نویسنده به طرحی دست می‌یابد که وی را متقاعد می‌کند که تا آنجا که قادر بوده است آن را بدون عیب و نقص کرده است، و در این مرحله است که طرح مذکور به مهندسانی عرضه می‌شود تا همانند ویراستار در خصوص موفقیت یا شکست آن اظهار نظر و قضاوت کنند.

مقایسه بین کتاب‌های نویسندگان و سازه‌های مهندسان بدیهی است که مقایسهٔ کامل و دقیقی نمی‌تواند باشد. کتاب در مقایسه با ساختمان و پل و یا هر سازهٔ مهندسی دیگر دارای جنبهٔ فعالیت فردی بیش‌تری است، گرچه که می‌توان گفت تدوین یك فرهنگ لغات یا دائرةالمعارف شبیه طراحی یك نیروگاه مدرن اتمی است که هیچ‌کدام از تك‌تك افراد همهٔ جزئیات پروژه را نمی‌دانند. علاوه براین، شکست و عدم موفقیت یك کتاب تا حدی قابل مناقشه و جدل است، در حالی که شکست ساختمانی که به توده‌ای مخروبه بدل شده چنین نمی‌باشد. با این وجود، فرآیند اصلاحات متوالی هم در نویسندگی و هم در مهندسی کاری مشابه و همانند کار آهنگ‌سازی و فعالیت‌های علمی بوده، و مقایسهٔ فرآیند خلاق حذف متوالی عیب‌ها و خطاها در نویسندگی و مهندسی برای پی بردن به چگونگی برآمدن یك کتاب یا یك طرح بسیار گویا می‌باشد. این جنبه از قیاس است که بسیار آموزنده بوده و نشان می‌دهد که نویسندگان و مهندسان معروف چگونه از اشتباهات و خطاهای گذشتگان و معاصران خود بسیار بیش‌تر از همهٔ کارهای موفق دنیا بهره می‌گیرند.

با اینکه مهندسانی که جانب احتیاط را مراعات می‌کنند و از روی

طرح‌هایی که طی مرور زمان آزمایش خود را پس داده‌اند نمونه‌برداری می‌کنند مورد استقبال خوبی هستند (گرچه ممکن است به خوبی استقبال از نویسنده‌های رمان‌های پرطرفدار روز نیز نباشد که در مقایسه با مهندسان برای انواع رمان‌های خود به مطالب وسیع‌تر و متنوع‌تری دسترسی دارند)، لیکن وجه تمایز حرفه‌ای چنان مهندسانی نیز بیش از مرتبت ادبی چنین نویسندگانی نمی‌باشد. وقتی صحبت از مهندسان مبتکر است مثل این است که در بارهٔ تعداد معدودی نویسندهٔ بزرگ صحبت می‌کنیم. و همان‌طور که نویسندگان بزرگ کسانی هستند که نوشته‌های بی‌نظیر و شاهکارهای موفق و به یادماندنی را به ما عرضه کرده باشند، مهندسان بزرگ نیز کسانی هستند که کارهای سازه‌ای بی‌همتا و مبتکرانه‌ای را به ما عرضه کرده باشند که در طول مرور زمان آزمایش خود را پس داده باشد.

مقایسهٔ مهندسان با هنرمندان از یك طرف و با دانشمندان از طرف دیگر، از روی بوالهوسی یا تلون عقیده نیست. مهندسی واقعاً دارای ویژگی‌های مشترکی از هنر و علم می‌باشد، زیرا مهندسی فعالیتی انسانی است که هم جنبهٔ خلاقیت و ابتکار دارد و هم جنبهٔ تحلیلی. به‌عنوان یك حرفهٔ خلاق، کارهای ابتکاری و نوآوری‌های مهندسی، منتقدان را از هر رده و گروه که باشند به میدان مبارزه می‌خواند، در حالی که استواری یا شکست یك سازهٔ بدیع و جدید حتی با کمك دنیای افسانه‌ای آزمایش‌ها و اثبات فرضیه‌ها غالباً چندان به‌آسانی و روشنی قابل تشخیص نمی‌باشد. عمق مشکلات سازه‌های جدید در منشاء انسانی آن و دنیای انسانیی که در آن به‌کار برده می‌شود نهفته است. گرچه تفحص دربارهٔ موفقیت یا عدم موفقیت یك سازهٔ مهندسی به‌عنوان کاری هنری مسألهٔ مرگ و زندگی نیست، لیکن استواری یا انهدام آن در زیر وزن تماشاچیان در مراسم اهداء جوایز موضوعی است که بایستی در نظر گرفته

شود.

ماهیت جدید بودن یك کار مهندسی، مسألهٔ سلامت بودن آن را به‌صورت موضوعی غامض در می‌آورد. آنچه که بر روی کاغذ خوب می‌نماید، ممکن است در عمل چنان نباشد، صرفاً به این دلیل که طراح سازه را تحت اثر یك بار پیش‌بینی‌نشده بررسی نکرده باشد یا یك جزئیاتی را که در واقع حلقهٔ ضعیف سازه بوده در نظر نگرفته بوده باشد. بدون تردید هیچ طراح دیگری که ماجرای فاجعه‌بار پل تاکوما را به خاطر داشته باشد پلی همانند آن طراحی نخواهد کرد، اما پل جدیدی که از نظر شکل یا آنالیز یگانه باشد می‌تواند حتی برای خود طراح نیز مسائل غیرمنتظره‌ای در پی داشته باشد. برای حصول اطمینان از ایمنی کار، طراح بایستی سازه را در کلیهٔ حالات و شرایط ممکن در نظر گرفته و هر یك از این حالات را دقیقاً بررسی کند، تا مطمئن شود که حتی جزئی‌ترین و کوچك‌ترین قسمت آن در معرض شکستگی نباشد. اما در نظر گرفتن و بررسی کردن همهٔ حالاتِ ممکن شاید الی‌الابد طول بکشد، و طراح مجبور است که قضاوت کند که کدام حالات مهم‌تر و بحرانی‌تر هستند و کدام حالات کم‌اهمیت‌تر هستند. بدین ترتیب، آن حالت‌های اولی مورد بررسی قرار می‌گیرند و از این حالت‌های بعدی صرفنظر می‌شود.

همان‌طور که منتقدین ادبی در برخی از متون ارزشمند مفاهیم و سمبل‌هایی می‌یابند که نویسنده آگاهی قبلی در مورد آن‌ها را انکار می‌کند، همین‌طور نیز منتقدی تحلیل‌گر در طرحی مهندسی ممکن است مسائلی در مورد قطعات سازه‌ای طرح بیابد که باعث شگفتی طراح گردد. و همچنین همان‌طور که ممکن است سال‌ها پس از نوشته شدن متنی و مورد تحسین قرار گرفتن آن ارزیابی ادبی مجددی در خصوص آن به عمل آید، همین‌طور نیز ممکن است سازه‌ای مهندسی پس از سال‌ها که

استوار مانده است به‌دلیل خراب شدن خود آن و یا شکست سازمای مشابه آن مجدداً مورد آنالیز قرار بگیرد. در مواردی که بخت یار سازه بوده باشد، عیب و نقص آن به‌موقع کشف شده و نسبت به رفع آن قبل از خراب شدن سازه اقدام می‌شود، اما در بسیاری حالات این انهدام فاجعه‌بار سازه است که عامل ترغیب برای بررسی و کشف مسائل و اشکالات موجود می‌باشد.

کار طراحی پل دارای خصوصیت‌های مشابهی با کارهای شاعری و علم است. همانند یك قطعه شعر، پلی که به اعتقاد یك طراح قابلیت پوشاندن دهانه‌ای خاص در دوره‌ای خاص از تکنولوژی را داشته ممکن است که هرگز دقیقاً در ذهن طراحی دیگر در هیچ دوره‌ای وجود نداشته باشد. درعین‌حال، همانند کشفیات علمی، اگر مبانی تئوریکی و رفتاری پل وضع شده باشد، آن‌گاه می‌توان پل ساخت، پلی برای آن زمان و مکان خاص، حال طراح آن هر که باشد. در طراحی تفصیلی و جزئیات پل، خیال‌پردازی‌های شاعرانه نبایستی وجود داشته باشد، زیرا یك خط اشتباه در روی نقشه یا یك عدد اشتباه در روی برگ محاسبات می‌تواند منجر به سرنگونی سازه شود، گرچه که پل در روی نقشه خوش‌منظر و مستحکم بنماید. و امروزه نیز چنانچه از کامپیوتر استفاده شود، حتی یك اشتباه سهوی کوچك مانند تغییر محل علائم قراردادی یا محل نقطهٔ اعشار یا علامت یك پارامتر در معادله‌ای می‌تواند منجر به شکست سازه گردد، اگرچه که مدل کامپیوتری مورد استفاده کاملاً مناسب و صحیح باشد.

پل‌های رابرت میلارت همانند کارهایی هنری که شکوهی به عظمت آلپ دارد مورد ستایش قرار گرفته است. در بلندپروازی‌های ابداعات این مهندس سویسی، چنان به‌نظر می‌رسد که پیچ و خم‌های انحناء خطوط کوه‌ها در پرواز ذهن وی همانند یك عقاب، سبکبال به هنگام تماشا و قوی به هنگام برخورد، پرورانده شده‌اند. همانند شخصیت اندیشمند شعـر

« خبره آشفتگی‌ها »[1] اثر والس استیونز[2] :

. . . او نظاره‌گر بلندپروازی عقاب است
که همگیِ تو در توهای آلپ لانه اوست.

استفادهٔ میلارت از بتن مسلح‌شده با فولاد مانند قرار دادن شعر در متن نثر بود، و اگرچه قابل تشخیص نبود ولی پلی کاملاً عادی را بسیار امن ساخته بود. پل‌های میلارت به‌طور دقیق و خط به خط هر صفحه قابل توجیه تلقی نمی‌شد، زیرا این مجموعه به‌صورت جوهری مجمل همانند شعر عمل می‌کرد. خلاصه آنکه، همانند شعر، پل‌های وی عالی بودند زیرا که عالی بودند. طرح‌های میلارت پس از باز یافتن شکل خود و تکمیل شدن بر روی کاغذ، آنالیز می‌شدند و تا حد لازم قسمت‌های مختلف آن اصلاح می‌شد تا تنش‌ها صحیح‌تر توزیع شوند و یا خطوط طرح ملایم‌تر شوند. و بالاخره صحت عملکرد آن‌ها بستگی به پیاده شدن طرح‌ها داشت. وقتی که بتن به دور فولاد ریخته می‌شد، پس از مدتی قالب‌ها و اجزاء موقت نگهدارندهٔ پل برداشته می‌شد (مثل نوار ماشین تحریر که از روی کلمات شعرِ در حال تایپ برداشته می‌شود)، و پل در معرض اولین آزمایش قرار می‌گرفت، همان‌طور که شعر با اولین بار خوانده شدن در معرض اولین آزمایش قرار می‌گیرد. با طاقت آوردن هر پل پس از استفاده‌های مکرر طی سال‌ها، همانند شعری که بارها و بارها خوانده می‌شود، پل موفقیت خود را اثبات می‌کرد. با این وجود، میلارت در بسیاری از شاهکارهای خود وزن اضافی یا خطی غیرضروری می‌یافت که آن‌ها را در کار بعدی اصلاح می‌کرد. روش

---

1 - Connoisseur of Chaos

۲- Wallace Stevens ، (۱۹۵۵-۱۸۷۹م)، شاعر آمریکایی

خود انتقادی و خود اصلاحی میلارت چندان بی‌شباهت با کار نویسندگان نبود.

مهندس کم‌تر از شاعر به نقائص کار خود توجه ندارد، و از اشتباهات خود و دیگران بیش‌تر می‌آموزد و تجربه می‌اندوزد تا از شاهکارهای خلق‌شدهٔ خود و دیگر همکارانش. میلارت گرچه استاد استفاده از بتن و فولاد در پل شده بود، اما خود ابداع کنندهٔ این روش نبود. در آخرین سال‌های قرن نوزدهم فرانسوا هنبیك[1] ، که یکی از کارهای شرکت ساختمانی وی تعمیر کلیساهای گوتیك بود، تحقیقاتی در مورد به کار بردن فولاد در درون بتن به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترك در هنگام کشش بتن به‌عمل آورد. شرکت هنبیك با اجرای هزاران پروژه تجربیات ارزشمندی دربارهٔ سازه‌های بتنی مسلح به‌دست آورد، ولی این دستاوردها خالی از اشکال و عیب نبود. مثلاً پلی که بر روی رودخانه وین[2] در فرانسه زده شده بود ترك‌هایی در آن به‌وجود آمد. این پل طویل‌ترین پل قوسی هنبیك بود، و شکل و نحوهٔ ترك نشان می‌داد که امکان اصلاح آن در طراحی بوده است. همان‌طور که دیوید بیلینگتن[3] در ویژه‌نامهٔ بزرگداشت پل‌های رابرت میلارت مطرح کرده است، میلارت از چنین تجربه‌هایی اندوخته‌های فراوانی کسب کرد، همچنان که از ترك‌های طرح‌های خودش از قبیل اولین پلی که در زئوز[4] هلند ساخت چیزهای بسیاری آموخت.

ترك‌های کوچك سازه‌های بتنی مسلح الزاماً به معنی وجود خطر خرابی سازه نمی‌باشد، زیرا فولاد می‌تواند از افزایش شکاف ترك‌ها

---

1 - Francois Hennebique
2 - Vienne River
3 - David Billington
4 - Zuoz

جلوگیری کند. اما وجود ترک‌ها حاکی از عدم درک کامل و دقیق طراح از طرح ـ روی کاغذ می‌باشد، زیرا به‌وجود آمدن ترک در سازه این فرضیهٔ ضمنی را که در هیچ جای سازه مقدار تنش‌ها به آن حدی نیست که بتواند باعث ایجاد ترک شود به‌طور قطعی مردود می‌سازد. کشف و بررسی ترک‌های به‌وجودآمده در سازه، طراح را قادر می‌سازد که به نقاط ضعف معلومات خود پی برده و در طرح‌های بعدی آن‌ها را اصلاح نماید، و جاهایی را نیز که دقت تعیین مقدار تنش آن‌ها کم‌تر است تقویت کند. بدین ترتیب طرح‌های یك مهندس به‌تدریج بهتر شده و نوید کارهای کامل و ارزنده‌ای را خواهد داد که دچار ایجاد ترك نگردد، همانند آثار دورهٔ جوانی شاعران که به‌تدریج به اوج شاهکارهای برجسته‌ای می‌رسد که خالی از عیب می‌نماید.

مهندسی نیز مثل هنر شعر تلاشی است در جهت راه‌یابی به تکامل. و مهندسان نیز مثل شاعران به‌ندرت از نتیجهٔ کار خود احساس رضایت کامل می‌کنند. حتی اگر کس دیگری هم متوجه نشده باشد، خود اینان همواره مترصد کلمه‌ای هستند که کاملاً جا نیافتاده است یا در فکر ترکی مویی هستند که ممکن است مشکل‌ساز گردد. با این وجود، اگرچه که شاعران پس از چاپ اول شعر می‌توانند در هنگام چاپ‌های بعدی آن ده‌ها بار اصلاح و تجدیدنظر بکنند، اما مهندسان خیلی به‌ندرت می‌توانند اصلاحات و تغییرات عمده‌ای در سازهٔ ساخته‌شده بدهند. با این همه، هر مهندسی از اشتباهات خود مطمئناً مطالب ارزشمندی می‌آموزد.

آنتون تدسکو[1] طراح سازه‌های پوسته‌ای بتنی عظیمی از قبیل مجموعهٔ ورزشی در پنسیلوانیا و ترمینال فرودگاه سن لوییز[2] ، ماجرای

---

1 - Anton Tedesko

۲ - St. Louis ، شهری در شرق ایالت میسوری

بازرسی ترک‌های مویی ریزی را که در ساختمان پوسته‌ای سهموی دواری که در دنور[۱] برای طرح یو مینگ پی[۲] طراحی کرده بود به‌وجود آمده مکتوب کرده است. به علت انتقاداتی که از نظر معماری از تیرچه‌های تقویتی پوستهٔ بتنی ترمینال فرودگاه سن لوییز شده بود، پوستهٔ سهموی دوار در دنور بدون وجود این تیرچه‌ها طراحی شده بود. تدسکو معتقد است که ترک‌های این پوستهٔ سهموی، که حتی اغلب مردم اصلاً متوجه آن نشده‌اند، قابل پیشگیری بوده است و خود وی نیز به مدت دو دهه مرتباً آن‌ها را بازرسی کرده است. این اظهارنظر ناشی از خودستایی از کار خود و بزرگ‌نمایی اشتباه دیگران نیست، بلکه بیانگر آن است که وی به ارزش این نقایص، گرچه که وجود آن‌ها نامطلوب و ناخواسته است، به عنوان آزمایشات و تجربیاتی مقدر برای بهتر ساختن طرح‌های بعدی واقف است. تدسکو در این نوشتهٔ خود در بارهٔ سازه‌های پوسته‌ای بتنی، سرگذشت خرابی‌های بزرگ را با سرگذشت موفقیت‌های بزرگ درهم آمیخته است و چنین افزوده: " در این نوشته مثال‌های بسیار بیش‌تری از تجربیات ناموفق آورده‌ام زیرا در کارهای ضعیف و دارای عیب آسان‌تر می‌توان مواردی برای یادگیری استخراج کرد تا از کارهای خوب و موفق. " در نقد کارهای هنری و ادبی نیز چنین است، و بنابراین نبایستی تعجب‌آور باشد که هنرمندان و نویسندگان نیز همانند مهندسان معمولاً خود بزرگ‌ترین منتقد خود می‌باشند.

دانشجویان مهندسی خیلی زود متوجه می‌شوند که از هر اشتباه می‌توانند چیزهای فراوانی یاد بگیرند. اخیراً در دانشگاه دوک[۳] ، در یکی از درس‌های مهندسی، دانشجویان به‌منظور بررسی و آزمایش امکان

۱- Denver ، مرکز ایالت کلرادو آمریکا

۲- Ieoh Ming Pei ، (-۱۹۱۷م)، آرشیتکت آمریکایی (متولد چین)

۳- Duke University ، در دورهام ایالت کارولینای شمالی آمریکا

تولید مصالح سازه‌ای سبك جدید برای استفاده در شرایط بی‌وزنی، در تدوین آزمایشی برای تولید فلز به روش فرآیند اسفنجی، که در شاتل‌های فضایی مورد مصرف است، شرکت کردند. یکی از دانشجویان کلاس اذعان کرد که " مهندسی واقعی خیلی مشکل‌تر از آن است که فکر می‌کردیم، " و اضافه کرد که در این کلاس از شکست‌ها و اشتباه‌کاری‌ها چیزهای بسیاری یاد گرفته است. این دانشجویان به همان واقعیتی رسیده بودند که توماس هنری هاکسلی[1] در کتاب آموزش طب[2] گفته بود: " اشتباه‌کاری‌های اندك در اوایل کار، آثار سودمند عملی بزرگی در بردارد. "

---

۱ - Thomas Henry Huxley ، (۱۸۹۵-۱۸۲۵م)، بیولوژیست انگلیسی

2 - *On Medical Education*

۸

کمین حوادث

شامگاه روز جمعه هفدهم ژوئیه ۱۹۸۱ سالن جدیدترین هتل شهر کانزاس[1] مملو از جمعیتی بود که همراه با ترنم موسیقی به رقص و پایکوبی مشغول بودند. عدهٔ بسیار زیادی نیز روی راهروهای معلق زیبایی که فضای وسیع و مجلل این سالن بدون ستون را پوشانده بود ایستاده بودند، بسیاری از این‌ها هم با نوای آهنگ عروسك ملوس به زمین پا می‌کوبیدند و خود را به این سو و آن سو تاب می‌دادند. حرکت نوسانی آرام راهروها به این جشن شامگاهی اضافه شده بود، جشنی که سرانجام با فرو ریختن دو تا از راهروهای پر از آدم‌ها بر روی کف سالن، پر از جمعیت به فاجعه‌ای بزرگ تبدیل شد. بدین ترتیب بود که هتل هایت ریجنسی کانزاس[2] به بزرگ‌ترین تراژدی سازه‌ای در ایالات متحده آمریکا منجر شد، و غم و اندوه و ایراد اتهامات و بررسی‌های مفصل و طرح دعوی‌های بسیار تا چندین سال پس از وقوع حادثه ادامه داشت.

---

۱ - Kansas ، شهری در شمال شرقی ایالت کانزاس آمریکا

2 - Kansas Hyatt Regency Hotel

در این حادثه ۱۱۴ نفر کشته شدند و حدود ۲۰۰ نفر مجروح شدند، و طبق تخمین انجام‌شده حدود نصف مردم شهر کانزاس به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به نحوی درگیر این فاجعه شدند. بازماندگان حادثه از چگونگی امکان وقوع چنین فاجعهٔ وحشتناکی حیرت‌زده بودند، و رسانه‌های گروهی کشور اخبار مربوط به آن را با جزئیات کامل تا چندین روز در رأس مطالب خود قرار داده بودند. اما بزودی موضوع از صفحات اول روزنامه‌ها به کنار رفت و به‌تدریج، بجز روزنامه‌های شهر کانزاس که به‌طور مستقیم و ملموس درگیر قضیه بودند، توجه کم‌تر و کم‌تری به آن شد. روزنامه‌ها پای مهندسان مشاور را به میان کشیدند و از آن‌ها خواستند که موضوع را بررسی کرده و نظرات خود را در بارهٔ علل حادثه به خوانندگان روزنامه اعلام کنند. چهار روز پس از این شکست سازه‌ای، روزنامهٔ کانزاس سیتی استار[1] صفحهٔ اول خود را به نقشه‌های فنی جزئیات طرح اختصاص داده بود که در آن به قسمت معیوب طرح اشاره شده بود. در این گزارش محققانه، که جایزهٔ پولیتزر[2] را برد، نقطهٔ ضعف طرح مشخص شده بود و تشریح شده بود که چگونه یکی از میله‌های آویز از میان اتصال تیر پاره شده و باعث شروع خرابی در سازهٔ تضعیف‌شده گردیده است. خطای طراحی در نحوهٔ اتصال راهروی پایینی به راهروی بالایی و این راهرو به سقف سالن توسط میله به‌طور مشروح بیان شده بود و به‌عنوان علت اصلی حادثه معرفی شده بود.

نقشه‌های معماری طرح اصلی سیستم معلق راهروهای هتل نشان می‌داد که در هر تکیه‌گاه آن یك میلهٔ بلند وجود دارد که به سقف وصل

---

1 - *Kansas City Star*
2 - Pulitzer Prize

شده است و از میان تیرهای کف راهرو عبور کرده است. دو راهروی دیگر نیز توسط واشر و پیچ زیر یکدیگر آویزان شده بودند. اگر میله‌های طویل به اندازهٔ کافی قوی بودند، و واشرها و پیچ‌ها به اندازهٔ کافی بزرگ بودند، و تیرهای کف به اندازهٔ کافی استحکام داشتند تا بتوانند علاوه بر وزن خود راهروها نیروی ناشی از ازدحام جمعیت و حتی دویدن و پریدن یا رقصیدن آن‌ها را تحمل کنند، این طرح اصلی به‌طور اصولی کفایت لازم را دارا بود. مفاهیمی همچون " به اندازهٔ کافی قوی " و " به اندازهٔ کافی بزرگ " و " به اندازهٔ کافی مستحکم " به زبان اعداد و در قالب موضوعاتی مهندسی چون تنش و کرنش در آیین‌نامه‌های ساختمانی غالباً قانونمند شده است، ولی چنین آیین‌نامه‌هایی نیز معمولاً به‌طور مشخص و روشن شامل مسائل مربوط به سازه‌های خاص و منحصربه‌فردی چون راهروهای هتل هایت ریجنسی نمی‌باشند.

اما اگر حتی چنین آیین‌نامه‌هایی به‌طور مشخص و صریح از طراحی راهروهای معلق سخن نگفته باشند، به‌وضوح الزامات خاص برای مقاومت میله‌های فولادی در کشش را تعیین کرده و مشخصاتی از قبیل وزن مردمی که امکان دارد روی راهروهای هتل‌ها، چه از نوع غیرمعلق و چه از نوع معلق از سقف یا از راهرویی دیگر، تجمع کنند ارائه داده‌اند. بر اساس این استانداردها، مؤسسه ملی استاندارد اعلام کرد که طرح اصلی سیستم تکیه‌گاه‌های راهروهای هایت ریجنسی دست‌پایین طراحی شده بوده است. مقاومت این تکیه‌گاه‌ها فقط حدود شصت درصد مقاومتی بوده است که بایستی طبق آیین‌نامهٔ ساختمانی کانزاس داشته باشد. با این حال، از آنجا که تهیه‌کنندگان آیین‌نامه‌های ساختمانی طرح‌ها را در جهت ایمن در نظر می‌گیرند، به‌طوری که محدوده‌ای کافی برای احتمال امکان وجود خطا در فرضیات و محاسبات و همچنین اشتباهات در تولید فولاد و عملیات ساختمانی داشته باشد، الزامات آیین‌نامه‌ای متضمن ایجاد مقاومتی

بسیار بیش‌تر از حداقل مقاومت مورد نیاز می‌باشد. بدین ترتیب راهروها طبق طراحی اصلی آن‌ها، اگرچه آن‌طور که شاید و باید قوی نبوده است، لیکن احتمال داشته است که خراب هم نشود، و عدم تطابق آن با ضوابط آیین‌نامه‌ای هرگز برملا نگردد.

متأسفانه هیچ کدام از افرادی که جزئیات اتصال اصلی را نگاه کرده بوده‌اند، طرح بهتر یا ساده‌تری را برای آویزان کردن یك راهروی معلق از زیر راهروی دیگر و نگهداشتن هر دوی این‌ها از سقف سالنی به ارتفاع هجده متر ارائه نکرده‌اند، زیرا طرح اتصال مطابق نقشه‌های معماری اصلی از لحاظ نحوهٔ نصب کردن گرچه غیرعملی نبوده لیکن بسیار مشکل بوده است. فکر اولیه برای در نظر گرفتن یك میله از هر یك از محل اتصال‌ها در سقف سالن که چهار و نیم متر امتداد داشته و سپس از محل سوراخ تکیه‌گاه تیر راهروی طبقه چهارم عبور کرده و نه متر دیگر نیز ادامه یافته و سپس از میان تکیه‌گاه تیر راهروی بعدی عبور کند، از نظر کار ساخت و نصب واقعاً مشکل می‌باشد، و پیشنهادی در بارهٔ جایگزین کردن هر کدام از میله‌های فوق با دو میلهٔ کوتاه‌تر، که میلهٔ اولی سقف را به کف راهروی بالایی و میلهٔ دوم راهروی بالایی را به راهروی بعدی متصل سازد، می‌توانست سریعاً مورد استقبال هر فردی که درگیر کار نصب راهروها می‌باشد قرار بگیرد.

در طرح اصلاح‌شدهٔ اتصال، میلهٔ نگهدارنده‌ای از سقف پایین آمده و از میان تیر کف راهروی بالایی عبور کرده و در آن طرف تیر به واشر و مهره‌ای منتهی می‌شد که تیر روی آن قرار می‌گرفت. چند سانتیمتر آن طرف‌تر از این محل، میلهٔ دیگری با واشر و مهره از سوراخ میان تیر به‌طرف پایین عبور کرده و از انتهای آن نیز کف راهروی پایینی به همان روش قبلی آویزان می‌گردید. بدیهی است که این سیستم اتصال از لحاظ سرهم‌بندی کردن راهروها بسیار ساده‌تر است، زیرا رزوه کردن دو

سر میله و مهره بستن آن‌ها بسیار ساده‌تر از رزوه کردن سراسر میله‌ای به طول چهارده متر و بستن مهره در وسطهای آن می‌باشد. اما این سیستم اتصال جدید هر چقدر هم که از نظر نحوهٔ نصب کردن آسان باشد، عملاً فشار وارد به واشری که تیر راهروی بالایی را نگهداری می کند دو برابر می‌سازد، و این مسأله به‌طور مضاعف باعث شد این راهروهایی که دست‌پایین نیز طراحی شده بودند حتی وزن خود را هم به‌سختی تحمل کنند.

برای درك سادهٔ مکانیزم این مسأله، دو راهروی آویزان از میله را به دو نفر که از طنابی آویزان هستند تشبیه می کنیم. در این حالت وزن هر کدام از این دو نفر از طریق فشار دست‌هایشان به طناب منتقل می‌شود. نحوهٔ نگهداشتن راهروها در طرح اصلی کاملاً مشابه با دو نفری است که به‌طور مجزا از دو نقطهٔ یك طناب آویزان باشند. اگر طناب به اندازهٔ کافی محکم باشد و هر کدام از این دو نفر بتوانند به اندازهٔ کافی طناب را محکم بچسبند، آن‌ها خواهند توانست آویزان باقی بمانند و سقوط نکنند. اما اگر نفر پایینی به‌جای گرفتن طناب اصلی، از طناب دیگری که به پای نفر بالایی وصل شده باشد آویزان شود، در این حالت قدرت چسبیدن دست‌های نفر بالایی به طناب بایستی وزن دو نفر را تحمل کند. در این حالت نه مقاومت طناب بلکه قدرت چسبیدن دست‌های نفر بالایی عامل بحرانی خواهد بود. اگر قدرت چسبیدن دست‌های این شخص برای نگهداشتن وزن خودش کافی باشد ولی توانایی کافی برای تحمل وزن دو نفر را نداشته باشد، آن‌گاه دست‌هایش بر اثر این نیروی کشش زیاد دچار مشکل خواهد شد، به‌طوری که با اندك تکان نفر پایین دست‌های وی شل شده و هر دو به پایین سقوط خواهند کرد.

به دنبال فاجعهٔ هتل هایت، مؤسسه ملی استاندارد اعلام کرد علاوه برآنکه طرح اصلی مقاومت لازم را نداشته است، طبق آزمایشات انجام

شده بر روی اتصالات تیر و میله معلوم شده است که راهروهای ساخته شده حتی به سختی قادر به تحمل وزن خود بوده‌اند، و این بدان معنی است که راهروهای هتل وضعیتی داشته که در انتظار وقوع حادثه کمین کرده بوده است.

در طول دورهٔ ساخت هتل هایت ریجنسی، چندین حادثه اتفاق افتاده بود که می‌توانست باعث کشف ضعف راهروها گردد، لیکن همانند برخی اخطارها و تهدیدهای خودکشی‌های احتمالی، این علائم ـ بالقوه فاجعه‌بار مورد اعتنا قرار نگرفته بوده‌اند. در هنگام ساخت هتل یك بار سقف سالن فرو ریخت و به‌دنبال آن مقرر شد بسیاری از جزئیات سازه‌ای از جمله راهروها کنترل شوند، اما اتصالات میله و تیر راهروها کنترل نشدند و یا کنترل آن‌ها ضروری تشخیص داده نشد. پس از نصب راهروها گزارش‌هایی از کارگران ساختمانی مبنی بر متزلزل بودن راهروها در هنگام عبور فرغون سنگین مصالح ساختمانی می‌رسید، اما به‌هرحال حمل و نقل این مصالح به‌طور عادی برقرار بود و ظاهراً باز هم نیازی به کنترل طرح احساس نگردید.

گرچه سخن گفتن راجع به چیزی که قبلاً اتفاق افتاده است آسان است، اما به‌هرحال حلقهٔ ضعیف راهروهای معلق هتل هایت ریجنسی در میان تعداد بی‌شماری جزئیات طراحی دیگر به‌نحوی از نظرها دور ماند. پس از حادثهٔ فرو ریختن راهروها انتقادها و راه‌حل‌های بسیاری ارائه شد که همگی علاج حادثه را پس از وقوع آن و معلوم شدن مشکل کار مطرح می‌کردند، و در این میان بیش‌ترین شواهد و نظرات به سوی بخش نامه به سردبیر مجلهٔ انجینیرینگ نیوز رکورد[1] سرازیر شده بود. در نقشه‌های جزئیات اصلی مشخص نشده بود که این میله‌های طویل دقیقاً

---

1 - *Engineering News Record*

چگونه بایستی ساخته شوند. در واقع، در نقشه‌هایی که به‌عنوان نقشه‌های اصلی منتشر شده بود، مهره‌ای در فاصلهٔ حدود چهار و نیم متری از انتهای میله نشان داده شده بود، و طبیعی بود که بسیاری از خواننده‌های مجله سر خود را بخارانند و بپرسند که این مهره چگونه می‌تواند آن‌جا برود. برای این کار می‌بایستی طول میله از محل مهره تا انتهای آن رزوه شود، که چنین چیزی در نقشه نشان داده نشده بود، یا اینکه ناحیهٔ رزوه‌شده در اطراف مهره قطورتر از بقیهٔ طول میله بوده باشد. یکی از خوانندگان نظرات دیگران را چنین جمع‌بندی کرده بود: " نبایستی توقع داشت جزئیات ناقصی که در عمل محتاج تغییراتی است پس از انجام تغییرات کاملاً بی‌عیب گردد. "

طی یك ماه که نامه‌هایی در بارهٔ ابراز شگفتی از معمای قرار دادن مهره‌ای در فاصلهٔ چهار و نیم متری از انتهای میله به دفتر مجله می‌رسید، همچنین نامه‌هایی نیز از بعضی خوانندگان مجله می‌رسید که تحت عنوان " پاسخ معمای هایت " چاپ می‌شد. یکی از این خوانندگان اشاره می‌کرد که چگونه می‌توان دو میله را در محل اتصال توسط مهره ماسوره به یکدیگر بست، و خواننده‌ای دیگر پیشنهادی عملی ارائه کرد که مطابق آن می‌توان برای ساخت تیر قوطی شکل راهروها از دو نبشی، آن‌ها را طوری جوشکاری کرد که سطح تکیه‌گاه مقاوم‌تری به‌دست آید. می‌توان تصور کرد که چه میزان پیشنهادات چاپ‌نشده‌ای به دفتر مجلهٔ انجینیرینگ نیوز رکورد رسیده بوده است. پس از اینکه من طی مقاله‌ای در مجلهٔ تکنولوژی ریویو شکست هتل هایت ریجنسی را مورد بحث قرار دادم، سردبیر آن مجله نیز نامه‌های بسیار زیادی در بارهٔ جزئیات راهروها دریافت کرد. خوانندگان این مجله نیز، که به‌نظر می‌رسید مجلهٔ انجینیرینگ نیوز رکورد را نخوانده باشند، پیشنهاداتی از قبیل استفاده از مهره ماسوره و حدیدهٔ شکاف‌دار و تعدادی راه‌حل‌های دیگر ارائه کرده

بودند.

به‌هرحال، توضیح اشتباهات راهروهای هتل هایت و ارائه راه‌حل‌ها و تغییراتی که می‌توانسته‌اند کارساز باشند بسیار ساده‌تر از یافتن اشتباه در طرحی است که بایستی مورد بررسی قرار گیرد. پس از وقوع حادثه، معمای مشخص و تعریف‌شده‌ای وجود دارد که هوش و نبوغ فرد بایستی برای حل آن تلاش کند. اما قبل از وقوع حادثه، انسان نه تنها بایستی معمای طرح را مشخص کند بلکه باید پاسخ‌های خود را نیز از طریق کنترل کردن همهٔ راه‌های ممکن برای ایجاد شکست در آن ارزیابی کند. می‌توان پرسید که چند نفر از میان کسانی که به این مجلات نامه نوشته بودند می‌توانسته‌اند قبل از اینکه جزئیات معیوب راهروها از میان ده‌ها جزئیات دیگر، چه در راهروها و چه در همهٔ دیگر قسمت‌های هتل، انگشت‌نما شده باشد اشتباه طراحی آن را بیابند. مجموعهٔ اتصال میله و تیر قبل از آنکه دچار شکست شود نمی‌تواند به این آشکاری توجه فردی غیرمتبحر را جلب کند.

نامه‌ها و سرمقاله‌ها و گزارش‌هایی که در نشریات تخصصی مهندسی به چاپ می‌رسید حاکی از آن بود که به اعتقاد آنان اگر طراحان و مهندسان باتجربه درگیر این کار بودند حادثهٔ هایت ریجنسی اتفاق نمی‌افتاد. زیرا این متخصصان باتجربه به احتمال بسیار قوی از طرح جزئیات آزموده و درستی استفاده می‌کردند که از کفایت آن اطمینان داشته باشند و یا در صورت استفاده از طرح غیرمتداولی همانند آنچه که برای تکیه‌گاه راهروها ارائه شده بود آن را به‌دقت مورد بررسی قرار می‌دادند. البته، چنین مدعایی هرگز قابل اثبات یا نفی نمی‌باشد، اما بدون تردید احتمال کشف اشتباه در طرح یا شناسایی عدم کفایت چیزی برای کسی که تجربه و تبحر زیادی دارد بیش‌تر است. در هر صورت، همان‌طورکه هر کسی که ماجرای پل تاکوما را بداند هرگز در طراحی

پل‌های معلق اثر عامل باد را از نظر دور نخواهد داشت، هر کسی هم که ماجرای راهروهای معلق هتل هایت را به خاطر داشته باشد هرگز اجازه نخواهد داد که اتصال تیر به میله‌ای بدون بررسی دقیق از زیر دستش بگذرد. بدون شك این فاجعه بسیاری از طراحان کم‌تجربه را صاحب تجربیات ارزشمندی کرده است. و با به خاطر سپردن دقیق این درس‌ها در اذهان مهندسان جوان، چنین شکست‌هایی، جزئی دائمی از مدارك و منابع کار مهندسی خواهند شد.

دادستان آمریکا و بازرس ایالت میسوری، پس از بیست ماه تحقیق، متفقاً اعلام کردند که هیچ شواهدی حاکی از وقوع جرم در رابطه با خراب شدن راهروهای هتل هایت نیافته‌اند. دو ماه بعد از اعلام این نظر، دادستان کل میسوری شکایتی علیه مهندسان مسؤول طراحی هتل اقامه کرد. این مهندسان به " قصور بزرگ " در طراحی و آنالیز راهروهای معلق متهم شده بودند. اینـــان مخصوصاً به کوتاهی در " انجام محاسبات و تعیین ظرفیت باربـــری میـــله‌ها و اتصالات راهرو " ، و کـــوتاهی در " کنترل کفایت میله‌های تعیین‌شده پس از انجام تغییرات طراحی " و کوتاهی در " بررسی مجدد سیستم راهروهای معلق مطابق درخواست کارفرما پس از فرو ریختن قسمتی از سقف سالن در حین عملیات ساختمانی " متهم شده بودند. حقوق نیز علمی دقیق‌تر و کامل‌تر از مهندسی نیست، و در زمان نوشتن این متن، نکات قوت و ضعف دعوی دادستان در انتظار آزمون محاکمه است.

هنگامی که یکی از میله‌های آویز از میان اتصال تیر راهروی هتل هایت بیرون آمده است، آن میله دیگر قادر به تحمل سهم خود از نیروی وزن راهرو و مردم روی آن نبوده است، اما چنانچه سازه تا این میزان به‌طور حدی طراحی نشده بود، میله‌های دیگر می‌توانستند این نیرو را بین خود تقسیم کرده و تحمل کنند و احتمالاً فقط در محل

اتصال ِ کنده‌شده مقداری افت به‌وجود آید. این موضوع باعث هشدار و جلب توجه مدیریت هتل می‌شد، و آن‌گاه اگر به این هشدار اهمیت بیش‌تر و جدی‌تری از علائم تزلزل آن در هنگام عملیات ساختمانی داده می‌شد، احتمالاً این فاجعه هرگز اتفاق نمی‌افتاد. به همین سبب است که مهندسان غالباً سعی می‌کنند برای سازه‌های خود تمهیداتی را بیاندیشند که مسیرهای جایگزین برای انتقال نیرو[1] می‌نامند، تا هرگاه هرکدام از مسیرهای انتقال نیرو به هر دلیلی از کارآیی و ایفای وظیفه باز بماند، مسیر جدیدی برای انتقال ترافیك تنش‌ها و کرنش‌ها مهیا باشد.

هرگاه مسیرهای جایگزین برای انتقال نیرو نتوانند ترافیك اضافی را عبور دهند و یا اصولاً چنین مسیرهایی وجود نداشته باشد، شکست‌های فاجعه‌آفرین در کمین خواهند بود. راهروهای هتل هایت در واقع نوعی پل بر روی سالن هتل بودند، و پل‌ها به‌خاطر وضعیت خاص کاربردی آن‌ها از حساسیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در خصوص این راهروهای معلق، محدودیت معماری خاصی به لحاظ رعایت باز بودن محیط بزرگ سالن اصلی، که به‌عنوان مشخصهٔ ویژهٔ هتل‌های هایت در دنیا شناخته شده است، وجود داشت. وقتی این راهروها خراب شدند، نگرانی عمیقی در بارهٔ ایمنی طرح‌های سالن‌های دیگر هتل‌های آن به‌وجود آمد، اما هیچ‌کدام از آن‌ها دارای سیستمی همانند هتل شهر کانزاس نبودند. بررسی کنندگان هتل هایت ریجنسی شهر شیکاگو استفاده از محوطهٔ معلق سالن هتل را تا زمان تقویت کردن آن محدود کردند، اما اثرات اصلی شکست هتل کانزاس بر روی طرح ساختمانی جدیدی خواهد بود که شباهتی به راهروهای نگون‌بخت داشته باشد.

چند روز پس از سقوط دو راهروی معلق، علی‌رغم اعتراضات شهردار

---

1 - alternate load paths

کانزاس، سومین راهرو که همچنان سالم آویزان مانده بود شبانه پایین آورده شد. صاحبان هتل اظهار می‌کردند که راهروی باقی‌مانده برای کارگران و دیگران مظهر بروز خطر بود، اما وکلای تعدادی از قربانیان ادعا می‌کردند با این کار شواهد لازم از بین می‌رود، و مهندسانی هم که به بررسی و مطالعهٔ موضوع علاقه داشتند از برچیده شدن تنها سازهٔ موجودی که تقریباً همانند سازه‌های خراب‌شده بود افسوس خوردند. اگر راهروی سوم این قدر شتابان برچیده نمی‌شد، با بررسی رفتار راهرو در زیر پای کسانی که می‌رقصیدند امکان اثبات یا نفی این نظریه وجود داشت که علت خرابی راهروها واکنش آن‌ها نسبت به موسیقی تمپوی رقص بوده است، همان‌طور که یك گیلاس شیشه‌ای ممکن است بر اثر صدای بسیار زیر نت موسیقی بشکند.

در حال حاضر سالن هتل هایت ریجنسی کانزاس دارای فقط یك راهرو است که بر روی ستون‌هایی قوی نصب شده است. گرچه با این کار پهنهٔ وسیع سالن هتل از لحاظ معماری دچار نقص شده است، ولی به‌طور مشخص طرح جدید قصد داشته است که احساس ایمنی کافی به‌وجود آورده و از ایجاد شباهت به راهروهای شکنندهٔ قبلی پرهیز کند.

حدود دو سال پس از سقوط راهروهای هتل هایت ریجنسی، قسمتی از پل شاهراه کانتیکات[1] در روی رودخانه میانوس[2] به عرض سه باند و طول سی متر به‌طور ناگهانی از بالای این بزرگراه مرتفع فرو ریخت. در این حادثه چهار اتومبیل از ارتفاع بیست‌متری به کنارهٔ رودخانه سقوط کردند، سه نفر از سرنشینان آن‌ها کشته شدند و سه نفر دیگر مجروح شدند. اگر این سازه در ساعات اولیهٔ صبح که ترافیك بزرگراه خیلی سبك

---

۱ - Connecticut ، ایالتی در شمال شرقی آمریکا

2 - Mianus River

است خراب نشده بود قربانیان بیش‌تری برجای می‌گذاشت، زیرا از این بزرگراه اصلی معمولاً روزانه حدود یکصد هزار وسیلهٔ نقلیه عبور می‌کنند. گرچه تغییر مسیر ترافیك عبوری از این شاهراه باعث ناراحتی و دردسر برای شهرهای کوچك اطراف آن شد، ولی راه‌های دیگری بین کانتیکات و نیویورك وجود داشت که می‌توانست جایگزین مسیر قبلی گردد. به‌هرحال، علت شکست پل آن بود که پس از شل شدن قسمتی از آن، هیچ مسیر جایگزین با ظرفیت کافی برای تحمل مسیر تغییریافتهٔ وزن سازه وجود نداشت.

پل میانوس از نوعی بود که آن را " دهانه آویزان با اتصال مفصلی پین‌دار "[1] می‌نامند، و به‌علت اینکه تقاطع پل با رودخانه زاویه‌دار بود، پل در محل تکیه‌گاه‌ها به‌صورت اریب قرار گرفته بود. دو گوشه از چهارگوشهٔ قسمتی از پل که فرو ریخته بود، به‌صورت آویزان از قسمتی از پل قرار داشت که خود این قسمت به‌صورت طره‌ای از پایه‌های پل قرار گرفته بود. وسیلهٔ آویزان کردن شبیه به قطعهٔ اتصال زنجیر دوچرخه بود، که یك انتهای آن به تیر طره‌ای پین شده بود و انتهای دیگر نیز به یکی از تیرهای دهانهٔ آویزان. این قطعه‌های اتصال[2] دارای طولی بیش از صد و هشتاد سانتیمتر بوده و با پین‌هایی فولادی به قطر هجده سانتیمتر که از میان قطعه‌های اتصال و تیرها عبور کرده بودند اتصال دو قسمت پل به یکدیگر انجام شده بود. برای ثابت نگهداشتن پین‌ها در محل خود، پیچی از میان سوراخی در طول پین عبور کرده و توسط واشرهای بزرگ و ضخیم در دو پهلوی قطعه‌های اتصال در جای خود نگهداشته شده بود.

---

1 - pin-connected hung span
2 - link

بررسی‌هایی که پس از وقوع حادثه توسط شورای ملی ایمنی حمل و نقل[1] انجام گردید، بدون کم‌ترین تردیدی معلوم کرد که سقوط پل میانوس پس از شکست یکی از قطعه‌های اتصال صورت گرفته است. البته، علت دقیق شکست این قطعهٔ اتصال مورد اختلاف بود. بعضی از مشاوران وضعیت اریب طرح پل را مورد انتقاد قرار دادند که باعث ایجاد نیروهایی شده بود که پس از بیست و پنج سال کارکرد پل یکی از پین‌های آن را شل کرده بود. شرکتی که پل را طراحی کرده بود مستندات خود را عمدتاً متوجه عدم نگهداری صحیح به‌عنوان عاملی در جهت ایجاد شکست کرده بود، زیرا سیستم زهکش پل با انجام یك لایهٔ روکش عملاً پوشانده شده بود و به اعتقاد آنان این کار باعث شده بوده است که آب باران به همراه نمك‌های موجود قطعه‌های اتصال را دچار خوردگی شدید کند. مسؤولین حمل و نقل ایالتی به عدم زهکشی صحیح سازه اذعان داشتند، ولی مدعی بودند که طراحان پل در محاسبات جزئیات اشتباه کرده‌اند. شکست پل میانوس یادآور شکست پل پوینت پلزنت[2] رودخانهٔ اوهایو[3] در سال ۱۹۶۷ بود. این پل پانصد و سی متری به مدت سی و هشت سال ترافیك بین گالیپولیس[4] در اوهایو و پوینت پلزنت در ویرجینیای غربی[5] را برقرار کرده بود، تا اینکه در ساعات شلوغ ترافیك و در حالی که حدود هفتاد و پنج اتومبیل روی آن بود به‌طور ناگهانی فرو ریخت و باعث کشته شدن چهل و شش نفر گردید. عرشهٔ پل نقره‌ای[6] (پل پوینت پلزنت به این نام مشهور شده بود، زیرا اولین پلی بود که با رنگ

---

1 - National Transportation Safety Board

2 - Point Pleasant

۳- Ohio River ، رودی در شرق آمریکا

4 - Gallipolis

۵- West Virginia ، ایالتی در شرق آمریکا

6 - Silver Bridge

آلومینیمی رنگ‌آمیزی شده بود) از کابل‌های سیمی مدور که در اغلب پل‌های معلق مدرن متداول است آویزان نشده بود، بلکه از دو زنجیر غول‌پیکر آویزان شده بود که از قطعه‌های اتصال، یا "میله‌های گوشواره‌ای"[1]، به‌طول پانزده متر ساخته شده بودند. این اولین پلی بود که در آن از میله‌های گوشواره‌ای که از فولاد مقاوم مخصوص ساخته شده بود استفاده می‌شد، و این میله‌ها همانند سیستم زنجیر دوچرخه توسط واشر و پیچ به یکدیگر متصل شده بودند. این نوع شکل‌بندی نه فقط کار بازرسی اجزاء را مشکل کرده بود بلکه به ایجاد خوردگی در طی سال‌های متمادی کمك می‌کرد. با توجه به اینکه چنین زوال تدریجی اجزاء از نظرها دور مانده بود، بر اثر فرآیند پیشرفت ترك ناشی از خستگی که عامل خوردگی نیز آن را تسریع می‌کرد، درزهای کوچکی که از حفره‌های درون فولاد قطعه‌های اتصال سرچشمه می‌گرفتند شروع به توسعه کردند. وقتی ترك یکی از قطعه‌های اتصال آن را آن‌قدر ضعیف کرد که مقاومت قطعه کم‌تر از نیروی وارد بر آن گردید، این قطعه پاره شد. نیرویی که قبلاً توسط قطعهٔ پاره‌شده تحمل می‌شد اینك بایستی توسط دیگر قطعه‌های موجود تحمل شود، و زنجیر به‌دلیل وضعیت هندسی نامتعادل جدید دچار پیچش گردید. این مسأله باعث شد که بقیهٔ قطعه‌های اتصال از پین‌ها جدا شود، و بدین ترتیب مسیر انتقال نیرو به پایه‌های برجی پل قطع شد، و پل به یکباره سقوط کرد.

مسائل اصلی این شکست‌ها ـ راهروهای معلق هتل هایت ریجنسی و پل رودخانهٔ میانوس و پل نقره‌ای ـ در طرح جزئیات آن‌ها نهفته است. اتصالات راهروهای معلق از ابتدا مقاومت کافی را نداشتند و پل‌ها نیز عملاً دارای قطعه‌های اتصال ضعیفی بودند که به مرور زمان ضعیف‌تر

---

1 - eyebar

شدند. آیا می‌توان به‌طور عام نظر داد که همهٔ سازه‌هایی که در شرایط فقدان و از کار افتادن یکی از اتصالات خود قادر به تحمل سیستم نباشند بایستی کنار گذاشته شوند با این نیت که مبادا شکست یکی از این جزئیات باعث خرابی و فاجعه گردد؟ اگر چنین باشد بایستی کلیهٔ هواپیماهای دی‌سی- ۱۰ را زمین‌گیر کرد، همان‌طور که پس از سقوط یکی از این هواپیماها در سال ۱۹۷۹ در فرودگاه اوهیر[1] شیکاگو تا مدتی از پرواز کلیهٔ آن‌ها جلوگیری به‌عمل آمد. موتورهای هواپیمای دی‌سی- ۱۰ توسط اتصال پین به بال وصل شده است، و گمان می‌شد که هواپیمایی که در فرودگاه شیکاگو سقوط کرد در هنگام برخاستن از باند دچار مشکلی همانند مسأله سیستم پین قطعهٔ اتصال در پل‌ها در ساعات سنگین ترافیك گردیده است. آنچه که بر سر هواپیمای دی‌سی- ۱۰ آمده بود این بود که پس از پیاده کردن موتور هواپیما برای کارهای تعمیراتی، آن را به‌نحوی سوار کرده بودند که طراح هواپیما چنان وضعیتی را پیش‌بینی نکرده بوده است. بنابراین بال هواپیما که این قطعهٔ اتصال (ویا پایلون[2] در اصطلاح صنعت هواپیمایی) به آن وصل شده بود در اطراف سوراخ پین دچار پارگی شده بود، همان‌طور که سوراخ کاغذ کلاسور بر اثر حرکات شدید کاغذ یا استفادهٔ ناصحیح از آن دچار پارگی می‌شود. اگر نخواهیم که ورق‌های با ارزش خود را از دست دهیم، بایستی به محض مشاهدهٔ آثار پارگی در اطراف سوراخ کاغذها آن‌ها را با برچسب‌های سوراخ‌دار مخصوص تعمیر کنیم، یا اینکه بایستی عادت خود را تغییر دهیم و کاغذها را ملایم‌تر ورق بزنیم. بر اساس آنکه از دست دادن یك ورق از میان مدارك تا چه حد برای ما اهمیت داشته باشد،

---

1 - O'Hare Field
2 - pylon

بایستی مطابق آن تمهیدات مناسب برای جلوگیری از آن را بیاندیشیم. اگر از کلاسورهای دو سوراخه استفاده می‌کنیم، می‌توانیم آن را با کلاسور سه سوراخه جایگزین کنیم تا در صورت پاره شدن یك سوراخ، مسیر جایگزینی برای انتقال نیرو داشته باشیم. و اگر از قبل از کلاسورهای سه‌سوراخه استفاده می‌کرده‌ایم، هر چند وقت یك‌بار کلیهٔ سوراخ‌های کاغذها را بررسی کنیم و آن‌هایی را که دچار پارگی بیش از حد هستند تقویت و اصلاح کنیم. اما ملاحظه می‌شود که متأسفانه معمولاً فقط وقتی به فکر تعمیر و اصلاح این سوراخ‌ها می‌افتیم که یکی از آن‌ها پاره شده و گم شده باشد و یا در معرض افتادن از میان دیگر اوراق باشد.

با توجه به اینکه تا قبل از سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰ گمان نمی‌رفت که مجموعهٔ سیستم اتصال موتور به بدنه دچار اشکال شده باشد، توجه خاصی به آن نشده بود. ولی به‌محض آنکه پس از سقوط یکی از آن‌ها در شیکاگو ترك‌های موجود در بال به‌عنوان عامل سقوط شناسایی گردید، بال‌های همهٔ هواپیماهای دی‌سی- ۱۰ که پرواز آن‌ها تا مشخص شدن علت سقوط آن هواپیما به حالت تعلیق در آمده بود، مورد بازرسی قرار گرفتند. در محل اتصال پایلون چندین هواپیما تعدادی ترك شناسایی شد، و بالاخره مشخص شد که ترك‌ها به‌دلیل عملکرد اشتباه و غیرپیش‌بینی‌شده در حین تعمیرات به‌وجود آمده‌اند. با شناسایی این نقطهٔ ضعف طراحی هواپیما، به هواپیماهایی که دارای هیچ ترکی در قسمت پایلون نبودند اجازهٔ پرواز داده شد، و آن‌هایی که ترك داشتند تحت تعمیر قرار گرفتند، و از آن به‌بعد پایلون کلیهٔ این هواپیماها تحت بازرسی و مراقبت مخصوص قرار گرفتند. همچنین، روش متداول تعمیر آن‌ها که منجر به این شکست شده بود تغییر داده شد، و اصولاً به چنین تکنیك‌های تعمیراتی توجه بیش‌تری مبذول گردید. هواپیماهای دی‌سی-

۱۰ همچنان به پرواز ایمن خود ادامه می‌دهند، و درسی که از حادثهٔ آن آموخته شد از خاطره‌ها فراموش نخواهد شد.

درس‌های حاصل از شکست‌ها عموماً نقاط ضعف طرح‌ها را مورد موشکافی دقیق قرار می‌دهند. سازه‌های موجود را نیز که دارای چنین نقاط ضعفی هستند می‌توان با ایمنی کامل مورد استفاده قرار داد، زیرا علم به آن موارد ضعف، پشتیبانی قوی برای این ساخته‌ها می‌باشد. در طراحی‌های آتی از این نقاط ضعف می‌توان پرهیز کرد و یا آن‌ها را تقویت کرد، و می‌توان ادعا کرد که دانش مربوط به گروه سازه‌هایی با چنان نقاط ضعف خاص، از عامل شکست به‌نحوی بهره برده است که سال‌ها و قرن‌ها استواری پل‌ها و آویزان ماندن راهروهای معلق یا پرواز هواپیماهای دی‌سی- ۱۰ نمی‌توانسته است آن بهره‌مندی را نصیب آن کند. بدین سبب است که برای مهندسان مطالعهٔ شکست‌ها، حداقل به میزان مطالعهٔ موارد توفیق و حتی بیش از آن، از اهمیت بسزایی برخوردار است، و بسیار ارزشمند خواهد بود که دلایل شکست‌های سازه‌ای به‌طور هرچه آشکارتر و گسترده‌تر مورد بحث و بررسی قرار گیرد. مهندس جوانی که به دنبال الگوهایی در میان سازه‌های موجود است چنانچه از نقاط ضعف آن‌ها اطلاع نداشته باشد، چنین نقاط ضعفی به‌طور ناخواسته به طرح سازه‌های وی راه پیدا خواهد کرد. در حالی که اگر علل شکست‌ها فهمیده شود، آن‌گاه هر سازهٔ مشابه دیگری مورد موشکافی دقیق قرار خواهد گرفت، و درس محرزی که از شکست هر سازه گرفته می‌شود این است که در طرح‌های آتی چه نباید کرد. این درس بسیار آموزنده است، و بنابراین شکست هر سازهٔ مهندسی، هر چقدر هم که فاجعه‌بار باشد، چندان هم بی‌ثمر نمی‌باشد.

۹

ایمنی به زبان ارقام

مهندسان می‌توانند از اشتباهات سازه‌ای آنچه را که نبایستی انجام دهند یاد بگیرند، ولی موفقیت‌های سازه‌ای لزوماً نمی‌تواند باعث یادگیری چگونگی انجام کار باشد، گرچه که این موفقیت‌ها را می‌توان بدون تغییری تکرار کرد. ولی حتی همین کار نیز با مخاطرات فراوانی روبرو است، زیرا وضعیت مطلوبی که مثلاً برای یك پل از لحاظ به‌کار بردن فولاد بدون عیب و نگهداری مناسب و عدم استفادهٔ بیش از ظرفیت و غیره وجود داشته است، ممکن است که برای پلی با همان طرح مشابه به دلیل به‌کار بردن فولاد نامرغوب و نگهداری نامناسب و اهمال‌کاری و استفادهٔ مداوم بیش از ظرفیت فراهم نباشد. بنابراین هر پروژهٔ جدید مهندسی، هر اندازه هم که به طرح‌های قبلی شبیه بوده باشد، بالقوه دارای خطر خرابی است. هیچ کس قادر نیست تحت چنین شرایط متلون و متنوعی به‌سر برد، و اگر روش‌های قابل قبولی برای مقابله با این همه تردیدها و عدم قطعیت‌ها و تغییرات در کار طراحی و ساخت وجود نداشت اضطراب و دغدغهٔ مهندسان واقعاً بی‌حد و حصر می‌بود. یکی از آرامش‌بخش‌ترین این روش‌ها، که عملاً در تمام کارهای طراحی مهندسی

اعمال می‌شود، ضریب اطمینان[1] می‌باشد.

ضریب اطمینان عددی است که غالباً از آن به " ضریب تجاهل "[2] یاد می‌کنند، زیرا باعث ایجاد محدوده‌ای برای پوشش دادن خطاها می‌گردد به‌طوری که می‌توان حضور مسائل عدیده‌ای چون قانون مورفی را بدون آنکه تهدیدی علیه موفقیت طرح مهندسی باشند تحمل کرد. با به‌کار بردن ضرایب اطمینان در طراحی پل، این اطمینان حاصل می‌شود پلی که در مصالح فولاد آن احیاناً ضعیف‌ترین فولاد قابل تصور در حین تولید به‌کار برده شده باشد خواهد توانست در مقابل عبور سنگین‌ترین کامیون قابل تصور از روی عمیق‌ترین گودال قابل تصور در یك هوای طوفانی مقاومت کند.

البته با توجه به اینکه تعیین ارقامی که بیان‌کنندهٔ بدترین وضعیت باشند نیازمند اظهار نظر و قضاوت می‌باشد، هدف طراح همواره ترجیحاً رسیدن به یك سازهٔ محکم می‌باشد تا یك سازهٔ شکننده. لیکن چون مقاومت اضافی نیز غیراقتصادی و غیرضروری است، مهندسان بایستی علاوه بر عوامل سازه‌ای با توجه به عوامل معماری و مالی و سیاست - گذاری‌ها تصمیم بگیرند که چه مقاومتی کافی می‌باشد.

ضریب اطمنیان از تقسیم کردن نیرویی که باعث شکست سازه می‌شود به ماکزیمم نیرویی که احتمالاً به سازه وارد خواهد شد به‌دست می‌آید. بنابراین اگر ظرفیت کابل یك بالابر ۳۰۰۰ کیلوگرم باشد و از این بالابر فقط برای بارهای کم‌تر از ۵۰۰ کیلوگرم استفاده شود، ضریب اطمینان کابل برابر ۶=۵۰۰ : ۳۰۰۰ خواهد بود. انتخاب ضریب اطمینان ۶ در طراحی بالابر بر اساس تجربه یا قضاوت طراح انجام می‌شود. چنین

---

1 - factor of safety
2 - factor of ignorance

ضریب اطمینانی باعث ساختن بالابری می‌شود که دارای محدوده‌ای ایمنی برای مقابله با خطاها و تردیدها در خصوص نوع مصالح و نحوهٔ به‌کار بردن بالابر خواهد بود. به‌عنوان مثال، گرچه ظرفیت اسمی بالابر ۵۰۰ کیلوگرم تعیین شده است، ولی ممکن است که کارگران بیش از این ظرفیت آن را بار بکنند و مثلاً گاهی تا حد ۷۵۰ کیلوگرم را بلند بکنند. همچنین، گرچه به کارگران گفته می‌شود که شروع یا توقف بالابر بایستی به آرامی صورت بگیرد، ولی می‌توان انتظار داشت که چنین دستورالعملی گاهی رعایت نشود، و باعث شود که به دلیل اثرات اینرسی نیروی وارد به کابل زیادتر شود. اگر فرض کنیم که چنین عاملی باعث دو برابر شدن اثر وزن یك بار ۷۵۰ کیلوگرمی گردد، آن‌گاه نیروی واقعی که به کابل وارد می‌شود برابر ۱۵۰۰ کیلوگرم خواهد بود.

نه فقط ممکن است که نیرویی معادل سه برابر آنچه که طراح تعیین کرده است به کابل وارد شود، بلکه ممکن است که مقاومت خود کابل نیز به دلایل متعددی ضعیف‌تر از مقدار تعیین‌شدهٔ ۳۰۰۰ کیلوگرم باشد. مثلاً ممکن است کابل از روی اشتباه به‌صورت نامناسبی وصل شده باشد یا اینکه بر اثر استفادهٔ زیاد یا به دلیل استفادهٔ غلط دچار فرسودگی و سستی شده باشد، بدین ترتیب اگر به دلایل خاصی کابل نتواند نیروی مؤثری بیش از ۱۵۰۰ کیلوگرم را تحمل نماید، آنگاه بر اثر بلندکردن نامناسب باری بیش از ظرفیت کابل پاره خواهد شد و بالابر دچار خرابی خواهد گردید. ملاحظه می‌شود که ضریب اطمینانی برابر ۶ برای پیش‌بینی و مقابله با شرایط نامناسبی که هم‌زمان اتفاق بیافتند ممکن است کافی نباشد. اگر اطلاعات مطمئن و دقیقی در مورد میزان استفادهٔ بیش از ظرفیت یا شدت ضربه در هنگام استفادهٔ نامناسب یا چگونگی آسیب یا میزان فرسودگی کابل در دست نباشد، به‌طور منطقی نمی‌توان عدد کوچك‌تری برای ضریب اطمینان در نظر گرفت. مهندس طراح برای جلوگیری از

شکست بالابر می‌تواند کابلی را که صد برابر محکم‌تر از ظرفیت اسمی بالابر باشد انتخاب کند. واضح است که چنین بالابری غیراقتصادی و بسیار حجیم خواهد بود و در مقایسه با بالابرهای سازندگانی که کم‌تر محافظه کار بوده‌اند خریدار کم‌تری خواهد داشت.

خوشبختانه از راه‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌توان میزان و حدی برای استفادهٔ بیش از ظرفیت بالابر در مواقع به کار بردن قرار داد. موتور بالابر را می‌توان طوری ساخت که فقط قادر باشد مثلاً ۷۰۰ کیلوگرم را بالا ببرد، و همچنین آن را می‌توان طوری طراحی کرد که موقع راه افتادن یا متوقف شدن نسبتاً بدون ضربه کار کند. کابل را نیز می‌توان قبل از نصب کردن با آویزان کردن وزنه‌ای، مثلاً ۱۵۰۰ کیلوگرمی، مورد آزمایش گواه[1] قرار داد و تأییدیهٔ لازم را کسب کرد، لیکن آن را نمی‌توان تا حد ظرفیت نهایی و کامل آن مورد آزمایش گواه قرار داد چون باعث پاره شدن و از بین رفتن کابل خواهد شد. با گذشت زمان و طی فواصل منظم بایستی بالابر را به‌منظور بررسی وضعیت مفتول‌های صدمه‌دیده یا پاره‌شدهٔ کابل مورد بازرسی دقیق قرار داد. انجام کلیهٔ چنین تمهیداتی به مهندس طراح این اطمینان را می‌دهد که ضریب اطمینان ۶ کم نخواهد بود.

تصور اصلی که در دل ضریب اطمینان نهفته است آن است که نحوهٔ شکست مشخص شده باشد، و نیرویی که باعث این شکست خواهد شد قابل محاسبه و یا قابل تعیین به‌طریق تجربی و آزمایش باشد. این موضوع دقیقاً مشخص می‌سازد که مهندس همواره در فکر اجتناب از شکست می‌باشد، و به‌همین سبب است که شکست سازه‌های واقعی بسیار مورد توجه مهندسان می‌باشد. با توجه به اینکه حتی سازه‌هایی که دچار شکست

---

1 - proof test

می‌شوند با استفاده از ضریب اطمینان طراحی می‌شوند، واضح است که در کار طراحی یا ساخت یا استفاده از سازه‌ای که دچار شکست شده اشکالی وجود داشته است. با کشف چنین اشکالاتی می‌توان هر تصور اشتباه از رفتار مصالح یا سازه‌ها را اصلاح کرد و از تکرار چنین اشتباهاتی جلوگیری نمود. در حالت کلی، معمولاً وقتی شکست‌های سازه‌ای اتفاق می‌افتد، در سازه‌های مشابه بعدی از ضریب اطمینان بزرگ‌تری استفاده می‌شود. از طرف دیگر، وقتی گروهی از سازه‌ها بسیار متداول می‌شوند و دچار شکست‌های غیرقابل توجیه نمی‌شوند، باور عمومی بدان سمت کشانده می‌شوند که طراحی چنین سازه‌هایی دست‌بالا بوده است، یعنی در طراحی ضریب اطمینانی بزرگ‌تر از مقدار لازم به‌کار برده شده است. بدین ترتیب در میان طراحان این اطمینان قوت می‌یابد که برای سازه‌هایی که احساس می‌کنند خوب می‌شناسند نیازی به استفاده از چنین ضریب تجاهل بالایی نمی‌باشد، و به‌تدریج در بین طراحان و تهیه - کنندگان آیین‌نامه‌ها اجماع عام به‌وجود می‌آید که در طرح‌های مشابه بعدی ضریب اطمینان بایستی کم‌تر شود. فرآیند افزایش ضریب اطمینان در پی به‌وجود آمدن حوادث و کاهش آن در پی عدم وجود حوادث، به‌طور واضح منجر به یك دور تسلسل از ایجاد شکست‌های سازه‌ای می‌گردد. به‌طور عینی، وجود چنین دور تسلسل در روند توسعهٔ پل‌های معلق پس از شکست پل تاکوما قابل مشاهده است.

در واقع استفاده از ضریب اطمینان موضوع جدیدی نمی‌باشد، در سال ۱۸۴۹ که کمیتهٔ سلطنتی انگلستان مسؤول بررسی استفاده از آهن در پل‌های راه‌آهن شده بود از مهندسان برجستهٔ آن زمان چنین نظرخواهی کرد: " به‌نظر شما چند برابر بزرگ‌ترین بار وارده به تیر بایستی باعث گسیختگی آن شود؟ " پاسخ‌های دریافتی از افرادی چون رابرت

استونسن[1] طراح پل بریتانیا، و ایزامبارد کینگدام برونل[2] مهندس راه‌آهن بزرگ غرب، و چارلز فاکس[3] مهندس کریستال پالاس، بین ۳ تا ۷ متغیر بود. و وقتی از آن‌ها نظرخواهی شد که: " قدرت تیر بایستی چند برابر بزرگ‌ترین بار وارده باشد تا بتواند از نظر شما قابل قبول و ایمن تلقی گردد؟ " پاسخ‌های دریافتی بین ۱ و ۳ متغیر بود. کمیتهٔ مذکور در گزارش خود چنین نتیجه‌گیری کرد که ضریب اطمینان مناسب برای تیرهای پل راه‌آهن ۶ می‌باشد.

سازه‌های واقعی فقط دارای تیر و شاه‌تیر نمی‌باشند، بلکه دارای ستون‌ها و دیگر اجزاء سازه‌ای گوناگون نیز می‌باشند، بنابراین راه‌های متفاوتی برای به‌وجود آمدن شکست متصور است، و در نتیجه هر سازه با ضریب اطمینان‌های متفاوت و گوناگونی مواجه می‌باشد. معمولاً وقتی از ضریب اطمینان یك سازه سخن گفته می‌شود منظور کوچك‌ترین این ضریب اطمینان‌ها است. طبق بررسی‌های سازه‌ای که توسط پروفسور دیوید بیلینگتن در دانشگاه پرینستون[4] انجام شده است ضریب اطمینان بنای یادبود جورج واشینگتن، اولین رئیس جمهور آمریکا، بر اساس سه نوع احتمال شکست محاسبه گردید: خرد شدن پایهٔ بنا به‌علت وزن بنای سنگی آن، واژگون شدن بنا در اثر باد، و ترك برداشتن در اثر وزش باد. دو نوع شکست اولی که در نظر گرفته شده بود دارای ضریب اطمینانی حدود ۹ بود، در حالی که شکست نوع سوم فقط دارای ضریب اطمینانی برابر ۳/۵ بود. با توجه به اینکه نیروی حاصل از باد با مجذور سرعت آن متناسب است، چنین ضریب اطمینانی بیانگر آن است که

---

1 - Robert Stephenson
2 - Isambard Kingdom Brunnel
3 - Charles Fox
٤ - Princeton University ، در شهر پرینستون ایالت نیوجرسی

هر گاه سرعت باد حدود دو برابر بزرگ‌ترین سرعتی باشد که در ناحیهٔ کلمبیا[1] می‌وزد آنگاه این بنای مشهور خراب خواهد شد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که ضریب اطمینان ۳/۵ تضمین خوبی در برابر امکان شکست این بنا باشد.

در حالی‌که در کلیهٔ کارهای طراحی مهندسی بایستی به‌طور صریح و آشکار ضریب اطمینان به‌کار برده شود، گاهی ضریب اطمینان در محاسبات به‌کار برده نمی‌شود، همانند چیزی که به‌نظر می‌رسد در طراحی راهروهای هتل هایت ریجنسی صورت گرفته بوده است. بررسی‌هایی که پس از حادثه توسط موسسهٔ ملی استاندارد در بارهٔ اتصالات راهرو به‌عمل آمد نشان می‌دهد که اتصالاتی که طراحی شده بوده‌اند به‌طور میانگین فقط قادر به تحمل نیرویی برابر ۸۴۰۰ کیلوگرم بوده‌اند، که تقریباً معادل وزن بار مردهٔ سازه در هر اتصال می‌باشد. یعنی ضریب اطمینان آن عملاً برابر ۱ بوده، و هیچ محلی برای جبران احتمال وجود خطا نداشته، و ظرفیت اضافه‌ای نیز برای تحمل وزن افرادی که روی راهرو راه می‌رفته‌اند یا می‌دویده‌اند یا می‌رقصیده‌اند نداشته است. حال چگونه است که طرحی با چنین ضریب اطمینان کم به مرحلهٔ ساخت در می‌آید، موضوعی است که در برابر دادگاه‌ها قرار دارد، و از آنجا که دعاوی و دعاوی متقابل بسیاری مطرح شده است، ممکن است که همهٔ ماجرا هنوز بروز داده نشده باشد. به‌هرحال، جدای از این مسائل، ممکن است این سؤال برای بعضی‌ها مطرح باشد که اصولاً چه لزومی وجود داشته است که چنین پل‌های آویزانی در سالن بزرگ هتل و بدون ستون‌هایی احداث گردد.

برای طراحی راهروهایی مانند راهروهای هتل هایت ریجنسی

۱- District of Columbia ، منطقه‌ای که شهر واشینگتن در آن جا قرار دارد.

کانزاس، ابتدا بایستی تصوری کلی از چگونگی پوشاندن دهانه‌ای به طول ۳۶ متر در بالای سالن بزرگ هتل داشت. اگر توجه کنیم که چنین کاری می‌بایستی بدون ایجاد مانع و مزاحمتی در سالن انجام شود، آنگاه چگونگی به‌وجود آمدن فکر استفاده از راهروهای معلق معلوم می‌شود. هدف اصلی از این کار آن بود که مشتریان هتل از یك طرف سالن، که اتاق‌هایشان آن جا قرار داشت، به طرف دیگر سالن، که اتاق‌های ملاقات و استخر شنا در آن جا قرار داشت، دسترسی داشته باشند بدون آنکه مجبور باشند به طبقهٔ همکف بروند و از میان سالن پر از ازدحام عبور کرده و دوباره در آن طرف به طبقات بالا بروند. چنین الزامات عملکردی و معماری مستلزم احداث پل بود، که دو طرف سالن به منزلهٔ دو ساحل آن و سطح سالن نیز به منزلهٔ رودخانه‌ای بود که نبایستی مزاحمتی برای ترافیك آن ایجاد می‌شد. چنین مشخصاتی دقیقاً به معنی استفاده از پل معلق می‌باشد، و بنابراین استفاده از راهروهای معلقی که از سقف سالن آویزان باشند مطرح گردید. سقف سالن هتل شامل چهار طبقه می‌شد و بنابراین لازم بود که در سه ارتفاع برای طبقات دوم تا چهارم پل زده شود، و همچنین بر اثر تصمیمات غیرسازه‌ای قرار شد پل معلق طبقهٔ چهارم درست بالای پل طبقهٔ دوم و با مقداری اختلاف با پل طبقهٔ سوم قرار گیرد. طراح با در نظر گرفتن این ایدهٔ کلی می‌بایستی با طراحی قطعات سازه‌ای آن را به مرحلهٔ عمل در آورد. علاوه بر فواصل تیرهای سقف که می‌تواند در تعیین محل‌های اتصالات آویزها مؤثر باشد، مسائل بسیاری نیز از قبیل اندازهٔ میله‌های آویز و نوع و اندازهٔ تیرها و جزئیات اتصالات وجود دارد که بایستی در بارهٔ آن‌ها تصمیمات لازم گرفته شود به‌طوری‌که نتیجهٔ مورد نظر با داشتن ضریب اطمینان مناسب حاصل شود.

تعیین اندازهٔ قسمت‌های مختلف به مهارت خاصی نیاز دارد، اندازهٔ

تیرها و شاه‌تیرهای راهرو تعیین‌کنندهٔ وزن راهرو است، و وزن راهرو نیز به‌نوبت خود تعیین‌کنندهٔ اندازهٔ تیرها و میله‌های نگهدارنده و غیره است. استفاده از کوچك‌ترین تیرهای ممکن منجر به ساخت راهروی سبك‌تر و ارزان‌تر می‌گردد. اما اگر تیر نسبت به طول آن زیاد کوچك باشد ممکن است که مقاومت آن در مقابل شکسته شدن یا خم شدن بر اثر وزن خود و وزن بتن کف راهرو و وزن افراد ضعیف باشد، و همچنین ممکن است بسیار انعطاف‌پذیر باشد به‌طوری که بر اثر دویدن بچه‌ها دچار ارتعاش شود یا خمیدگی زیادی در آن به‌وجود آید.

طراح قطعات مختلف را انتخاب می‌کند، آن‌ها را بر روی کاغذ سرهم‌بندی می‌کند، و سپس بارها و تغییرمکان‌ها و ضرایب اطمینان مختلفی را که به‌نظر وی مهم هستند محاسبه می‌کند. و در این مرحله است که وی عملاً نحوهٔ شکست سازه را در نظر می‌گیرد ـ مثلاً از طریق شکم دادن زیاد یا وارد شدن نیروی زیاد به تیر یا میله یا اتصال ـ زیرا فقط با داشتن ایده‌ای از نوع شکست است که می‌توان ضریب اطمینان را محاسبه کرد. در این مرحله از طراحی، تجربیات قبلی در مورد موفقیت‌ها و شکست‌های سازه‌ای کمك ارزشمند و مؤثری خواهند بود، زیرا آنچه که قبلاً تحت شرایط سازه‌ای مشابه توانسته کارآیی خود را نشان دهد می‌تواند در تعیین اندازه‌ها و جزئیات سازه به طراح اطمینان قلبی بدهد، و دانش وی در خصوص آنچه که قبلاً دچار شکست شده است به وی هشدار لازم را می‌دهد که به نقاط ضعف و حساس طرح توجه کافی داشته باشد. نوشدارو و اظهار نظرهایی که پس از حل شدن معما به طراحان راهروهای معلق تجویز می‌شد عموماً شامل انتقاداتی راجع به انتخاب تیر و میلهٔ آویز ضعیف بود، لیکن واضح است که طراح اصلی و آن کسی که تغییرات بعدی را در طرح داده بوده است یا این جزئیات را به‌عنوان حلقهٔ ضعیف محتمل طرح تشخیص نداده بوده‌اند و یا در محاسبهٔ

ضریب اطمینان آن اشتباه کرده بوده‌اند.

مثال عنوان‌شده در بارهٔ راهروهای معلق تأکیدی است بر نگرش طراحی از دیدگاه جلوگیری کردن از شکست. درحالی که الزامات اولیهٔ سازه‌ای برای پل زدن در جایی را می‌توان به‌صورت هدفی در نظر گرفت که از طریق استقرا قابل دست‌یابی است، موفقیت طرح مهندس بر روی کاغذ، که به یك فرضیه بدل شده است، هرگز از طریق قیاس قابل اثبات نمی‌باشد. هدف طراح عبارت است از شناسایی هر مورد نقیض در بارهٔ فرضیهٔ سازه‌ای که وی ساخته است. در خصوص پل‌های معلق هتل، فرضیهٔ اصلی از این قرار بوده است که طرح تهیه‌شده می‌تواند فضای بالای سالن را پوشش دهد بدون آنکه فرو بریزد. درستی این فرضیه هرگز قابل اثبات نبوده است، اما نادرستی آن از طریق آنالیز اتصالات میله به تیر و شناسایی عدم کفایت آن‌ها برای تحمل بارهای وارده قابل اثبات بوده است.

هر ایدهٔ جدید سازه‌ای- چه از نوع راهروی معلق در سالن هتل یا پل معلق در روی رودخانه یا جمبوجت اقیانوس‌پیما- فرضیه‌ای است که ابتدا بر روی کاغذ و در صورت امکان در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار می‌گیرد، ولی نهایتاً کارآیی آن از طریق عملکرد بدون شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با این‌حال، همان‌طور که نمونه‌های پل‌های معلق هتل هایت کانزاس و پل پوینت پلزنت و هواپیمای دی‌سی- ۱۰ نشان داده‌اند، حتی موفقیت طرح در یك سال یا چند سال پس از تکمیل آن نیز نمی‌تواند درستی فرضیه را ثابت کند. اگر اشتیاق انجام کارهای ناآزموده در انسان نبود، لذت استفاده از فضاهای معماری بدیع را نمی‌چشیدیم و کشتی برای عبور از رودخانه و هواپیمای جت برای گذر از فراز اقیانوس‌ها نداشتیم. گرچه طبیعت انسانی مستعد انجام اشتباهات است، لیکن ارادهٔ مصمم وی همواره پیروز است.

جستجوی مستمر ما برای درك چون و چراهای ناکامی‌ها و شکست‌هایمان تکنولوژی را به پیش رانده است، و ما همواره به‌دنبال عبرت گرفتن از اشتباهات خود بوده‌ایم تا از تکرار آن‌ها جلوگیری کنیم. اما شکست‌ها وجود دارد و اتفاق می‌افتد زیرا که طرح‌های سازه‌ای جدید یا مصالح جدید به‌طور مدام در محیط‌ها و شرایط جدید به‌کار برده می‌شوند، و کوچك‌ترین نشانه‌ای نیز وجود ندارد که بتوان گفت چنین ابداعات و تحولاتی بالاخره روزی کاملاً متوقف خواهد شد. به‌نظر می‌رسد که نمی‌توان با نیروی محرکهٔ تکنولوژیکی، این موجود انسانی برای ساختن ساختمان‌های هرچه بلندتر و پل‌های هرچه بزرگ‌تر مقابله کرد، حداقل صرفاً به این دلیل که چنین اهداف بلند و دهانه‌های وسیع در محیط وی وجود دارد که وی را برای دست‌یابی به آن‌ها وسوسه می‌کند. هر فرضیهٔ سازه‌ای جدید در معرض تهدید مردود شدن توسط موارد نقیض آن می‌باشد، و هر طراح لایق بلافاصله نسبت به هر نوع شکست محتمل که نظر وی را جلب کند اقدام لازم را به‌عمل می‌آورد.

گرچه مهندس طراح از تجربیات قبلی چیزهای بسیار می‌آموزد، اما به‌هرحال هر طرح جدید عملاً و الزاماً با خود عناصری از عدم‌اطمینان به‌همراه دارد. مهندسان همواره بیش از آنکه بدانند چه باید بکنند، می‌دانند که چه نباید بکنند. در این فرآیند کار طراحی وابسته به تجربه و بینش ذهنی است. مهندسان با آموختن تاریخچهٔ شکست‌ها و کامیابی‌های مهندسی توانایی‌های خود را برای پیش‌بینی رفتار طرح‌های ناآزمودهٔ خود افزایش می‌دهند. شکست‌ها خصوصاً بسیار آموزنده می‌باشند زیرا علائم و راهنمایی ارزشمندی در بارهٔ آنچه که اشتباه شده است و یا آنچه که ممکن است در طرح‌های آتی اشتباه‌ساز گردد به‌دست می‌دهند— در واقع این شکست‌ها نشان‌دهندهٔ موارد نقیض هستند.

البته اغلب فرضیه‌های طرح‌های مهندسی که ساخته شده‌اند خراب

نمی‌شوند، اما موفقیت‌های طرح‌های موجود از نظر خبری ارزشی معادل این خبر دارند که فلان مرد به بانك دستبرد نزده است یا سگی را گاز نگرفته است. فقط موارد غیرمتعارف و غیرمعمول است که به اخبار و مطبوعات راه پیدا می‌کند، و این موارد غیرعادی و نابهنجار است که بر سر زبان‌ها می‌افتد. بنابراین صحبت از شکست‌های مهندسی به‌طور غیرمستقیم تجلیل از موفقیت‌های بی‌شمار آن است.

۱۰

از ترک تا خرابی

ناقوس آزادی[1] که ترك آن یکی از مشهورترین شکست‌های مهندسی در دوران ما می‌باشد، نمادی بیش از یادبود استقلال سیاسی دارد. این ناقوس نشانگر شکوه و عظمت و همچنین تحمل خسارات و مشکلات استقلال تکنولوژیکی نیز می‌باشد که حاصل انقلاب صنعتی بوده است. اقدام جسورانه برای طراحی و اجرای سازه‌های مهندسی بزرگ‌تر و پیچیده‌تر و جاه‌طلبانه‌تر هرگز بدون خطرپذیری ممکن نبوده است، و سرگذشت نیروی بخار و راه‌آهن آکنده از خرابی‌ها و تلفات انفجارهای دیگ بخار و حوادث راه‌آهن می‌باشد. اگر در زمان حاضر نیز هنوز شکست‌های سازه‌ای وجود دارد، عمدتاً به این دلیل است که در دنیای صنعتی جدید نیز صف‌شکنانی تکنولوژیکی وجود دارند. این صف‌شکنان بدون خطرپذیری امیدی به جلو رفتن نخواهند داشت، و همین‌طور نیز در راه پیشرفت خود نیازمند اتکا به تجارب و کارهای انجام‌شدهٔ قبلی توسط بزرگان تکنولوژی هستند.

---

1 - Liberty Bell

سرگذشت ناقوس آزادی خود بیانگر فراز و نشیب توسعهٔ تکنولوژی است. ناقوس اصلی که در انگلستان ساخته شده بود در سال ۱۷۵۲ میلادی به آمریکا برده شده و با به صدا در آوردن آن در همان اوایل ترك برداشت. به‌علت فاصلهٔ طولانی تا محل ساخت اولیه، ناقوس را در همان فیلادلفیا[1] ذوب کردند تا دوباره بسازند. پس از ساختن آزمایشی، تعدادی ناقوس کوچك برای امتحان کردن صدا و مقاومت آن، ریخته‌گران آمریکایی کم‌تجربه تصمیم گرفتند که میزان مس برنز آن را افزایش دهند. با ساخته شدن ناقوس بزرگ معلوم شد که طنین آن بسیار ضعیف شده است و بنابراین مجدداً ذوب شد. برای بهتر کردن کیفیت صدا مقدار کمی نقره به آن اضافه شد، ولی انجمن ایالتی پنسیلوانیا از ناقوس جدید چندان راضی نبود و مذاکراتی برای گرفتن یك ناقوس دیگر از انگلستان به عمل آمد. سرانجام ناقوسی که خودشان ساخته بودند مورد قبول واقع شد ـ شاید به دلیل غرور ملی ـ و در چهارم جولای ۱۷۷۶ به نشانهٔ پذیرش اعلامیهٔ استقلال[2] به صدا در آمد.

در سال ۱۷۷۷ به دلیل نگرانی از پیشروی ارتش انگلستان، ناقوس آزادی از محل خود برداشته شده و در جای امنی نگهداری شد و سال بعد هنگام بازگرداندن آن به فیلادلفیا معلوم شد که به علت حمل و نقل نادرست صدمه دیده است. به مدت بیش از نیم قرن در مراسم یادبود و رویدادهای خاص این ناقوس به صدا در می‌آمد. در سال ۱۸۳۵ هنگامی که ناقوس را در مراسم بزرگداشت قاضی اعظم جان مارشال[3] به صدا در آوردند ناگهان یك ترك بزرگ در ناقوس آزادی ظاهر شد. تلاش‌هایی صورت گرفت تا از توسعهٔ ترك جلوگیری شود، اما تا سال ۱۸۴۶ که

---

۱ - Philadelphia ، شهری در جنوب شرقی ایالت پنسیلوانیا

2 - Declaration of Independence

۳ - john Marshall ، (۱۸۳۵-۱۷۵۵م)، حقوقدان و رئیس دیوانعالی آمریکا

ناقوس در مراسم یادبود تولد جورج واشینگتن[1] به صدا در آمد ترك ناقوس تا حد فعلی آن توسعه پیدا کرد.

همهٔ شکست‌ها همانند ترك ناقوس آزادی به‌طور ناگهانی نیستند. بسیاری از شکست‌های سازه‌ای به‌آهستگی توسعه پیدا می‌کنند به‌طوری که قبل از ایجاد خسارت غیرقابل جبران می‌توان با بررسی موضوع و انجام کارهای اصلاحی سازهٔ صدمه‌دیده را ترمیم کرده و مورد استفاده قرار داد. ساعت سیزده تنی بیگ بن[2] که در برج شرقی ساختمان پارلمان لندن نصب شده است چنین وضعیتی داشت. حدود یکصد سال پیش ترکی در ناقوس ساعت مشاهده شد، بلافاصله زبانهٔ زنگ ساعت با زبانهٔ کوچك‌تری جایگزین شد و محل نواخته شدن ضربه در روی ناقوس نیز تغییر داده شد، این کار اصلاحی موفقیت‌آمیز بود و ساعت بیگ بن هنوز هم در هر ربع ساعت به صدا در می‌آید، اگرچه که بعضی‌ها اعتقاد دارند طنین صدای آن همانند سابق نیست. ترك ناقوس هنوز هم وجود دارد بدون آنکه بیش‌تر شده باشد، و پیش‌بینی هم نمی‌شود که در آینده نیز بیش‌تر شود.

در قسمت مکانیکی ساعت بیگ بن، در محور گاورنر دورانی، نیز ترکی به‌وجود آمد، اما این ترك از نظرها دور ماند تا اینکه در سال ۱۹۷۶ به‌شدت شکسته شد و با پرتاب شدن قطعات آن به اطراف خسارات زیادی به مکانیزم ساعت وارد آمد. ترك به‌وجودآمده در محور ناشی از نقصی هنگام ساخت بود که بر اثر چهار میلیون بار ضربه از هنگام نصب آن در سال ۱۸۵۹ به‌تدریج گسترش پیدا کرده بود و این شکست یك شکست خستگی کلاسیك بود.

---

۱ - George Washington ، (۱۷۹۹-۱۷۳۲م)، ژنرال آمریکایی و اولین رئیس جمهور آمریکا

2 - Big Ben

پنجاه الی نود درصد شکست‌های سازه‌ای، شامل ناقوس‌ها و پل‌ها و هواپیماها و دیگر محصولات معمولی تکنولوژی، ناشی از توسعهٔ ترك می‌باشد. در بسیاری حالات ترك‌ها به‌آهستگی توسعه پیدا می‌کنند. هرگاه که ترك‌ها تا میزانی که برای سازه غیرقابل تحمل باشد توسعه پیدا کرده باشند و هنوز کشف نشده باشند، فاجعه اتفاق می‌افتد. بنابراین وجود ترك‌ها فی‌نفسه نهایستی باعث بیم و هراس گردد، و در هر طراحی مسؤولانهٔ مهندسی احتمال ایجاد ترك یا دیگر نقایص در مصالح یا ساخت مورد توجه قرار می‌گیرد. اثرات چنین نقایصی بر سازه در طول عمر آن را می‌توان به‌عنوان بخشی از طراحی به حساب آورد، و مهندسان می‌توانند هشدار لازم را به صاحبان سازه‌ها یا استفاده‌کنندگان آن‌ها بدهند که مراقب توسعهٔ ترك‌ها باشند.

گسیختگی ترد[1] ، که طی آن یك ترك با سرعتی نزدیك به سرعت صوت در سازه توسعه پیدا می‌کند، و باعث شکسته شدن کشتی‌ها و انفجار مخازن و تخریب پل‌ها می‌شود، قرن‌ها است که از مشکلات بزرگ به‌حساب می‌آید. تقریباً در همهٔ موارد دوره‌ای وجود دارد که آن را می‌توان دوران آبستنی حوادث نامید، که طی این دوره و قبل از ایجاد خرابی، ترك‌ها بر اثر خستگی به آهستگی توسعه پیدا می‌کنند. کارل ازگود[2] در کتاب خود به نام طراحی خستگی[3] از این هم فراتر رفته و ادعا می‌کند که: " همهٔ دستگاه‌ها و سازه‌ها دچار خستگی هستند زیرا نیروهای طبیعت همیشه در کار هستند و هر چیز بایستی به نوعی نسبت به آن واکنش نشان دهد. " و در مقدمهٔ ویرایش دوم کتاب تصریح می‌کند که : " هیچ دلیلی یافته نشده است که باعث تغییر این نظرم بشود. "

---

1 - brittle fracture
2 - Carl Osgood
3 - *Fatigue Design*

اگرچه همهٔ مهندسان در بارهٔ خستگی چنین عقیدهٔ فراگیری ندارند، ولی مطمئناً خستگی در بسیاری از طراحی‌ها از عوامل مهم به‌شمار می‌آید.

نظریه‌های متالورژی متعددی برای بیان مکانیزم توسعهٔ آسیب خستگی ارائه شده است، که از آن میان می‌توان از نظریهٔ نسبتاً جامع نامنظمی‌ها یا نابجایی‌ها در ساختار فلز نام برد، اما هیچ کدام از آن‌ها به‌طور کامل اغناکننده نمی‌باشند. در حالی که متالورژیست‌ها هنوز در خصوص جزئیات دقیق میکروسکوپی نحوهٔ شکسته شدن یك قطعه فلز اختلاف‌نظر و مباحثه دارند، مهندسان با فشار روزافزونی روبرو هستند تا دستگاه‌ها و سازه‌هایی طراحی کنند که حتی تحت اثر ارتعاشات خیلی شدید و دیگر بارگذاری‌های متغیر دچار شکستگی نشوند. بنابراین مهندسان مجبور هستند روش‌هایی عملی برای پیش‌بینی سرعت توسعهٔ ترك و همچنین حداکثر مقدار ترکی که باعث شکست نمی‌شود بیابند. معمولاً چنین ملاحظاتی است که تعیین‌کنندهٔ عمر مفید و طراحی‌شدهٔ سازه می‌باشد.

اگر در نظر بگیریم که دانش ما در بارهٔ فرآیند خستگی ناقص است، آن‌گاه موفقیت مهندسان سازه در طراحی شکست خستگی قابل تقدیر خواهد بود. چندین دهه است که فرآیند خستگی به‌صورت دو مرحلهٔ اصلی مورد توجه قرار گرفته است. در مرحلهٔ اول، ترك‌های میکروسکوپی در نواحی حساس، یعنی محل‌های ضعیف ماده یا نقاط تمرکز تنش، توسعه پیدا می‌کند که مدت این مرحله ممکن است تا حدود نصف عمر مفید قطعه یا سازه طول بکشد. با تداوم بارگذاری متناوب، این ترك‌ها توسعه پیدا کرده و با در هم آمیختن تعدادی از آن‌ها یك ترك خستگی بزرگ ماکروسکوپی به‌وجود می‌آید. این ترك در طی مرحلهٔ دوم و با ادامهٔ سیکل‌های بارگذاری با سرعت بیش‌تری توسعه پیدا می‌کند. وقتی که اندازهٔ ترك به حدی برسد که توان مقابله با بار وارده را نداشته

باشد، آن‌گاه سازهٔ تضعیف‌شده تحمل نگهداری بار را نخواهد داشت. و این ترك بر اثر باری که حتی کم‌تر از بار طراحی اولیه برای سازه باشد آخرین توسعه را پیدا کرده و دچار شکستگی خواهد شد.

متالورژیست‌ها غالباً به‌صورت تجربی مهارت لازم را برای ساختن آلیاژهایی که حتی‌الامکان دارای نواحی حساس کم‌تری بوده و نسبت به توسعهٔ ترك مقاومت بیش‌تری داشته باشند به‌دست آورده‌اند. مهندسان نیز تبحر یافته‌اند که اتصالات را طوری طراحی کنند تا میزان بار موضعی کاهش یابد و همچنین از فلزاتی با قدرت بیش‌تر استفاده کنند تا ترك‌های ایجادشده باعث شکست ترد نشوند. لیکن با این وجود مشکل خستگی فلز هنوز هم خودنمایی می‌کند، زیرا متالورژیست‌ها و مهندسان هنوز هم چاره‌ای ندارند جز اینکه بر اساس تجربیات محدود قبلی رفتار فلزات گوناگون و جدید را بر اثر استفادهٔ صحیح یا ناصحیح در تحت شرایط و عواملی که دقیقاً شناخته شده نیستند پیش‌بینی کنند. در هر طراحی جدید کوچك‌ترین تغییری نسبت به تجربیات قبلی می‌تواند عواقب غیرقابل پیش‌بینی به‌بار آورد. و در بعضی حالات دورهٔ توسعهٔ ترك آن‌قدر کوتاه مدت است که عملاً شکست آنی می‌باشد، همانند ضایعه‌ای که در خصوص ناقوس آزادی به‌وجود آمد.

شناسایی پدیدهٔ خستگی و جلوگیری از آن دو موضوع کاملاً متفاوت هستند. فرضیه‌های مربوط به نحوهٔ توسعهٔ ترك در تحت شرایط کنترل‌شدهٔ آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در چنین شرایطی نمونه‌های آزمایشی با دقت بسیار ماشین‌کاری می‌شود تا سطوح به‌دست آمده حتی‌المقدور بدون نقص باشد، و شرایط بارگذاری نیز دقیقاً مشخص شده و قابل کنترل دقیق می‌باشد. با توجه به اینکه تحت چنین شرایطی انجام آزمایشات مختلف و ثبت نتایج حاصل از آن‌ها امکان‌پذیر می‌باشد، به‌سادگی می‌توان منحنی‌هایی به‌دست آورد که بیانگر بار یا تنش

متناوب (که معمولاً مهندسان آن را با S نشان می‌دهند) برحسب تعداد سیکلی که باعث شکست خستگی می‌شود (و با N نشان داده می‌شود) باشد. منحنی‌های S-N بیانگر رفتار خاص هر ماده می‌باشد. بدیهی است که هرچه تنش کم‌تر باشد، تعداد سیکل لازم برای شکست ـ عمر مفید سازه ـ افزایش خواهد یافت. همچنین، هرگاه میزان تنش کم‌تر از حد معینی باشد، تعداد سیکل بارگذاری هر چقدر هم که باشد شکست هرگز اتفاق نخواهد افتاد.

بدین ترتیب از نظر تئوری می‌توان جلوی خستگی را گرفت، لیکن بدین منظور لازم است که طراحی سازه دست‌بالا باشد به‌طوری‌که تنش‌های ماکزیمم آن هرگز از حد معین بحرانی تنش خستگی تجاوز نکند و این کار عملاً مقدور نیست. هواپیمایی که بر چنین اساسی طراحی شود آن‌قدر سنگین خواهد بود که نخواهد توانست پرواز کند. و بر فرض اینکه چنین هواپیمایی ساخته شود و بتواند هم پرواز کند، بزودی شرکت سازندهٔ دیگری هواپیمای سبک‌تری را طراحی و عرضه خواهد کرد که از نظر هزینهٔ ساخت و قیمت فروش و نگهداری بسیار با صرفه‌تر خواهد بود. ضمن آنکه طراحی بهینه نیز، که بر اساس آن ایجاد و انتشار ترک خستگی امکان‌پذیر باشد ولی سرعت آن به‌حدی کم باشد که قبل از اینکه ترک مشکلی ایجاد بکند استفاده از سازه به اتمام رسیده باشد، از نظر تئوری بیش‌تر قابل تصور است تا آنکه در عمل قابل اجرا باشد.

منحنی‌های S-N اگرچه که برای بیش‌تر مواد مهندسی در دسترس است، ولی استفاده از آن در طراحی به این سادگی نیست. از طرفی این منحنی‌ها بایستی به‌صورت آماری تفسیر شوند که نقاط واقع در محدودهٔ عدم قطعیت آن اهمیتی همانند نقاط روی خود منحنی صاف دارد. نه‌تنها در جمع‌آوری اطلاعات خستگی نامنظمی وجود دارد، بلکه بین پیمانه‌های مختلفی که از یک ماده برداشته می‌شود اختلاف وجود دارد و همچنین

بخش‌های مختلفی از هر پیمانه نیز تحت شرایط فیزیکی و شیمیایی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

علاوه براین، سازه‌هایی که در عمل ساخته می‌شوند هیچ‌گاه به همان خوبی نمونه‌های آزمایشگاهی بی‌عیب و نقص و بدون نواحی حساس ترك نمی‌باشند. بی‌دقتی‌هایی از قبیل آنچه که در جوشکاری‌های معیوب به‌وجود می‌آید نه‌تنها باعث ایجاد نواحی حساس عمده می‌شود بلکه حتی ممکن است درز بزرگی در فلز ایجاد کند که بدون نیاز به ترك نواحی حساس، سازه را دچار گسیختگی کند. در هنگام ساخت نیز ممکن است تنش‌های پسماند[1] در سازه ایجاد شود، که این تنش‌ها می‌تواند نقش مهمی در مراحل ابتدایی فرآیند خستگی داشته باشد.

بالاخره، سازه‌های مهندسی در عمل تحت اثر بارگذاری‌هایی هستند که هم از نظر نوع و هم از نظر اندازه با بارگذاری‌های انجام‌شده در آزمایشگاه متفاوت است، و گاهی اوقات نیز ممکن است که اصلاً شرایط بارگذاری واقعی توسط طراح به حساب نیامده باشد صرفاً به این دلیل که امکان وجود چنان بارگذاری‌ای برای وی قابل تصور نبوده است. این حالتی بود که برای اتصال تکیه‌گاه موتور هواپیمای دی‌سی- ۱۰ اتفاق افتاد، بدین ترتیب که به علت روش غلط و غیرپیش‌بینی‌شده‌ای در تعمیر آن ترك‌های بزرگی در تکیه‌گاه موتور ایجاد شده بود.

غالباً تصور می‌شود که با انجام " کنترل کیفی "[2] می‌توان از طریق به حداقل رساندن معایب بر اساس یك استاندارد معتبر و ردکردن کارهای نامطلوب، از ایجاد نواقص ناخواسته و غیرقابل قبول اجتناب کرد ولی متأسفانه تکنیك‌های ترك‌یابی سازه‌های ساخته‌شده کامل نمی‌باشند،

---

1 - residual stress
2 - quality control

زیرا نه‌تنها ابزار و دستگاه‌های مورد استفادهٔ کنترل کیفی نسبتاً غیردقیق هستند، بلکه استفاده از آن‌ها و تفسیر نتایج نیز بیش از آنکه علم محسوب شود بایستی کاری هنری فرض شود.

یکی از مهم‌ترین روش‌های "آزمایش غیرمخرب"[1] بر اساس استفاده از امواج ماوراء صوت ساخته شده است. آزمایش غیرمخرب اصطلاحاً به روش‌هایی گفته می‌شود که برای ارزیابی و کشف نقایص درونی اجزاء کدر و جوش اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرد بدون آنکه موضوع مورد آزمایش را دچار خرابی سازد. از طریق ارسال امواج ماوراءصوت به درون قطعه و مشاهدهٔ علائم بازگشتی آن‌ها یکپارچگی درون قطعه که به‌وسیلهٔ دیگری قابل رویت نمی‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد بدون آنکه مجبور به شکستن خود قطعه باشیم. هر درز یا خلل و فرج یا جسم خارجی یا هر نقص دیگری در فلز که بالقوه مشکل‌ساز باشد باعث انعکاس امواج ماوراءصوت به‌طرز خاصی می‌گردد که در دستگاه گیرنده نشان داده می‌شود. متأسفانه مشخصات ریاضی بسیاری از شکل‌های هندسی بغرنج که سازه‌های مدرن را تشکیل می‌دهند به‌طور کامل شناخته نشده‌اند، و لذا تفسیر علایم پدیدارشده بر روی صفحه اسیلوسکوپ که پر از پارازیت و دیگر انعکاس‌های جنبی از قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد می‌تواند با تصورات و تعبیرات بسیار همراه باشد.

بعضی دیگر از روش‌های آزمایش غیرمخرب نیز که بر اساس پدیده‌های فیزیکی شناخته‌شده‌ای همانند اشعهٔ ایکس و میدان مغناطیسی استوار شده‌اند دارای حساسیت و دقت کافی برای نشان دادن جزئیات مورد نظر در سازهٔ مهندسی نمی‌باشند. نتایج منفی آزمایشات فقط بیانگر آن هستند که هیچ عیوب بزرگی توسط دستگاه‌ها و کارشناسان کشف

---

1 - nondestructive test

نشده است. در بعضی مواقع ممکن است که ترک‌هایی که تا یک‌چهارم عمق ورق فولاد توسعه پیدا کرده باشند نیز در این آزمایش‌های غیرمخرب از نظر دور بمانند.

نوعی از آزمایش غیرمخرب نیز وجود دارد که " آزمایش گواه " نامیده می‌شود، طی چنین آزمایشی مخزن تحت فشار یا هر مخزن دیگری که تازه ساخته شده باشد تحت فشار قرار داده می‌شود یا تیر را تحت اثر باری که بیش از بار هنگام استفاده است قرار می‌دهند. البته، این نوع آزمایش فقط وقتی غیرمخرب است که مخزن یا سازه کفایت و سلامت خود را نشان دهد. چنین به‌نظر می‌رسد که این نوع آزمایش کفایت و یکپارچگی قطعه را نیز به اثبات برساند، ولی این آزمایش محدودیت‌هایی دارد، ممکن است عیب‌های کوچکی وجود داشته باشد که هنگام آزمایش باعث گسیختگی مخزن نگردد ولی بعد از مدت مدیدی کار و توسعهٔ ترک خستگی آن را دچار شکست کند.

بر اساس مقاومتی که سازه نشان می‌دهد یا بر اساس نتایج و میزان حساسیت حاصل از روش‌های آزمایش می‌توان فرضیاتی در خصوص وجود عیوب کوچکی که کشف نشده‌اند درست کرد. مهندسان بایستی فرض کنند که چنین ترک‌هایی وجود دارند و میزان توسعهٔ آن‌ها را محاسبه کنند. به‌عنوان مثال، وقتی هواپیمایی ساخته می‌شود، بر اساس روش‌های کنترل کیفی و آزمایش‌های گواه و پروازهای آزمایشی اطمینان حاصل می‌شود که اعضاء سازه‌ای آن دارای هیچ ترک بزرگی که در آیندهٔ نزدیک خطرساز باشد نیست. با این همه ممکن است ترک‌هایی که ابتدائاً بی‌خطر باشند وجود داشته باشند، و مهندسان بایستی مشخص کنند که پس از چه مدت این ترک‌ها به اندازه‌ای توسعه می‌یابند که قابل کشف باشند و بدین ترتیب زمان بازرسی کامل حین بهره‌برداری تعیین شود. مهندسان معمولاً به‌منظور جلوگیری از شکست فاجعه‌بار قسمت‌های

حساس بر اثر توسعهٔ ترک خستگی، از روش طراحی " ایمن شکست "[1] استفاده می‌کنند که طی آن در قسمت‌هایی از سیستم که ممکن است توسعهٔ فوری ترک از نظر دور بماند موانعی سازه‌ای ایجاد می‌کنند.

روش مهم دیگری که برای جلوگیری از شکست سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار " عمر ایمن " یا عمر مفید است. طراحی عمر ایمن[2] که بر اساس آن سازه مجاز است پس از اتمام دوران بهره‌برداری مورد نظر دچار شکست شود چندان هم به‌آسانی قابل استفاده نیست. طراح در اغلب موارد نسبتاً به‌سادگی می‌تواند حادترین عیب ابتدایی را تعیین نماید، ولی تعیین اینکه بعدها سازه دقیقاً تحت اثر چه نوع بارهایی قرار خواهد گرفت و ترک دقیقاً چگونه توسعه پیدا خواهد کرد امکان‌پذیر نمی‌باشد. به‌عنوان مثال، مهندس طراح می‌تواند بارهای معمولی وارده به هواپیما را در حین برخاستن و اوج‌گیری و پرواز و فرود آمدن و حرکت روی باند پیش‌بینی نماید، ولی نمی‌تواند نحوهٔ توسعه یك ترك را در طی چنین مراحلی به‌طور دقیق پیش‌بینی کند. زیرا این کار مستلزم دانستن اطلاعاتی از قبیل توالی دقیق پروازها در هوای عادی و طوفانی و فرودهای ملایم و شدید و مقدار بار هواپیما می‌باشد. ضمن آنکه مدل‌های ریاضی موجود برای انجام آنالیز اثرات بارگذاری‌های گوناگون در طی مراحل و توالی‌های مختلف هنوز کفایت لازم برای انجام چنین کاری را ندارند. بنابراین هر طراحی ایمن نبایستی صرفاً بر اساس معیار عمر ایمن انجام شود بلکه علاوه برآن بایستی ایمن شکست نیز باشد به‌طوری که ترك‌های بالقوه خطرناك به‌نحوی مهار شده و طی بازرسی‌های منظم مورد شناسایی قرار گیرند.

---

1 - fail-safe design
2 - safe-life design

علی‌رغم وجود چنین محدودیت‌هایی در آنالیز، اعم از نظریه‌های نارسا یا اطلاعات غیردقیق، مهندسان طراح می‌بایستی کار خود را به انجام برسانند. و با توجه به اینکه انجام آزمایشات خستگی بر اساس زمان واقعی و مقیاس حقیقی اصولاً غیرممکن است ـ ساختن مدلی با مقیاس واقعی در حقیقت به معنی ساختن خود سازه است ـ مهندسان در طراحی‌ها از ضرایب اطمینان استفاده کرده و تمهیداتی برای پوشش دادن به اشتباهات و عیوب احتمالی به کار می‌بندند.

در اواسط دهۀ ۱۹۶۰ میزان توسعۀ ترك در جدارۀ مخازن راکتورهای هسته‌ای به‌صورت بحث داغی در میان اعضاء صنایع هسته‌ای از جمله کمیتۀ انرژی اتمی[1] و کمیتۀ مشورتی حفاظت هسته‌ای[2] در آمده بود. اعضاء کمیتۀ مشورتی حفاظت هسته‌ای بر این باور بودند که غیرممکن است بتوان تضمین کرد که جداره‌های فولادی شش تا هشت اینچی مخازن راکتورها بدون عیب ساخته شده باشند. با توجه به اینکه روش‌های ساخت و بازرسی ایده‌آل نبوده‌اند می‌توان به‌سادگی نتیجه‌گیری کرد که نقایصی به اندازه‌های کوچك وجود داشته است، ولی اینکه چه عواملی باعث به‌وجود آوردن نقایص کوچك بوده‌اند موضوع مهمی است که هنوز هم مورد بحث و مجادله است.

مضافاً اینکه طی دهها سالی که نیروگاه‌های هسته‌ای بایستی مورد بهره‌برداری قرار گیرند، عواملی مانند سرد و گرم شدن متناوب و تغییرات نیرو و فشار مخازن و تغییرات تنش جداره‌های مخازن می‌تواند باعث ایجاد و توسعه ترك‌های خستگی گردد. اینکه آیا چنین ترك‌هایی قابل شناسایی هستند به دلیل مشکلات خاص بازرسی نیروگاه هسته‌ای در

---

1 - Atomic Energy Commission
2 - Advisory Committee on Reactor Safegaurds

هنگام کار و محدودیت‌های ابزارها، در آن زمان همان‌قدر قابل تردید بود که امروزه نیز است. روش‌های آزمایشات غیرمخرب، از قبیل استفاده از تلویزیون کنترل از راه دور که قابل حرکت در اطراف مخزن بوده و به بازرس در شناسایی ترك‌ها و دیگر موارد مشکوك کمك می‌کند، به دلیل میزان قابلیت اعتماد به آن‌ها دارای محدودیت بسیاری می‌باشند. بنابراین، حتی اگر آنالیز انجام‌شده از طریق روش‌های مکانیك گسیختگی مشخص سازد که نقایص موجود بی‌خطر و قابل اغماض هستند، چاره‌ای نیست جز اینکه بپذیریم هنوز هم بعضی انواع خاصی از ترك‌ها در سیستم وجود داشته باشند.

البته این مسأله در نیروگاه‌های راکتور هسته‌ای به دلیل آنکه فولادهایی که مخازن تحت فشار از آن‌ها ساخته می‌شوند دارای " چقرمگی گسیختگی "[1] یکسانی نیستند غامض‌تر نیز می‌باشد، و مقاومت گسیختگی مخازن به دمای فلز هم بستگی دارد. هر فلزی در پایین‌تر از دمای خاصی خیلی شکننده بوده و سختی آن خیلی کم است. این دمای خاص را با احتساب مقداری بابت محدودهٔ ایمنی که معادل با ضریب اطمینان است " دمای مبنا " می‌نامند. تا زمانی که مخازن تحت فشار راکتورها کاملاً در دمایی بالاتر از این دما کار بکنند خطر شکستگی ترك آن را تهدید نمی‌کند.

ولی هرگاه فولاد تا دمایی پایین‌تر از دمای مبنا خنك شود، احتمال ایجاد گسیختگی ترد وجود خواهد داشت. این پدیده یکی از علل خرابی ناگهانی پل‌های جوش‌شدهٔ قدیمی در زمستان و همچنین شکستگی غیرمنتظرهٔ کشتی‌های لیبرتی[2] در طول جنگ جهانی دوم بوده است. یك

---

1 - fracture toughness

۲ - Liberty Ships ، نوعی کشتی باری که در جنگ جهانی دوم ساخته شد

مورد از شکستگی این کشتی‌ها در ۱۶ ژانویه ۱۹۴۳ در پرتلند[۱] ارگان[۲] اتفاق افتاد. هوا معتدل و دریا آرام بود. یك تانکر تی- ۲ در کنار اسکله لنگر انداخته بود که به‌طور ناگهانی و بدون هیچ مقدمه‌ای از وسط به دو نیم شد و صدای شکستن آن تا دو کیلومتری شنیده شد. طی چند سال بعد شکستگی‌های غیرمنتظرهٔ متعددی در تانکرها و کشتی‌های لیبرتی اتفاق افتاد که همگی بر اساس روش جدید ساخت کشتی یعنی به‌صورت تماماً جوش‌شده ساخته شده بودند. (برای اتصال ورق‌های فلزی به یکدیگر، جوشکاری نواری جای روش قدیمی‌تر پرچکاری را گرفت که در اتصال پرچ‌شده به‌طور خودکار جلوی توسعهٔ ترك از یك ورق به ورق دیگر گرفته می‌شد). بدین ترتیب پدیدهٔ گسیختگی ترد، که حداقل از زمان شروع استفاده از فولاد در پل‌ها و مخازن و دیگر سازه‌های مهندسی مشاهده شده بود، بیش‌تر و بیش‌تر مورد توجه و مطالعه قرار گرفت، و تقریباً همزمان با ایجاد راکتورهای هسته‌ای علم مهندسی مکانیك گسیختگی نیز پا گرفت. تحقیقاتی که به‌دنبال شکسته شدن کشتی‌های لیبرتی صورت گرفت نشان داد که مجموعه‌ای بحرانی از عوامل متالورژی و شرایط محیطی و بارگذاری، که به‌علت وجود نامنظمی‌های هندسی از قبیل گوشه‌های تیز یا ترك‌ها حادتر نیز می‌شود، باعث گسیختگی ناگهانی می‌شود. در مورد کشتی‌های جوش‌شده، عواملی از قبیل روش‌های اجرایی شتابان و کارکنان کم‌تجربه باعث لطمهٔ بیش‌تری به یکپارچگی فولاد این سازه شده بوده است. تحقیقات انجام‌شده به مهندسان یاری داد که چگونه می‌توان در مقابل گسیختگی ترد طراحی کرد، ولی مشکلات مربوط به تعیین وضعیت عیوب قبلی موجود

۱- Portland ، شهری در شمال غربی ارگان
۲- Oregon ، ایالتی در شمال غربی آمریکا

در سازه و پیش‌بینی توسعهٔ آن‌ها به‌صورت ترک‌های خستگی هنوز وجود دارد.

مخازن راکتورهای هسته‌ای طوری طراحی شده‌اند که کاملاً در دمایی بالاتر از دمای مبنای فلز آن کار بکنند. بدین ترتیب هر ترکی که احتمالاً از دید تلویزیون کنترل از راه دور یا دیگر وسایل بازرسی دور مانده باشد خطرآفرین نخواهد بود زیرا مخزن آن همانند یك کشتی جوش‌شده در دریای سرد یا یك لیوان قهوهٔ داغ بر روی میز سرد حالت شکننده نخواهد داشت. متأسفانه، تشعشع نوترون از هسته راکتور در طول زمان باعث بالا رفتن دمای مبنای فلز می‌گردد. این موضوع در اواسط دههٔ ۱۹۶۰ شناخته شده بود، لیکن در آن زمان هنوز تجربه‌ای وجود نداشت که بتوان بر اساس آن میزان افزایش دقیق دمای بحرانی راکتورهای جدید را تعیین کرد. بنابراین مهندسان و متالورژیست‌ها بر اساس فرضیاتی که به‌نظر آنان دست‌بالا نیز بود اثرات زیان‌بار تشعشع نوترون را پیش‌بینی کرده و در طراحی‌های جدید خود به‌کار بردند. لیکن در اوایل دههٔ ۱۹۸۰، یعنی پانزده سال بعد و در زمانی که راکتورهای اولیه حدود نیمی از عمر مفید خود را سپری کرده بودند، آزمایش‌های انجام‌شده بر روی فلزهای تحت تشعشع نشان داد که فرآیند شکننده‌تر شدن فلز با سرعتی بیش از آنچه که قبلاً پیش‌بینی شده بود صورت می‌گیرد. در ابتدای نصب مخزن راکتور، آن را می‌توان در دمای ۱۰۰ درجهٔ فارنهایت به‌کار انداخت که هنوز هم به مقدار زیادی بالای دمای مبنا است. پیش‌بینی شده بود که دمای مبنای فلز بر اثر تشعشع به بیش از ۲۰۰ درجهٔ فارنهایت نیز برسد، و اگرچه که راکتورها در شرایط معمولی در دمایی بیش از ۶۰۰ درجهٔ فارنهایت کار می‌کنند، لیکن نمی‌توان به‌طور کامل از ایجاد ترکیب مخاطره‌آمیز شرایط دمای کم و فشار زیاد در طی حادثه جلوگیری کرد. بنابراین چنانچه طی حادثه‌ای

سیستم اضطراری خنك‌سازی هسته باعث خنك شدن خیلی سریع مخزن تحت فشار به سمت دمای مبنایی که افزایش پیدا کرده است گردد، هر ترك موجود قبلی به‌سرعت توسعه پیدا خواهد کرد.

شرکت‌هایی که نیروگاه‌های راکتورهای هسته‌ای را در ایالات متحده آمریکا اداره می‌کنند دقیقاً مراقب چقرمگی گسیختگی مخازن نیروگاه هستند، و عموماً بر این باور هستند که میزان شکننده‌تر شدن فولاد مخازن راکتورها تا حد خطرناك آن نرسیده است. پیشرفت و بهبود مداوم روش‌های کشف ترك‌ها و آنالیز کردن ترك‌ها نیز مسؤولین را مطمئن ساخته است که دست به خطرپذیری خطرناکی نزده‌اند. مضافاً اینکه انتظار دارند با پیشرفت روش‌های آنیل‌کردن فلزات بتوان فولاد را نرم‌تر و چقرمه‌تر کرده و آن را مجدداً به دمای مبنای پایین‌تر رساند، و بدین ترتیب با معکوس کردن اثرات شکننده‌ترکنندهٔ تشعشع نوترونی میزان ایمنی راکتورها را به حد سابق افزایش داد.

صنعت نیروگاه هسته‌ای مشکل دیگری در رابطه با ترك لوله‌ها نیز دارد، و خطر بالقوهٔ حوادث نیروگاه‌های هسته‌ای که می‌تواند به جان هزاران نفر صدمه وارد سازد، همان‌طور که در فیلم‌هایی سینمایی نظیر The China Syndrome به تصویر در آمده است، نیروگاه‌های هسته‌ای را حتی به قیمت تحمل مشکلات کمبود برق به تعطیلی تهدید کرده است. بخشی از خطرناك‌ترین انواع ترك‌های لوله‌های نیروگاه هسته‌ای به خوردگی مربوط می‌شود، و تصور می‌شد که از طریق انتخاب مناسب لوله‌های فولادی ضدزنگ و ساخت و نصب لوله‌ها و کنترل دقیق ترکیب شیمیایی آب داخل لوله‌ها می‌توان از ایجاد خوردگی و ترك‌های ناشی از آن جلوگیری کرد. مخصوصاً آب سیستم خنك‌کننده راکتور کاملاً خالص نگهداشته می‌شد. اما مجموعهٔ شناخته‌نشده‌ای از ترکیب عواملی مانند تنش‌ها و روش‌های جوشکاری و درجه حرارت‌ها و ترکیب شیمیایی

آب آبستن حوادث بودند. تا اینکه کشف تعدادی ترک در لوله‌های نیروگاه‌های هسته‌ای در اواخر دههٔ ۱۹۶۰ و اوائل دههٔ ۱۹۷۰ سرانجام منجر به تأسیس گروه تحقیقاتی ترک لوله[1] در سال ۱۹۷۵ گردید که بعدها به‌صورت تشکیلات جدیدی به نام کمیتهٔ مقررات هسته‌ای[2] در آمد.

این گروه تحقیقاتی علت ایجاد ترک‌ها را ناشی از پدیده‌ای دانست که به ترک خوردگی تنشی[3] بین‌دانه‌ای موسوم است. ترک خوردگی تنشی پدیده‌ای است که تحت شرایط نامطلوبی از تنش نسبتاً زیاد در محیط خورنده در فلزات ایجاد می‌گردد. مشخصهٔ چنین وضعیتی وجود ترک‌هایی است که عموماً در طول مرز دانه‌های متالورژیکی، که آن را می‌توان به‌عنوان خطوط شکست میکروسکوپی دانست، توسعه پیدا می‌کنند، و با تجمع مواد خورنده در آن‌ها و بالا رفتن تنش‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. فلزات بر اثر جوشکاری مستعد ترک خوردگی تنشی می‌شوند، و وجود مقدار زیادی اکسیژن در آب خالص سیستم خنک‌کنندهٔ راکتور این وضعیت را بحرانی‌تر هم می‌کند. طبق بعضی روایات، گاهی که جوشکارها یك طرف لوله را حرارت می‌دهند تا بتوانند با کمی خم کردن لوله آن را به سر لولهٔ دیگر جفت کنند عملاً باعث مستعد شدن اتصال برای ترک خوردگی تنشی می‌شوند. چنین روش غیرمجاز و غیرپیش‌بینی‌شده‌ای می‌تواند باعث ایجاد تنش‌هایی گردد که هیچ مهندس طراحی در محاسبات خود منظور نکرده است. بر اساس حکایتی دیگر، گاهی که جوشکارها هنگام ناهار خوردن روی لوله‌ها می‌نشینند و مثلاً مشغول خوردن تخم‌مرغ آب‌پز می‌شوند، مقداری از نمکی که بر روی

---

1 - Pipe Crack Study Group
2 - Nuclear Regulatory Commission
3 - stress-corrosion crack

آن می‌پاشند، به همراه عرقی که از سر و صورت جوشکاران در هنگام کار می‌ریزد، به محل اتصال جوشکاری لوله می‌ریزد، و بدین ترتیب مقداری کلرورسدیم داخل سیستمی می‌شود که مهندسان طراح و مهندسان بهره‌بردار فرض کرده‌اند عاری از چنین مواد خورنده‌ای است.

دلایل ایجاد ترک‌ها هرچه که باشد، هر نیروگاه برق هسته‌ای بایستی شبکه‌ای کاملاً قابل اطمینان از لوله‌کشی‌های بزرگ برای خنک‌کردن هستهٔ داغ راکتور داشته باشد. هر خرابی ناگهانی در یکی از لوله‌های اصلی می‌تواند منجر به فاجعه‌ای عظیم گردد. با توجه به اینکه در هنگام آزمایشات و بازرسی‌ها ممکن است ترک‌های لوله‌ها شناسایی نگردد، و چون نمی‌توان از توسعهٔ ترک بر اثر خستگی جلوگیری کرد، طراحان راکتور روش ایمنی خاصی را ابداع کرده‌اند که آن را می‌توان ضابطهٔ "نشت قبل شکست"[1] برای کنترل کردن طرح نامید. هرگاه در ساختن لوله از نوع خاصی از فولاد نرم استفاده شود، هر ترکی که در آن ایجاد شود سرعت انتشار آن در عمق جدارهٔ لوله از هر جهت دیگری بیش‌تر خواهد بود. بدین ترتیب این اطمینان خاطر حاصل می‌شود هر ترک نسبتاً کوچک از طریق ایجاد نشت قابل شناسایی خواهد بود قبل از اینکه ترک بزرگ و خطرناکی بتواند به موازات یک جوش نواری توسعه پیدا کرده و شکست فاجعه‌باری را در لوله باعث گردد. این ضابطه کاملاً قابل اعتماد تشخیص داده شده است، و در لوله‌های راکتورها ترک‌های نشت‌کننده‌ای مشاهده می‌شود که تا عمق هفتاد و پنج درصد ضخامت جدارهٔ لوله توسعه پیدا کرده‌اند بدون اینکه باعث گسیختگی ترد شوند. با یافتن چنین ترک‌هایی که از طریق ردیابی نشت انجام می‌شود، آن قطعهٔ معیوب با لولهٔ سالم تعویض می‌گردد. علی‌رغم همهٔ مشکلاتی که

---

1 - leak-before-break

لوله‌های راکتورهای هسته‌ای به‌وجود آورده‌اند، گروه تحقیقاتی ترک لوله به این نتیجه رسید که فولاد ضدزنگ که در لوله‌کشی به‌کار برده می‌شود قدرت تحمل ترک‌های خیلی بزرگی را دارد. طراحی بسیار محافظه‌کارانهٔ نیروگاه‌های برق هسته‌ای ثابت کرده است که ضرایب اطمینان کافی در ساخت سیستم در نظر گرفته شده است، و چنین به‌نظر می‌رسد که ضابطهٔ نشت قبل شکست معیار صحیح و قابل اطمینانی است.

سازه‌های مهندسی مدرن هرچقدر هم که عالی و متکامل باشند نهایتاً مقاومت آن، همانند زنجیر سادهٔ عهد باستان، به استحکام ضعیف‌ترین حلقه بستگی دارد. و اما اینکه حلقهٔ ضعیف کجا قرار دارد معمولاً عارضه‌ای متالورژیکی یا تصادفی می‌باشد، و مهندسان ِ امروز نیز همانند آهنگرهای قدیم چشم به یافتن و از بین بردن موارد بالقوه مشکل‌آفرین دارند. با این همه، ممکن است که وقتی آهنگر در یك روز تابستانی مقابل کورهٔ آهنگری خیس عرق شده باشد و افکارش در جاهای مختلف دور بزند روی یك حلقه بیش‌تر پتك بکوبد و آن را از دیگر حلقه‌های زنجیر لاغرتر کند. یا ممکن است مدتی از کار شاگردش غافل شود و شاگرد او حلقهٔ دیگری را خراب کند و یا حتی در آن ترك ایجاد کند. یا اینکه شاگردش نتواند یك حلقهٔ داغ را به‌طرز صحیح سرد بکند. یا اینکه وقتی آهنگر زنجیر تمام‌شده را مورد بازرسی قرار می‌دهد به‌طور ناخواسته یك حلقهٔ معیوب از زیر چشم وی دور بماند. یا اینکه هنگام آزمایش کردن زنجیر به‌دلیل مریض بودن یکی از اسب‌هایش نتواند زنجیر را تا حد مورد نظر تحت کشش قرار دهد. یا اینکه خریدار زنجیر بخواهد نیروی بیش‌تری از آنچه که آهنگر گفته است از زنجیر بکشد. دانش و شناخت مهندس ِ امروز از رفتار ترک‌ها هرچه که باشد، وی نمی‌تواند طبیعت ناشناختهٔ انسانی را، که شامل محدودیت‌های علمی وی نیز می‌باشد، در کلیهٔ محاسبات خود بگنجاند. عملکرد ایمن سیستم بغرنجی

چون هواپیمای غول‌پیکر یا نیروگاه برق هسته‌ای نهایتاً به مقاومت و قابلیت همهٔ حلقه‌های زنجیر، شامل عوامل انسانی و مکانیکی، بستگی دارد.

عواقب شکست سازه‌ای نیروگاه هسته‌ای آن‌قدر عظیم است که زواید فوق‌العاده زیاد و تمهیدات ایمنی وسیعی در طرح به‌کار گرفته می‌شود. در نقطه مقابل، شکست سازه‌های مصرفی بی‌اهمیتی از قبیل بندکفش و لامپ چراغ، که خراب شدن آن‌ها عواقب سوئی به‌بار نمی‌آورد، خصوصاً با توجه به کم‌تر شدن هزینهٔ تولید، امری پذیرفته‌شده است. در مورد قطعات و سازه‌هایی که غالباً حالتی فیمابین دارند به این سادگی نمی‌توان تصمیم‌گیری کرد. هیچ طراحی مایل نیست که سازه‌اش دچار شکستگی شود، و وقتی که ایمنی طرح مورد نظر باشد هیچ سازه‌ای به‌طور عمدی دست‌پایین طراحی نمی‌شود. اما طراح و کارفرما و بهره‌بردار ناچاراً با سؤالات پریشان‌کننده‌ای از قبیل " چقدر تمهیدات اضافی کافی است؟ " و " چه هزینه‌ای خیلی بالا است؟ " روبرو هستند.

وقتی سازهٔ به‌ظاهر ساده‌ای مانند شاسی اتوبوس برای تحمل اتوبوسی سبک‌تر و کم‌مصرف‌تر تقاضا می‌شود، یا وقتی که به دلایل معماری تأکید می‌شود که راهروی مرتفع دارای ستون‌های مزاحم نباشد، طراحان بی‌هیچ پروایی مسؤولیت چنین چالشی را می‌پذیرند. آنان با توجه به تجربیات مهندسی، انجام موفقیت‌آمیز چنین کارهایی را در حد توانایی‌های خود می‌بینند. برای به‌ثمر رساندن این تلاش، روش‌های جدید آنالیز و مصالح مدرن بسیار مقاوم و کامپیوترها نیز اطمینان بیش‌تری به آن‌ها می‌دهند. ولی چنین پیشرفت‌ها و مساعدت‌هایی ممکن است مهندسان را بیش از حد به خود غره کند به‌طوری که آنان را مع‌الاسف، و شاید زودهنگام، از طرح‌های قدیمی دور و جدا سازد.

به‌هرحال اشتباهات بعضاً وجَود دارد. و با تحلیل شکست، مهندسان می‌توانند اطلاعات لازم را برای بهبود طرح‌های آتی به‌دست آورند. و

این شکست‌های سازه‌ای است، و نه موفقیت‌های سازه‌ای، که ایمنی طرح‌های بعدی را بهبود می‌بخشد. پاسخ به سؤال‌هایی از قبیل اینکه آیا فلان پل یکصدساله دست‌بالا طراحی شده بوده است و یا شاسی اتوبوس‌هایی که چهل سال است کار می‌کنند چقدر می‌توانسته سبک‌تر باشد بسیار مشکل است.

۱۱

اتوبوس‌ها و چاقوها

وقتی که پانزده هزار دونده از روی پل ورازانو برای شروع مسابقهٔ ماراتن سالانهٔ نیویورك هجوم بردند، ظاهراً هیچ کدام نگران بالا و پایین رفتن آن‌همه پای دوندگان نبودند که می‌توانست کف پل را تا حد تشدید به ارتعاش در آورد، همانند بلایی که هنگام عبور سربازان به حالت رژه از روی چندین پل معلق در قرن نوزدهم اتفاق افتاده بود. و احتمالاً دونده‌های ماراتن مسابقهٔ سال ۱۹۸۱ که با عبور از روی پل به سمت محلهٔ بروکلین و خیابان چهارم سرازیر شدند فاجعهٔ خراب شدن راهروهای معلق را نیز در هنگام رقص جمعیت فراموش کرده بودند. اگر هم به چیزی فکر می‌کرده‌اند قاعدتاً مربوط به نحوهٔ دویدن خودشان بوده است، که مسابقه را طوری تمام کنند که هیچ انرژی مصرف‌نشده باقی نگذاشته باشند، طوری بدوند که عملاً هیچ ضریب اطمینانی به کار نبرده باشند، تمامی مسافت حدود ۲۶ مایلی مسابقه را هنگامی به انتها برسانند که از خستگی در حال از پا افتادن باشند، چندین ساعت طولانی طاقت بیاورند، همان‌طور که کالسکهٔ تك اسبه خادم یکصد سال دوام آورد.

در میان دونده‌های پیشتاز دوازدهمین مسابقهٔ ماراتن نیویورك آلبرتو سالازار دیده می‌شد که در مسابقهٔ قبلی شکست خورده بود. با این وجود، وی از شکست خود پند گرفته بود و تصمیم داشت که این بار زودتر از بقیه به خط پایان مسابقه در سنترال پارك برسد. تصاویر مسابقه به‌صورت زنده از طریق دوربینی که روی کامیونی در پیشاپیش دوندگان حرکت می‌کرد پخش می‌شد، و پستی و بلندی‌ها و دست‌اندازها و ترك‌ها و چاله‌های فراوان خیابان‌های نیویورك کاملاً در تصاویر لرزان ارسالی محسوس بود. چنین به‌نظر می‌رسید که کسی دوربینی را در دست گرفته و در پیشاپیش دونده‌ها به سمت عقب می‌دود و فیلمبرداری می‌کند. وقتی که دونده‌های ماراتن از لافایت به خیابان بدفورد وارد شدند فقط چهار خیابان با خیابان کوئینسی فاصله داشتند که در آن جا چند ماه قبل یك اتوبوس شهری را مجهز به وسایل مخصوص قرار داده بودند تا کارآیی آن را مورد بررسی قرار دهند. اتوبوس را پر از کیسه‌های شن کرده بودند و همانند سلسله اعصاب به قسمت‌های مختلف اسکلت آن کرنش سنج‌هایی نصب کرده بودند تا میزان خمش و تغییرات اسکلت این اتوبوس نسبتاً نو را برای مهندسان مشخص سازد، و هدف از این کار تعیین مقاومت خستگی وسیلهٔ نقلیه بود، کاری مشابه با تلاش تیم پزشکان برای تعیین حدود طاقت و توان فضانوردان. مهندسانی که حرکت اتوبوس را در خیابان پر از چالهٔ کوئینسی تحت نظر داشتند، می‌خواستند علت ایجاد ترك‌های خستگی بسیاری را در اسکلت اتوبوس، که کم‌تر از یك دهم فاصله‌ای را که برای آن طراحی شده بود طی کرده بود، بیابند. آن‌ها نیز همانند آلبرتو سالازار امیدوار بودند که اشکال کار را کشف کنند و بعد از آن شکست، مجدداً پیروزمندانه اتوبوس‌ها را روانهٔ خیابان‌های نیویورك کنند.

این اتوبوس‌ها که هنوز مسابقهٔ ماراتن خود را در خیابان‌های شهر به

اتمام نرسانده بودند به اتوبوس‌های گرومان فلکسیبل مشهور شده بودند. این اسم را از نام شرکت سازندهٔ اتوبوس‌ها یعنی شرکت گرومان فلکسیبل[1] گرفته بودند که وابسته به یك شرکت مادر هواپیماسازی است. طراحی غیرمتعارف این اتوبوس‌ها ناشی از الزامات خاصی بود که تأمین‌کنندهٔ هزینهٔ خرید اتوبوس‌ها، یعنی اداره فدرال حمل و نقل شهری، تعیین کرده بود. آنان خواستار اتوبوسی بودند که سبك‌تر باشد تا سوخت کم‌تری مصرف کند و برای معلولین قابل استفاده باشد و دارای سیستم تهویهٔ مطبوع و کنترل‌های الکترونیکی باشد. شرکت گرومان با اقدامی جسورانه شاسی سنگین اتوبوس‌هایی را که با موفقیت کامل در خدمت وسائط نقلیهٔ نسل‌های قدیمی‌تر بود تغییر داد و برندهٔ مناقصه‌ای شد که منجر به عقد قرارداد ساخت ۸۵۰ دستگاه اتوبوس برای شهر نیویورك گردید. شهرهای دیگر نیز، از قبیل هوستون و لس‌آنجلس و آتلانتا نیز در صدد خرید اتوبوس‌های فلکسیبل برای ناوگان حمل و نقل شهری خود بودند.

اما مسؤولین شهر نیویورك فقط حدود شش ماه پس از به خدمت گرفتن اتوبوس‌های فلکسیبل همهٔ آن‌ها را که تا آن زمان به ۳۶۷ دستگاه رسیده بود به علت مشاهده شدن ترك‌های خستگی بسیار زیاد در شاسی‌های آن‌ها از ناوگان خود خارج ساخت. ادعا می‌شد که در صورت ادامهٔ استفاده از آن‌ها شاسی‌های ضعیف‌شدهٔ اتوبوس‌ها به‌طور ناگهانی دچار شکستگی شده و باعث به‌وجود آوردن حوادثی می‌گردید. مسؤولین شهر در طول مدتی که مشغول مذاکره با شرکت گرومان برای بررسی وضعیت بودند تعدادی از اتوبوس‌ها را در کنارهٔ رودخانهٔ هودسن[2] پارك

---

1 - Grumman Flxible Corporation

۲- Hudson River ، در شرق نیویورك

کرده بودند. شرکت سازنده شاسی‌های نامناسب را تقویت کرد و اتوبوس‌ها حدود یك سال بعد مجدداً به خدمت گرفته شدند. شرکت گرومان برای انجام کارهای تبلیغاتی و برگشتن اتوبوس‌ها به ناوگان شهری در صدد به استخدام در آوردن جکی گلیسون شد که در فیلم " ماه عسل " به نقش رانندهٔ اتوبوس ظاهر شده بود. ظاهراً وی مبلغ زیادی مطالبه کرده بود، و لذا تلی ساوالاس که نقش کوچك وی به‌عنوان یك نمونهٔ بارز شهروند نیویورکی شناخته شده بود در آگهی‌های تبلیغاتی تلویزیون و رادیو و مطبوعات ظاهر شد. شرکت نام اتوبوس را نیز به " مترو " تغییر داد، ولی به‌هرحال این مشکل خستگی باعث بیش از سی میلیون دلار زیان در فصل چهارم سال ۱۹۸۱ برای گرومان فلکسیبل شد. این زیان ضربهٔ مالی بزرگی برای شرکت مادر محسوب می‌شد که انتظار داشت معاملهٔ اتوبوس‌ها بتواند کمك مالی خوبی برای شرکت در آن سال‌های کساد فروش هواپیماهای نظامی باشد. بالاخره گرومان ناچار شد که این شرکت فرعی سازندهٔ اتوبوس را بفروشد.

مشکلات اتوبوس‌های فلکسیبل نیویورك پایان‌ناپذیر بود، و با توسعهٔ ترك‌ها در نزدیکی چرخ‌های عقب اشکالاتی در محور جلو به‌وجود آمد و یاتاقان میل فرمان شروع به شکستن کرد. بالاخره در اوایل سال ۱۹۸۴ ادارهٔ حمل و نقل شهر نیویورك تصمیم گرفت که خودش را از اتوبوس‌های فلکسیبل مدل ۸۷۰ گرومان که قرار بود حداقل تا سال‌های ۱۹۹۰ در سرویس باشد خلاص کند، و علیه شرکت سازنده شکایتی برای دریافت ۹۲ میلیون دلار بابت هزینهٔ انجام‌شدهٔ اتوبوس‌ها و ۳۵۰ میلیون دلار بابت خسارات مطرح کرد. ظاهراً این ادعای خسارت اتوبوس‌ها که مصادف با اعلام قریب‌الوقوع نیروی دریایی مبنی بر انتخاب خرید هواپیماهای جنگی A-6 و F-14 شرکت گرومان به‌جای هواپیمای F-18

شرکت مک‌دانل داگلاس[1] بود، عامل انتشار یک آگهی یک چهارم صفحه‌ای در شمارهٔ ۲۳ جولای ۱۹۸۴ روزنامهٔ نیویورک تایمز گردید. متن کامل آگهی که فضای خالی آن بیش از متن بود، به این شرح است:

همه مؤسسات حمل و نقل شهرها
از اتوبوس‌های گرومان مدل ۸۷۰ خود
آن‌قدر استفاده کرده‌اند که
برای ۸۰ بار رفت و برگشت به ماه
کافی بوده است.

اما اداره حمل و نقل شهر نیویورک
مدعی است که اتوبوس‌های گرومان مدل ۸۷۰ آن‌ها قابلیت کار ندارند.

شرکت گرومان

آگهی گرومان صراحتاً بیانگر آن است که ادارهٔ حمل و نقل شهر نیویورک با بی‌ملاحظگی تصمیم‌گیری کرده است، اما راجع به اینکه آیا بقیهٔ مؤسسات حمل و نقل نیز در چنین مسیرهای پر از دست‌انداز و چاله تردد می‌کنند یا نه چیزی را مشخص نکرده است.

علی‌رغم همهٔ اعتراضات شرکت سازنده، اتوبوس گرومان فلکسیبل به‌عنوان یک نمونهٔ مطالعاتی مهندسی ارزشمند در خصوص طراحی شکست باقی خواهد ماند، اگرچه که باعث حادثهٔ دهشتناکی همانند پل تاکوما نشده است و یا همانند حادثهٔ راهروهای معلق هتل هایت باعث هلاکت

---

1 - McDonnell-Douglas

کسی نشده است. این اتوبوس نمونهٔ بارزی از مشکلاتی است که ممکن است بر اثر خواسته‌های متعددی ـ از قبیل صرفه‌جویی در سوخت و کاهش وزن و راحتی بیش‌تر و قدرت مانور بیش‌تر و غیره ـ به‌وجود آید که عملاً مستلزم انجام تغییرات جسورانه و مخصوصاً کاهش مقاومت طرح اصلی است که به مدت‌های مدیدی به‌طور موفقیت‌آمیزی کار می‌کرده است. چه کسی می‌توانسته حتی تصورش را بکند که مهندسان اواخر قرن بیستم قادر به طراحی اتوبوس شهری نباشند؟ البته ممکن است عده‌ای مدعی شوند که مسؤولین شهر نیویورك مشکلات این اتوبوس را اغراق‌آمیز جلوه داده‌اند و با همان اتوبوس‌ها نیز می‌توانسته‌اند سر بکنند زیرا که ایجاد خطر جانی آن‌ها بسیار دور از تصور بوده است. لیکن اینان بایستی در نظر داشته باشند که اگر چنین مشکلاتی در اتوبوس به‌طور ناگهانی باعث خراب شدن محور و یا دو نیمه شدن شاسی یا خم شدن و شکسته شدن میل فرمان گردد چه عواقبی ممکن است به دنبال داشته باشد. تعیین میزان خطرات احتمالی در اتوبوسی که مستعد ایجاد مشکل غیرمنتظره‌ای باشد بسیار دشوار است. ضمن اینکه تجسم میزان هزینه‌های تعمیراتی نیز مشکل را دو چندان می‌کند.

وجود ترك‌ها در فلز عملاً مشکل سرگیجه‌آوری است، زیرا ارزیابی منشاء و نحوهٔ توسعه و میزان خطرات احتمالی آن دشوار است، به‌خصوص که غالباً ابهاماتی نیز در مورد چگونگی طراحی سازه و ساخت آن و بهره‌برداری از آن وجود دارد. چندی قبل من نه چاقوی ضدزنگ را روی میزم به ردیف چیده بودم، که بی‌شباهت به اتوبوس‌های گرومان فلکسیبل پارك‌شده در کنار رودخانهٔ نیویورك نبود. همانند اتوبوس‌ها، خیلی از این چاقوها ترك برداشته بودند که ترك سه تای آن‌ها در انتهای تیغه در نزدیکی دسته کاملاً قابل مشاهده بود. اگرچه که چاقوهای ترك خورده ظاهراً قابل استفاده می‌نمود، ولی شکاف‌های فلز آن را خطرساز

و شکننده نشان می‌داد، و من می‌خواستم که علت ایجاد ترک‌ها و عواقب احتمالی استفادهٔ بیش‌تر از آن‌ها را مشخص کنم.

تصور میزان خطرات احتمالی ناشی از خراب شدن فولاد چاقو چندان مشکل‌تر از اتوبوس نیست. فرض کنید که شبی هنگام خوردن و بریدن تکه‌ای گوشت تیغهٔ چاقو به استخوان برخورد کند، و ترک چاقو ناگهان باز شود و فشار دستم روی چاقو باعث شود که مچ دستم محکم به لبهٔ بشقاب بخورد. همهٔ محتویات بشقاب به‌همراه تیغهٔ کنده‌شدهٔ چاقو به هوا پرتاب شود و تیغهٔ چاقو از پنجرهٔ باز اتاق خارج شده و با عبور از کوچه از میان پنجرهٔ باز اتاق همسایه وارد شده و از میله‌های قفس قناری وی گذشته در گلوی قناری فرو رود. چه کسی می‌تواند حدس بزند که چه اتفاقات دیگری ممکن است به‌وجود آید؟ همین‌طور که چاقوهای روی میز را بررسی می‌کردم همسرم با چند چاقوی قدیمی وارد شد و آن‌ها را نیز به مجموعهٔ قبلی اضافه کرد، و من بازرسی ایمنی غیررسمی چاقوهای ترک‌خورده را شروع کردم، این بازرسی شامل آنالیز تنش طراحی آن‌ها و مروری بر چگونگی ساخت و نحوهٔ استفادهٔ قبلی و همچنین تعیین قابلیت آن‌ها برای استفادهٔ بعدی بود.

چاقوها از یك مجموعهٔ سرویس قاشق و چنگال بودند که از زمان ازدواج به‌مدت پانزده سال همه‌روزه و در مهمانی‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌دادیم. چاقوها طی این مدت مشکل خاصی ایجاد نکرده بودند، گرچه که این سابقهٔ ایمنی درخشان تا حدی نیز به چاقویی مربوط می‌شود که حدود ده سال پیش ترکی در آن مشاهده کردیم و آن را دور انداختیم. بعدها ترك جزیی در دو تا از چاقوها دیده شد که نخواستیم از آن‌ها صرفنظر کنیم. ولی وقتی که یك شب سر میز شام صحبت ما از ترك‌های اتوبوس‌های گرومان فلکسیبل در روزنامهٔ نیویورک تایمز به ترك‌های چاقوهای قدیمی خودمان کشیده شد، از آن پس هنگام غذا خوردن

فکر ترک‌های چاقو مرا رها نمی‌کرد.

مقاومت تئوریکی فلزات که از استحکام و قدرت چسبندگی اتم‌ها قابل استنباط است در سازه‌های مهندسی بسیار دور از دسترس است. شرایطی که طی آن و توسط افرادی که عرق‌ریزان و با مشقت زیاد همراه با بعضی سهل‌انگاری‌ها و افکاری که در جاهای مختلف می‌چرخد، میلیاردها اتم گوناگون به هزاران وضع مختلف مخلوط شده و به انواع فولاد تبدیل می‌گردد، با شرایط مرتب و منظم افکار فیزیکدان‌ها کاملاً متفاوت است. فلزات نیز همانند انسان‌ها اسیر شرایط آماری و احتمالات هستند، و سازندگان پل‌ها و اتوبوس‌ها و چاقوها فقط بر اساس احتمالات می‌توانند به این فلزات اطمینان خاطر داشته باشند. ضمن آنکه رفتار هر مجموعه‌ای بستگی کامل به رفتار تک‌تک اجزاء نیز دارد.

برای درک بهتر رفتار چاقو فعلاً فرض کنید که چاقو به‌جای فولاد از لاستیک ساخته شده باشد. هنگام استفاده از این چاقو برای بریدن یا مالیدن چیزی تیغهٔ آن خم خواهد شد. برای بهتر آشنا شدن با تنش‌های مکانیکی که در اثر خم شدن تیغهٔ چاقو به‌وجود می‌آید باز هم فرض کنید که سطح تیغه با لایه‌ای از رنگ شکننده پوشیده شده باشد. همانند چاقوی اسباب‌بازی کودکان، که شاید بسیاری از ما نیز چنین چاقویی داشته‌ایم، با خم شدن تیغهٔ چاقو در رنگ آن ترک ایجاد خواهد شد. علت ایجاد ترک‌ها آن است که مادهٔ تشکیل‌دهندهٔ چاقو هنگام خم شدن تغییر شکل داده و فشرده‌تر یا کشیده‌تر می‌شود، و رنگ روی لاستیک نمی‌تواند به همان مقدار فشرده‌تر و یا کشیده‌تر شود و در نتیجه ترک برمی‌دارد.

چاقوهایی هم که از فولاد ضدزنگ ساخته می‌شوند، اگرچه که از نمونه‌های مشابه لاستیکی بسیار زیاد سخت‌تر هستند، لیکن آن‌ها هم مانند لاستیک دارای مقداری حالت الاستیک بوده و بعد از خم شدن مانند فنر به حالت قبل خود برمی‌گردند. (من این حالت را می‌توانم به‌وضوح با خم

کردن یکی از چاقوهای ترک‌دار در جلوی نور چراغ رومیزی مشاهده کنم. با خم کردن تیغهٔ چاقو درز ترک بازتر شده و نور بیش‌تری از آن عبور می‌کند و با برداشتن فشار مجدداً به حالت اول خود برمی‌گردد). همان‌طور که لایهٔ رنگ چاقوی لاستیکی ترک برمی‌دارد و به‌صورت پوسته‌ای جدا می‌شود، سطح فلزی تیغه نیز تمایل دارد به حالتی در آید که با کشش موجود مقابله کند.

حتی سخت‌ترین و مستحکم‌ترین فلزات نیز در مقابل دفعات خم و راست شدن دارای محدودیتی خاص هستند. و هرچه میزان خم شدن بیش‌تر باشد، با تعداد دفعات کم‌تری از خم و راست شدن، آسیب وارده خود را نشان می‌دهد. بعد از تکرار دفعات بسیار، حتی در قطعه‌ای که با دقت و مهارت تمام ساخته شده باشد، ترکی بسیار جزئی در نقطه‌ای که دارای تنش بیش‌تر بوده و یا حساس‌تر بوده است ایجاد می‌گردد و به‌تدریج گسترش پیدا می‌کند تا به حدی برسد که این قطعه دیگر تحمل مقاومت حتی یك دفعه خم شدن را هم نداشته باشد. چنین ترک‌هایی را ترک‌های خستگی[1] می‌نامند و نهایت طاقت یك قطعهٔ مکانیکی یا سازه‌ای در مقابل تکرار تنش‌های رفت و برگشتی را عمر خستگی[2] گویند.

ترک‌های چاقوهای ما همگی در ناحیه‌ای قرار داشتند که ضخامت فلز کم‌تر بوده و تنش مکانیکی بیش‌تری به آن وارد می‌شده است. هرگونه امکان ایجاد ترك را می‌توان در این ناحیه انتظار داشت، و استفادهٔ بیش‌تر از چاقوی ترک‌دار باعث توسعهٔ ترك آن می‌گردد. اگرچه که برای ایجاد ترك در این فولاد سخت میلیون‌ها و شاید هم میلیاردها بار خم شدن لازم است، ولی به‌هرحال مسلماً این ترك بالاخره به‌وجود خواهد آمد

---

1 - fatigue crack
2 - fatigue life

همان‌گونه که یك گیرهٔ کاغذ پس از تعدادی خم و راست شدن خواهد شکست.

قبل از اینکه متوجه ترك‌های تیغهٔ چاقوها بشویم، همیشه آن‌ها را به‌طور تصادفی و بدون ملاحظهٔ اینکه ترك دارند یا ندارند هر کدام که دستمان می‌آمد برمی‌داشتیم. اگر مدت استفاده را پانزده سال و هر سال ۳۶۵ روز و در هر روز سه وعده غذا و در هر وعده نیز دوازده بار خم و راست شدن فرض کنیم، حداکثر حدود ۲۰۰۰۰۰ بار امکان باز و بسته شدن ترك بر اثر تنش وجود داشته است. طبق معیارهای مهندسی، چنین دفعات استفادهٔ مکرر از نظر ایجاد و توسعه ترك خستگی ناچیز است. همچنین، اگر چاقوها یکسان ساخته شده باشند و به‌طور یکسان نیز مورد استفاده قرار گرفته باشند و به‌طور یکسان تحت اثر خستگی مکانیکی قرار گرفته باشند، قاعدتاً می‌توان انتظار داشت که پس از پانزده سال کم و بیش به‌طور یکسان دچار ترك شده باشند. در حالی که چنین نبود (سه تا از چاقوها تقریباً تا وسط ترك داشتند در حالی که بقیه اصلاً ترك نداشتند). این معلوم می‌کرد که احتمالاً چاقوهای ترك‌دار سابقه‌ای متفاوت با بقیه داشته‌اند. ترك‌ها اگرچه که ممکن بوده است تا حدی متأثر از خستگی بوده باشند، ولی عامل اصلی آن‌ها بایستی چیزی غیر از عوامل مکانیکی محض بوده باشد، لذا برای یافتن نشانه‌های بیش‌تر با دقت بیش‌تری به آن‌ها نگاه کردم.

منشاء ساخت این چاقوها بر من معلوم نبود غیر از اینکه روی هشت تای آن‌ها عبارت " ضدزنگ، ژاپن " و روی نهمی عبارت " فولاد ضدزنگ، ژاپن " حك شده بود. چنین اختلاف عجیبی در یك مجموعهٔ به‌ظاهر یکسان و یکدست به‌مدت پانزده سال نامکشوف مانده بوده تا اینکه همهٔ آن‌ها همانند اتوبوس‌ها برای بازرسی به ردیف شده بودند. نه تنها عبارات حك‌شده یکسان نبودند بلکه از حروف غیریکسان و با

فشارهای مختلف استفاده شده بوده است. ما تاکنون اصلاً به چنین جزئیاتی توجه نکرده بودیم، همان‌طور که هیچ کس به جزئیات سازه‌ای غلط تکیه‌گاه راهروهای هتل هایت کانزاس تا قبل از فرو ریختن آن توجهی نکرده بود.

تا قبل از چنین کشفیاتی من فکر می‌کردم که چاقوها از همدیگر غیرقابل تشخیص هستند، اگرچه که ایجاد ترك در تعداد خاصی از آن‌ها قاعدتاً بایستی هشدار لازم را به من می‌داد که چاقوها اختلافاتی با یکدیگر دارند. و وقتی که این چاقوها از قاشق و چنگال‌ها جدا شده و در کنار هم ردیف شدند تازه معلوم شد که این مجموعه توسط یك دستگاه ساخته نشده است.

طرح چاقوها ساده بود و فقط چند برگ گل برجسته دستهٔ آن را تزئین می‌داد. پس از موشکافی بیش‌تر معلوم شد که طرح تزئینی دستهٔ هیچ کدام از چاقوها همانند هم نیست، و وقتی که همهٔ آن‌ها را به‌صورت یك دسته به‌طور قائم روی میز نگهداشتم دیدم که طول آن‌ها هم به یك اندازه نیست. بنابراین چاقوها دارای مشخصهٔ خاص کار دست بودند، یعنی تولید فردی.

فلز این چاقوها به احتمال قوی مطابق دستورالعملی ساخته شده است که نام ترکیب آهن و کربن و دیگر فلزات آن از نام متالورژیست انگلیسی ویلیام چندلر روبرتز آستن[1] گرفته شده و در طبقه‌بندی مؤسسه فولاد و آهن آمریکا[2] با نوع ۳۰۴ شناخته می‌شود:

ترکیب فولاد ضدزنگ آستنیتی

آهن ۷۰۰ کیلوگرم

---

1 - William Chandler Roberts-Austen

2 - American Iron and Steel Institute

کروم	۱۸۰	کیلوگرم
نیکل	۸۰	کیلوگرم
منگنز	۲۰	کیلوگرم
سیلیکون	۱۰	کیلوگرم
کربن	۸	کیلوگرم
فسفر	۱	کیلوگرم
گوگرد	۱	کیلوگرم

آهن در یك کورهٔ بسمر[1] ریخته شده و به حالت ذوب در می‌آید. سپس دیگر عناصر آلیاژ به آن اضافه شده و مخلوط می‌گردد و درون شمش‌ها ریخته می‌شود.

همان‌طور که هر آشپزی می‌داند کیفیت مواد اضافه‌شونده متفاوت است و میزان مصرف آن‌ها در هر بار پخت، اگرچه که مطابق یك دستورالعمل خاص است، ولی عملاً دقیق نمی‌باشد مخصوصاً اگر که دستورالعمل مستلزم استفاده از عناصر متعدد به مقادیر کم باشد. و وقتی هم که بعضی فولادهای ضدزنگ از مصالح معدنی و بعضی نیز از آهن قراضه تهیه شود، کیفیت شمش‌های به‌دست آمده اختلاف بیش‌تری خواهد داشت.

اینکه یك مخلوط فولاد ضدزنگ بهتر یا بدتر از مخلوط دیگر باشد، بیش‌تر از آنکه به کیفیت مادهٔ اصلی آن بستگی داشته باشد به مقدار چاشنی‌های آن از قبیل مقدار گوگرد بستگی دارد. وقتی که در دههٔ ۱۹۷۰ یك راکتور هسته‌ای آزمایشی بزرگ در دست ساخت بود، مهندسان و متالورژیست‌ها تصمیم گرفتند برای ساختن قطعات حساسی از هستهٔ راکتور فولادی تهیه کنند که در آن به‌جای آهن بازیافته‌شده از

---

1 - Bessemer

آهن تازه استفاده شود و میزان فلزات چاشنی آن را نیز به‌دقت تعیین کردند. با ساختن ترکیب مخصوصی از فولاد آنان امیدوار بودند که بتوانند خواص مکانیکی قطعات را بهتر کنند، همان‌طور که ریخته‌گران آمریکایی ناقوس آزادی با تغییر دادن ترکیب فلز در صدد بهتر کردن کیفیت صدای آن بودند. متأسفانه فولاد جدید راکتور دارای چقرمگی کم‌تری از ترکیب فولاد اصلی بود. گرچه کارکردن با این آلیاژهای پیچیده منجر به ناکامی شد، ولی مهندسان و متالورژیست‌ها حداقل درس دیگری از آنچه که نبایستی بکنند آموختند.

سازندهٔ چاقوهای ما به احتمال قوی از فولاد ضدزنگ ساخت خانگی استفاده نکرده بوده است، ولی مطمئناً فولاد مصرفی وی کیفیت بالایی نداشته است. مشخص نیست که فولاد همهٔ چاقوها از یك مخلوط بوده باشد، ولی اگر از چند مخلوط مختلف فولاد استفاده شده باشد می‌توان توجیه کرد که تیغه‌های ترك‌دار از یك مخلوط معیوب ساخته شده بوده‌اند. مضافاً اگر واقعاً تیغه‌های ترك‌دار از یك شمش معیوب ساخته شده باشند من دلیل کم‌تری برای ظنین شدن به کیفیت و سلامت دیگر چاقوها خواهم داشت، زیرا به‌طور منطقی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بقیهٔ چاقوها که سالم مانده‌اند همان‌طور که در حالت عادی انتظار می‌رود همگی از یك مخلوط فولاد خوب ساخته شده‌اند.

نحوهٔ ساخت چاقوها عامل مهمی است، و ساخت انفرادی آن‌ها نشان می‌دهد که هرکدام به نحوهٔ متفاوتی ساخته شده باشند. شاید ساختن آن‌ها از طریق بریدن قطعاتی از میله‌های فولادی طویل شروع شده باشد. و سپس یك طرف آن را با کوبیدن به‌صورت دستهٔ چاقو و طرف دیگر را با غلتك زدن یا چکش‌کاری به‌صورت تیغه در آورده باشند. عمل غلتك‌زنی یا چکش‌کاری، که احتمالاً با نوعی چکش مکانیکی انجام شده، قاعدتاً بایستی وقتی انجام شده باشد که فولاد خیلی داغ بوده است، و نه

به حالت ذوب، که به روش " کار سرد "[1] خوانده می‌شود.

چاقوها بعد از کار آهنگری احتمالاً تحت فرآیند عملیات حرارتی[2] قرار گرفته‌اند، این فرآیند عبارت است از گرم کردن فولاد تا دمای بسیار زیاد و سپس سرد کردن با سرعت معینی که به‌منظور آبدیده کردن انجام می‌شود. احتمالاً چاقو دوباره تا حد دمای نسبتاً کم‌تری حرارت داده شده و سپس سرد شده است تا هرگونه شکنندگی فولاد کاملاً از بین برود. بقیهٔ کارها نیز عبارت بوده است از شکل دادن نهایی تیغه و تیز کردن آن و دندانه‌دندانه کردن یك طرف و حك کردن علائم یا حروف بر روی آن و صیقل‌کاری.

کار سرد ِ زیاده از حد باعث سخت شدن فولاد می‌شود، و فولاد سخت از فولاد نرم آسان‌تر ترك می‌خورد. شاید تعدادی از چاقوهای ما، همان‌ها که ترك خورده‌اند، زیادی چکش‌کاری شده باشند، و یا اینکه نوشته‌های آن‌ها با ضربهٔ خیلی شدیدی حك شده باشد. علتی دیگر برای ایجاد ترك‌ها می‌تواند ناشی از کار صیقل‌کاری یا مضرس‌کاری باشد که احتمالاً باعث ایجاد عیب کوچکی روی تیغه گردیده است که ترك‌ها از آن جا شروع شده‌اند. یا اینکه شاید چاقوها به‌طور یکنواخت سرد نشده باشند و یا خیلی سریع سرد شده باشند که این کار باعث باقی ماندن تنش‌های پسماند در فلز می‌گردد.

عامل آخری می‌تواند بسیار محتمل‌تر باشد زیرا ترك‌های ایجادشده از این طریق به‌طور نسبتاً مشابه روی یك گروه چاقو به‌وجود می‌آید و این ترك‌ها نیز به‌سرعت تا اندازهٔ خاصی توسعه پیدا کرده و سپس متوقف می‌شوند. با توجه به اینکه من طی چند سال اخیر تغییر محسوسی در

---

1 - cold working
2 - heat treatment

اندازهٔ ترک‌ها مشاهده نکرده بودم، مقدار توسعهٔ ترک‌ها بر اثر عامل خستگی مکانیکی بایستی آن‌قدر ناچیز بوده باشد که در مقایسه با مقدار کل ترک قابل اغماض باشد. اگرچه که بر اثر استفادهٔ مدام از چاقوها حتماً ترک‌های آن‌ها تیزتر شده و توسعه پیدا خواهد کرد، ولی میزان بسیار غیرمحسوس آن هرگونه پیش‌بینی برای آینده را دشوار می‌سازد.

باز هم عوامل احتمالی دیگری را نیز می‌توان به‌عنوان منشاء ایجاد ترک در چاقوها نام برد. گاهی بر اثر فرآیند شیمیایی- مکانیکی خاصی که ترک خوردگی تنشی خوانده می‌شود و هنوز هم کاملاً شناخته نشده است درفولاد ترک ایجاد می‌شود. برای به‌وجود آمدن چنین ترکی بایستی سه شرط فراهم باشد: وجود میزان خاصی تنش و وجود محیط خورنده و ایجاد حساس‌سازی در هنگام ساخت که باعث تضعیف قطعه و مستعد شدن آن برای ترک خوردن می‌گردد. چاقوها مطمئناً در هنگام سرد شدن و یا بریده شدن در نواحی ترک تحت تنش قرار گرفته‌اند، و مجاورت آن‌ها با نمک آشپزخانه باعث حضور یون‌های کلرور در محیط بوده است که برای فولاد ضدزنگ بسیار خورنده است. (فولاد ضدزنگ اسم بی‌مسمایی است زیرا که در آب شور دچارخوردگی می‌شود).

تعدادی از این چاقوها ممکن است بر اثر گرم و سرد شدن غیرمناسب در حین ساخت حساس شده باشند. شسته نشدن چاقوها تا روز بعد و باقی ماندن نمک به‌مدت طولانی بر روی این چاقوهای حساس‌شده باعث تسریع ترک‌ها می‌گردد. و با شسته شدن چاقو و پاک شدن محلول نمک مضر از محل ترک توسعهٔ آن متوقف می‌شود. یا اینکه ترک در هنگام توسعه به ناحیه‌ای غیرحساس از فلز می‌رسد و ترک خوردگی تنشی آن متوقف می‌شود. ترک‌ها در زیر ذره‌بین به‌صورت ناهموار و دندانه‌دار دیده می‌شود که مسیری زیگزاگ در روی تیغهٔ چاقو دارد. این شکل مشخصهٔ ترک‌های خوردگی تنشی است که به‌صورت کج و معوج در میان

دانه‌های همجوار فلز توسعه پیدا می‌کند.

به‌طور کلی ظواهر امر حاکی از آن است که ترک‌های چاقوهای ما بر اثر خوردگی تنشی یا عملیات حرارتی ایجاد شده و سپس تقریباً متوقف شده است، و به علت خستگی به‌طور نامحسوسی توسعه یافته است. اگر چنین باشد، می‌توان گفت که احتمال ایجاد ترک در چاقوهای سالم، و احتمالاً غیرحساس، وجود نداشته و با اطمینان خاطر و بی‌هیچ محدودیتی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. چاقوهای ترک‌دار را نیز که ما طی این چند سال استفاده می‌کرده‌ایم باز هم می‌توانیم مورد استفاده قرار دهیم، ولی نباید به آن‌ها زیاد فشار وارد کنیم و مواظب توسعهٔ احتمالی ترک‌های آن باشیم مبادا که مرحلهٔ جدیدی از ترک در آن‌ها شروع شود.

نگاه کردن به ترک تنها راه کنترل توسعهٔ احتمالی آن نیست. هرگاه دو چاقو را که یکی از آن‌ها ترک داشته و دیگری سالم باشد به لیوان آب بزنیم صدای متفاوتی ایجاد خواهد شد. ترک باعث کاهش سختی چاقو می‌شود و در نتیجه با فرکانس متفاوتی به ارتعاش در می‌آید. گوش انسان به آسانی می‌تواند تفاوت صدای ارتعاش چاقوی ترک‌دار و غیرترک‌دار را تشخیص دهد و همچنین می‌تواند هرگونه تغییر زیاد در طول ترک را بدین ترتیب تشخیص دهد. همان‌طور که بازیکنان پینگ‌پونگ قبل از مسابقه صدای توپ را روی میز امتحان می‌کنند، ما هم می‌توانیم قبل از غذا خوردن با زدن چاقو به بشقاب آن را امتحان کنیم.

چاقوهای ما چندین سال بود که مشکل جدیدی در رابطه با ایجاد ترک و یا توسعهٔ آن نداشتند، اما اتوبوس‌های گرومان فلکسیبل با ایجاد ترک‌های جدید در قسمت‌های مختلف شاسی آن به‌طور مستمر مشکلات جدیدی خلق می‌کردند، و به‌همین علت بود که در نهایت به‌طور کامل از ناوگان حمل و نقل شهری نیویورک کنار گذاشته شدند. و پس از

بررسی مکانیکی اتوبوس‌ها، که چندان بی‌شباهت به آنچه که من روی چاقوها انجام دادم نبود، بررسی حقوقی موضوع شروع شد. و حل و فصل حقوقی قضیه مدت زمان بسیار بیش‌تری را می‌طلبد، زیرا به علت وجود نقائص در قراردادها و وجود روزنه‌هایی در قانون، اعلام نتیجه بسیار مشکل‌تر از بررسی وضعیت ترك در فولاد است، مخصوصاً که وکلا و حقوقدانان به این سادگی از خستگی از پا در نمی‌افتند.

اگرچه که توجه و بررسی ما بر روی چاقوهای ترك‌دار بیش‌تر یك موضوع شخصی بوده است، ولی روش بررسی به‌کار رفته در این تجربه تفاوت چندانی با آنچه که بایستی پس از کشف ترك در هر سازهٔ مهندسی مهمی صورت بگیرد نداشت. اما به‌هرحال، علی‌رغم استدلال‌ها و فرضیاتی که در خصوص منشاء فلز و نحوهٔ ساخت چاقوها شد، بررسی ترك‌ها در یك اتوبوس و یا مخصوصاً در یك نیروگاه برق هسته‌ای بایستی به‌طور دقیق اطلاعات و اسناد لازم را برای پاسخ‌گویی به سؤالاتی مشابه با آنچه که در مورد چاقوها پیش آمد بیابد. با در دست داشتن چنین اطلاعاتی است که می‌توان ترك‌ها و خطرات بالقوهٔ آن‌ها را دقیق‌تر مورد بررسی قرار داد، و نتایج چنین بررسی‌هایی متضمن درس‌های آموزنده و هشدارهای احتیاطی برای آینده خواهد بود.

۱۲

داستان موفقیت کریستال پالاس

نوآوری در مهندسی، همانند هر کار دیگری، مستلزم خطرپذیری و به استقبال اشتباهات احتمالی رفتن می‌باشد. ولی الزاماً به این معنی نیست که هر نوآوری منجر به شکست می‌شود. و امروزه مهندسان وقتی که می‌خواهند پلی بزرگ‌تر از پل‌های موجود یا آسمانخراشی بلندتر از ساختمان‌های موجود بسازند و از مصالح جدید یا طرح‌های سازه‌ای جدید استفاده کنند کاملاً مسؤولانه عمل می‌کنند، و همواره وجود پروژه‌های مهندسی اعجاب‌آور که باعث مردود شدن تشکیک‌های منفی‌بافان در مورد این یا آن طرح جدید و جسورانه بوده است مهر تأییدی بر این ادعا است. این مهندسان در واقع ادامه دهندگان راه سازندگان زبردست ساختمان‌های باشکوه و جاه‌طلبانهٔ قرن نوزدهم هستند که کارهای بزرگ و موفق آن‌ها معارضین را به تسلیم وامی‌داشت. و یکی از جاه‌طلبانه‌ترین و بدیع‌ترین سازه‌های آن دوران یك پل یا یك برج نیست، بلکه ساختمان وسیعی است که برای نمایشگاه بزرگ لندن در سال ۱۸۵۱ ساخته شد. سرگذشت کریستال‌پالاس ماجرای مجذوب کننده‌ای است که بیان آن بسیار آموزنده است، زیرا نشان می‌دهد که

مهم نیست سازهٔ مهندسی تا چه حد متهورانه باشد و مهم نیست که چقدر مخالف داشته باشد، بلکه برای اثبات حقانیت خود کافی است که ساخته شود و امتحان خود را پس بدهد.

جوزف پکستون[1] در سال ۱۸۰۱ به دنیا آمد، پدر وی در بدفوردشر[2] کشاورزی می‌کرد. وی در اوایل جوانی باغبانی می‌کرد و به خدمت دوك دوون‌شر[3] در آمد، و در سال ۱۸۲۶ مباشر باغ‌های چتزوورث[4] در املاك دوك دربی‌شر[5] شد. پکستون استعداد خاصی در طراحی سازه از خود نشان داد، و در سال ۱۸۴۰ گلخانه‌ای ساخت که زمینی به مساحت یك جریب را می‌پوشاند. این سرپناه بزرگ در چتزوورث در آن زمان حیرت‌انگیز می‌نمود، و پکستون اگرچه اسماً مهندس نبود ولی عملاً و قلباً به کارهای مهندسی رو آورد، و گلخانه‌ای مشابه نیز در کیو گاردن[6] در نزدیکی لندن ساخت، و این سرآغاز دورهٔ جدیدی در زندگی وی برای ساختن سازه‌های مختلف گردید.

هنگامی که پکستون در چتزوورث کار می‌کرد قلمه‌ای از نیلوفر آبی بزرگ از باغ کیو برای پرورش در گلخانه آورد. این گیاه در سال ۱۹۳۷ از منطقهٔ حاره گویان آورده شده بود ولی در کیو رشدی نداشت. ولی بر اثر مراقبت‌های پکستون این گیاه برگ‌های بسیار بزرگ و گل‌های زیبای خود را نشان داد. پکستون نام آن را ویکتوریا رژیا گذاشت (که اکنون به نام اصلی آن یعنی ویکتوریا آمازونیکا خوانده می‌شود که قبل از آشنا شدن پکستون با آن به همین نام خوانده می‌شد)

---

1 - Joseph Paxton

۲- Bedfordshire ، ناحیه‌ای در جنوب شرقی انگلستان

۳- Devonshire ، ناحیه‌ای در جنوب غربی انگلستان

4 - Chatsworth

۵- Derbyshire ، ناحیه‌ای در شمال انگلستان

6 - Kew Gardens

و یك شاخه از آن را به ملکه انگلستان هدیه کرد.

با رشد بیش‌تر گیاه، پکستون ساختمان خاصی برای آن ساخت که الگوی سازه‌ای آن را از برگ‌های خود نیلوفر آبی گرفته بود. وی برای نشان دادن استقامت این سازهٔ طبیعی پشت‌بنددار (رگبرگ‌های نیلوفر آبی)، دختربچه خود را روی یکی از برگ‌های آن که یك متر و نیم قطر داشت نشاند. برگ نیلوفر آبی بدون آنکه در آب فرو رود به‌راحتی وزن این کودك را تحمل کرد، و بعدها در آن زمان عکس گرفتن در روی برگ نیلوفر آبی در شکل‌های مختلف به‌صورت مد روز در آمد. پکستون متوجه شده بود که مقاومت و سختی این برگ بزرگ به شکل هندسی رگبرگ‌های آن و حالت متقاطع رگبرگ‌ها در پشت برگ مربوط می‌شود، و آن را به‌عنوان الگو برای کار خود اقتباس کرد. نتیجهٔ کار او گلخانه‌ای در چتروورث به ابعاد حدود ۱۵ متر در ۱۹ متر بود که سقف شیشه‌ای آن بر روی تیرچه‌هایی چوبی متکی به تیرهایی فلزی بود که بر روی ستون‌هایی فلزی استوار شده بودند. این ساختمان سبك و ظریف منجر به ایده‌ای شد برای ساختن کریستال‌پالاس[1] ، که می‌بایستی فضایی به ابعاد ۱۲۰ متر در ۵۵۰ متر را برای نمایشگاه بزرگ لندن پوشش دهد.

با آماده‌شدن دنیای تجارت برای برگزاری اولین نمایشگاه بین‌المللی کارهای صنعتی، دنیای تکنولوژی نیز خود را برای ساختن کریستال پالاس مهیا می‌ساخت. دولت انگلستان در سال ۱۸۴۵ با لغو قانون قدیمی مالیات غیرمستقیم شیشه، مانع بزرگ مالیاتی را برای استفاده از حدود ۳۰۰۰۰۰ جام شیشه در ساختمان از میان برداشت. بریتانیای کبیر سالانه حدود ۴/۵ میلیون تن آهن ریختگی و آهن ورزیده تولید می‌کرد که

---

1 - Crystal Palace

بیش از هزار برابر مقدار مورد نیاز برای این ساختمان بود که حدود ۴۰۰۰ تن آهن نیاز داشت. و با توجه به اینکه کار کریستال پالاس واقعاً عظیم بود، تجربهٔ مهندسی حاصل از توسعهٔ شبکه راه‌آهن انگلستان که شامل صدها پل آهنی بود، اطلاعات ارزشمندی در خصوص مقاومت مصالح را که برای اجرای این طرح جسورانه مورد نیاز بود در اختیار گذاشت. (اگرچه که در آن زمان تعداد پل‌هایی که دچار خرابی می‌شدند در حال افزایش بود، به‌طوری‌که کمیته‌ای سلطنتی برای بررسی استفاده از آهن به‌عنوان یك مصالح مهندسی شروع به فعالیت کرده بود، با این حال اطمینان کافی برای استفاده از آهن در یك ساختمان غول‌پیکر استاتیك وجود داشت که در عمل تحت اثر بارهای دینامیکی مشابه چرخ‌های قطار و وزن‌های رو به افزایش واگن‌ها و لکوموتیوها قرار نمی‌گرفت). و بالاخره ترتیب کارها طوری انجام شد که کریستال پالاس در آخرین زمان‌ها برای استقرار نمایشگاه بزرگ آماده شد.

برای اولین بار هنری کول[1] ، که از طرفداران هنر بود و علاقه و تلاش خستگی‌ناپذیر وی در راه معماری و طراحی صنعتی به یادماندنی است، پیشنهاد کرد که چنین نمایشگاه بین‌المللی بایستی سیمای کاربرد هنر در صنعت را نشان دهد. کول، برخلاف جان راسکین[2] که به محصولات و نتایج انقلاب صنعتی چندان روی خوش نشان نمی‌داد، معتقد به همگامی و تلفیق هنرهای زیبا و مهندسی بود. نظر کول در بارهٔ نمایشگاه بزرگ منبعث از دیدگاهی بود که وی قبلاً در سال ۱۸۴۷ در انجمن هنر[3] شرح داده بود:

---

1 - Henry Cole

۲- John Ruskin ، (۱۹۰۰-۱۸۱۹م)، مقالنویس و منتقد و اصلاح‌طلب انگلیسی

3 - Society of Arts

در این کشور کارهای هنری باشکوه به وفور انجام شده است، و ابداعات و صنایع مکانیکی آن فراوان و بی‌همتا است. کاری که هنوز مانده است و بایستی انجام شود به مرحلهٔ عمل درآوردن تلفیق این دو است، یعنی همجوشی هنر متعالی با مهارت‌های مکانیکی.

شاهزاده آلبرت از این فکر استقبال کرد و هاید پارك[1] را بهترین محل برای برگزاری نمایشگاه بزرگ دانست. در اوایل سال ۱۸۵۰ شاهزاده آلبرت رئیس یك کمیتهٔ سلطنتی برای اجرای این پروژه شد، و بزودی یك کمیتهٔ ساختمانی نیز تشکیل شد. این کمیته رویای یك سازهٔ موقتی را در سر می‌پروراند که شانزده جریب زمین را بپوشاند، و بدین منظور طرح آن را به مسابقه گذاشت. ولی کمیته هیچ‌کدام از ۲۴۵ طرح دریافتی را قابل قبول ندانست و اقدام به تهیهٔ طرحی بر اساس استفاده از قسمت‌های مناسبی از طرح‌های مذکور نمود. طرحی که توسط کمیته تهیه شده بود در ژوئن همان سال در روزنامهٔ ایلاستریتد لندن نیوز به چاپ رسید که بلافاصله توسط روزنامهٔ تایمز[2] به باد انتقاد گرفته شد.

مطابق این انتقادات ساختمان پیشنهادی " توده عظیمی از مصالح " بود که گمان نمی‌رفت هرگز برداشته شود و عملاً به‌صورت " زائده دایمی بی‌اندامی در هاید پارك " در خواهد آمد. طرح بی‌قوارهٔ کمیته نیازمند پانزده میلیون آجر و همچنین ساخت گنبدی به قطر شصت متر بود که از گنبد کلیسای سن‌پاول[3] هم بزرگ‌تر بود. ملات این حجم از کار

---

1 - Hyde Park
2 - *Times*
3 - St. Paul's Cathedral

بنّایی نیز احتمالاً تا زمان شروع کار نمایشگاه که کم‌تر از یك سال به آن باقی مانده بود خشك نمی‌شد.

در همین احوال، نمایندگان مجلس بر سر اصل برپایی نمایشگاه و همچنین محل آن بحث و جدال داشتند. بعضی‌ها نگران نفوذ رقبای خارجی در بازار فروش داخلی و خارجی محصولات انگلیسی بودند، و بعضی‌ها نیز به مشکل ازدحام و شلوغی جمعیت و آشوب‌ها و خطرات احتمالی آن فکر می‌کردند. یکی از مخالفان پر سر و صدا سرهنگ چارلز سیبتورپ[1] بود که از طرفداران پر و پا قرص حمایت از تولیدات داخلی به‌شمار می‌رفت. وی کسی بود که با قانون کتابخانه‌های عمومی سال ۱۸۵۰ نیز مخالفت می‌کرد و یکی از دلایل وی این بود که " هرگز مطالعه کردن را دوست نداشته‌ام. " مهم‌ترین علت مخالفت وی با محل نمایشگاه بریده شدن تعدادی از درخت‌های نارون پارك بود. به‌هرحال این استدلال در مجلس پذیرفته شد، و اعتراضات سرهنگ سیبتورپ و پشتیبانان وی تا حدی فروکش کرد.

پکستون در این مسابقه شرکت نکرده بود، زیرا به حساب خودش فکر می‌کرد که کمیتهٔ ساختمانی بدون همکاری وی نیز می‌تواند طرح مناسب را تهیه کند. ولی وقتی که با طرح‌های پیشنهادی که کم و بیش در میان مردم مورد بحث قرار می‌گرفت مواجه شد کاملاً ناامید شد، مخصوصاً که زمان برای ارائه یك طرح جدید بسیار دیر بود. اگرچه که پکستون فقط دو هفته قبل از زمان اعلام رسمی نتیجهٔ طرح انتخابی کمیتهٔ ساختمانی به مسؤولین نمایشگاه مراجعه کرد، ولی موفق شد که آنان را برای پذیرفتن و بررسی یك طرح جدید متقاعد کند. این توافق در ۱۱ ژوئن ۱۸۵۰ حاصل شد، و پکستون در همان روز لندن را به قصد

---

1 - Charles Sibthorp

دیدن پل آهنی بریتانیا[1] در منای استریتز[2] در ولز ترك کرد. وی در همین سفر که تمام وجودش از فکر ساختمان نمایشگاه بزرگ لبریز شده بود طی جلسه‌ای که شرکت کرده بود طرح اولیهٔ چیزی را که بعدها به کریستال پالاس تبدیل شد بر روی کاغذ یادداشت ترسیم کرد. طی هفتهٔ بعد به کمك پیتر بارلو[3] که مهندس راه‌آهن بود ستون‌ها و تیرها طراحی شد و طرح کامل گردید. پکستون در راه برگشت به لندن با رابرت استونسن مهندس پل ملاقات کرد و طرح خود را به وی نشان داد، استونسن از دیدن آن طرح به وجد آمده بود.

کمیتهٔ ساختمانی ابتدا چندان علاقه‌ای به این طرح جدید نشان نداد، ولی به‌تدریج حامیان طرح بیش‌تر شد. و پس از اینکه طرحی از این پیشنهاد در ایلاستریتد لندن نیوز روز ۶ جولای چاپ شد، کمیته بزودی از طرح خود صرفنظر کرد و متفق‌القول طرح آهنی - شیشه‌ای پکستون را تصویب کرد. تعدادی از مزایای این طرح عبارت بودند از سادگی طرح و سرعت ساخت و نصب و عدم وجود دیوارهای داخلی و امکان استفادهٔ مجدد از مصالح آن. به‌نظر می‌رسد که مزیت‌های اقتصادی این طرح، یعنی هزینهٔ کم‌تر ساخت و ارزش مصالح آن‌ها پس از برچیدن، علت اصلی و قاطع انتخاب آن بوده است.

با این وجود هنوز مشکل درخت‌های نارون هاید پارك حل نشده بود، تا اینکه پکستون با انجام تغییراتی در طرح اصلی، جناحی مرکزی به آن اضافه کرد که درخت‌های سی‌متری را احاطه می‌کرد. عملیات ساختمانی به‌سرعت و حتی قبل از انعقاد قرارداد توسط پیمانکار پروژه شروع شد، و یك ماه پس از شروع کار قرارداد به امضاء رسید. مبلغ

---

1 - Britannia Bridge

۲ - Menai Straits ، تنگه‌ای در شمال ولز

3 - Peter Barlow

قرارداد بابت برپایی و برچیدن ساختمان ۷۹۸۰۰ پوند بود که مصالح حاصل از برچیدن ساختمان نیز به پیمانکار تعلق می‌گرفت. هزینهٔ نهایی کریستال پالاس، که شامل تغییراتی از قبیل احداث جناح مرکزی و اضافات دیگر بود، به ۲۰۰۰۰۰ پوند بالغ شد. بدین ترتیب هزینهٔ کار حدود ۲/۶ پوند در هر مترمربع شد که در مقایسه با قیمت‌های اواسط قرن نوزدهم بسیار ارزان تمام شده بود.

کارگران در ماه اوت دور محوطهٔ کار را با همان الوارهایی که قرار بود در کف ساختمان به‌کار رود حصارکشی کردند. طبق برنامهٔ تنظیمی پروژه در ژانویهٔ ۱۸۵۱ تکمیل می‌شد، و بدین ترتیب برای پوشاندن محوطهٔ نمایشگاه با آهن و شیشه که مساحت آن به ۱۹ جریب رسیده بود حدود بیست هفته وقت بود. زمین محوطه مسطح شده و فونداسیون‌ها ریخته شد و لوله‌های آهنی ِ زهکشی نصب گردید، و ستون اول ساختمان در ۲۶ سپتامبر استوار شد. عملیات ساختمانی به‌سرعت پیش می‌رفت، و شب‌ها نیز با روشن کردن آتش کار ادامه داشت، و طبق گزارش پکستون دو کارگر در طی شانزده دقیقه دو ستون و سه تیر را نصب می‌کردند. نتیجه آن شد که بزرگ‌ترین ساختمان ساخته‌شده از آهن و شیشه در مدت فقط هفده هفته برپا شد!

نظم ریاضی خاصی که در نسبت‌های اندازه‌های اعضاء ساختمان کریستال پالاس به‌کار رفته بود کار ساختمانی را بسیار ساده می‌کرد. واحد مبنای طول در این ساختمان نه بر اساس نسبت‌های طلایی، بلکه صرفاً بر اساس نیازمندی‌های فضای نمایشگاه و محدودیت تکنولوژیکی تعیین شده بود، این محدودیت مربوط به شیشه‌ها می‌شد که در سال ۱۸۵۰ تولید جام شیشهٔ بزرگ‌تر از چهار فوت پرهزینه بود ضمن آنکه از نظر وزن نیز نصب آن مشکل می‌شد. بنابراین، شیشه‌های سقف به طول چهل و نه اینچ بود که با شیب ملایم و به‌صورت هفت‌هشت قرار داشتند که

علاوه بر ایجاد زیبایی خاص، کار زهکشی را نیز آسان می‌کرد. به‌منظور سهولت کار ساختمانی، نصب شیشه‌های سقف توسط کارگران از روی واگنی انجام می‌شد که چرخ‌های آن در داخل شیار آبروهای معروف به " آبروهای پکستون " قرار داشت و در طول آن حرکت می‌کرد. این آبروها در کنج پایینی سقف کنگره‌ای قرار داده شده بودند و آب‌ها را جمع‌آوری کرده و به داخل ستون‌های تو خالی که به‌عنوان ناودانی آب باران هم عمل می‌کرد منتقل می‌کردند. آبروها به فواصل هشت فوتی قرار داشتند که در واقع همان فاصلهٔ دهانهٔ قرار گرفتن دو جام شیشهٔ چهل و نه اینچی با شیب مناسب بود. تقریباً در سه برابر چنین فاصله‌ای، یعنی به فواصل حدود بیست و چهار فوت، شاه‌تیرها قرار داشتند که ستون‌های آهنی آن‌ها نیز به فواصل بیست و چهار فوتی نصب شده بود. بدین ترتیب در تمام ساختمان کریستال پالاس واحد مبنای اندازه بیست و چهار فوت بود.

معبرهای عریض داخلی با خرپاهایی آهنی به طول چهل و هشت فوت پوشانده می‌شدند. و معبر مرکزی و بسیار تماشایی آن با خرپاهایی به طول سه واحد، یعنی هفتاد و دو فوت، پوشانده شده بود. جناح مرکزیِ قوسی شکل نیز هفتاد و دو فوت عرض داشت. این نظم سادهٔ هندسی بدون شك سهم زیادی در زیبایی و شکوه ساختمان داشت، همان‌طور که در معماری مدرن نیز تکرار واحدهای مبنایی از شیشه یا سنگ تأثیر بسزایی در جلوهٔ ساختمان دارد. قطعات بزرگی به طول‌های هفتاد و هفت فوت و بیست و چهار فوت نیز که در نمای جنوبی کریستال پالاس وجود داشت باعث گمراه شدن تماشاگران، و البته نه افراد کنجکاو و تیزبین، از این واقعیت می‌شد که جناح مرکزی در واقع در مرکز ساختمان قرار نداشت بلکه به اندازهٔ یك واحد از مرکز ساختمان فاصله گرفته بود تا بتواند محل درخت‌های نارون مورد علاقهٔ

سرهنگ سیبتورپ را در بر گیرد.

عمق غیرمتعارف شاه‌تیرها و خرپاها، که حدود سه فوت بود، جلوهٔ زیبایی به کریستال پالاس داده بود. البته از دیدگاه پکستون این نمای زیبا نقشی سازه‌ای نیز داشت، زیرا بدین ترتیب شاه‌تیرها و خرپاها نه فقط در قسمت بالا به ستون‌ها متصل می‌شدند بلکه در فاصلهٔ نسبتاً زیادی در پایین نیز به ستون متصل می‌شدند که باعث افزایش سختی آن‌ها در مقابل باد و دیگر نیروهای جانبی می‌گردید.

علاوه‌بر طرح ساختمان، روش‌های ساخت نیز در سرعت کار تأثیر داشت. پکستون برای ساختن قاب‌های چوبی دور شیشه‌ها دستگاهی درست کرد که به‌طور هم‌زمان از یك الوار چندین چوب را به‌صورت شیاردار و لبه‌دار می‌برید. کارگران برای فاق و زبانه کردن انتهای چوب‌ها از اره گرد استفاده می‌کردند و سوراخ میخ‌ها را به کمك مته‌های حلزونی که با موتور بخار کار می‌کرد ایجاد می‌کردند. جمعاً هفده هزار مترمکعب چوب در کریستال پالاس مصرف شد.

بزرگ کردن مقیاس چیزی مثل گلخانهٔ نیلوفر آبی تا حد یك ساختمان عظیم نمایشگاه می‌تواند کاری فریبنده باشد، زیرا در مهندسی نیز همانند طبیعت هر چیزی که بزرگ‌تر باشد لزوماً نمی‌تواند بهتر هم باشد. به همین سبب، علاوه بر طرفداران محیط زیست که نگران هاید پارك بودند و ادارهٔ بهداشت که دغدغهٔ مسائل بهداشتی و بیماری‌زا را داشتند و کسانی که نسبت به آتش‌سوزی بیم داشتند و کسانی که نگران جرایم در میان میلیون‌ها بازدیدکنندهٔ نمایشگاه بودند، کسانی هم بودند که فکر می‌کردند که اصلاً خود سازهٔ نمایشگاه ایمنی نداشته باشد. وقتی که پادشاه پروس در مورد ایمنی بازدید از نمایشگاه بزرگ لندن بازخواست کرد، شاهزاده آلبرت در پاسخ نامهٔ طعن‌آمیزی نوشت و یکایك پیش‌بینی‌های مخاطره‌آمیزی را که در این خصوص شده بود

برشمرد که " طبق محاسبات ریاضی‌دانان کریستال پالاس بر اثر اولین طوفان سهمگین درهم خواهد شکست، و طبق نظر مهندسان سقف معبرها بر سر بازدیدکنندگان فرو خواهد ریخت. "

علی‌رغم سؤالات و ابهاماتی که از ابتدا در بارهٔ مقاومت و پایداری کریستال پالاس مطرح بود، در طراحی و ساخت آن از نظر ایمنی هیچ کوتاهی به عمل نیامده بود. برای اطمینان بیش‌تر از کافی بودن سختی جانبی شاه‌تیرها و خرپاها، از میله‌های قطری به‌صورت ضربدری استفاده شده بود. از این میله‌ها در قسمت قوسی شکل جناح مرکزی فراوان استفاده شده بود اگرچه که فورم مورب آن‌ها حالت یکدست این فضای بزرگ را به هم زده بود. تك تك شاه‌تیرها که از آهن ریختگی ساخته شده بودند پس از حمل به محل عملیات ساختمانی توسط پرس هیدرولیکی که مخصوص این کار ساخته شده بود آزمایش می‌شد و سطح کنترل کیفی کار به حدی بود که امروزه هم به‌ندرت چنان عمل می‌شود. خرپاهای ساخته‌شده از آهن ورزیده نیز مورد آزمایش قرار گرفتند، البته از هر اندازه خرپا فقط یك نمونه مورد آزمایش قرار گرفت زیرا آهن ورزیده به علت طبیعت ساخت آن دارای کیفیت یکنواخت و قابل اعتمادی است در حالی که در مورد آهن ریختگی چنین اعتمادی کم‌تر وجود دارد.

با این وجود در تمام زمان ساخت انتقادات علیه طرح ادامه داشت، و مخالفان هشدار می‌دادند که باد و یا تگرگ باعث فرو ریختن این جعبهٔ شیشه‌ای خواهد شد، و یا گرما و رطوبت داخل آن در تابستان لندن غیرقابل تحمل خواهد بود. در این میان شعری نیز در مجلهٔ پانچ به چاپ رسید که اگرچه کلاً در حمایت از این ساختمان بزرگ بود ولی حالت نیشدار هم داشت و شعر از زبان خیاری نقل می‌شد که می‌دانست در وسط گرمای سوزان تابستان در داخل یك خانهٔ شیشه‌ای چه بر سر افراد

می‌آید. اما هیچ اتفاقی نیافتاد و کریستال پالاس عملاً نشان داد که به‌طرز رضایت‌بخشی خنک (به کمک پرده‌های آویزان در سقف و پرده‌های دیواری قابل تنظیم در اطراف) و خشک (به کمک آبروهای پکستون) است. ولی کسانی که این ساختمان را محکوم به شکست می‌دانستند مدعی بودند که حتی اگر عوامل طبیعی باعث لطمه زدن به کار نشود، هجوم بازدیدکنندگان مشکلات را برملا خواهد کرد.

گالری‌های وسیعی طرح شده بود تا فضایی اضافی، حدود بیست‌هزار مترمربع، برای گردشگاه و نمایشگاه فراهم شده باشد، ولی از ماه‌ها پیش از افتتاح نمایشگاه بزرگ انتقادات شدیدی علیه راهروهای مرتفع این گالری‌ها وجود داشت. با توجه به اینکه در آن دوران پل‌های آهنی راه‌آهن به‌طور فزاینده‌ای دچار خرابی می‌شدند و پل‌های معلق نیز زیر چکمه‌های رژه سربازان فرو می‌ریختند، برای اثبات ایمنی گالری‌های کریستال پالاس بایستی کاری صورت می‌گرفت. سرانجام برای آزمایش گالری، قطعهٔ مربعی از آن به اندازهٔ بیست و چهار فوت، در بالاتر از سطح زمین و بر روی چهار شاه‌تیر آهنی ریختگی ساخته شد. برای راهروهای ارتباطی آن الوارهای چوبی شیبدار را در کناره‌های آن انداختند. ملکه ویکتوریا و همراهان در یکی از بازدیدهای خود شاهد انجام این آزمایش گواه بودند، که ماجرای آن در اول مارس ۱۸۵۱ در روزنامهٔ ایلاستریتد لندن نیوز چنین آمده است:

> در آزمایش اول ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بار، از طریق قرار دادن ۳۰۰ نفر از کارکنان پیمانکار بر روی کف گالری و راهروهای ارتباطی آن وارد شد.
>
> آزمایش دوم عبارت بود از تجمع افراد به فشرده‌ترین حالت ممکن، در هیچ کدام از این دو آزمایش تغییرمکان قابل ملاحظه‌ای

مشاهده نشد. بنابراین سازه از نظر بار استاتیکی مشکلی نداشت.
آزمایش سوم عبارت بود از وارد کردن بار متحرك ۲۰۰۰۰ کیلوگرمی در شرایط مختلف، بدین ترتیب که همان تعداد کارکنان ابتدا با قدم‌های منظم روی کف گالری راه رفتند، سپس با قدم‌های نامنظم و بالاخره همگی روی کف شروع به دویدن کردند، نتیجهٔ همه این آزمایشات قابل قبول بود.
در آزمایش چهارم، که می‌توان آن را شدیدترین حالت ممکن برای بارگذاری دانست، همان تعداد افراد در کم‌ترین جای ممکن دور هم جمع شده و مدتی بالا و پایین پریدند، بیش‌ترین مقدار تغییرمکان ایجادشده از هفت میلیمتر تجاوز نکرد.
سپس آزمایش سوم با جایگزین شدن کارکنان پیمانکار با افرادی دیگر مجدداً تکرار شد که نتیجهٔ مشابهی داشت.

نتیجهٔ آزمایش گالری ساخته‌شده بسیار موفقیت‌آمیز بود، و روزنامهٔ ایلاستریتد لندن نیوز اظهار امیدواری کرد که تمام نگرانی‌های کسانی که در خصوص ایمنی ساختمان تا آنجا پیش رفته بودند که برای افراد بازدیدکنندهٔ نمایشگاه در اول ماه می حادثهٔ فاجعه‌باری را پیش‌بینی می‌کردند از بین رفته باشد.

آزمایش موفقیت‌آمیز گالری، سوژه‌ای شد برای کاریکاتور جان تنیل که در پانچ ـ که حالا خود را حامی سربلند کریستال پالاس می‌خواند ـ به چاپ رسید. در این کاریکاتور کرهٔ عظیمی روی گالری قرار داشت که روی آن نوشته شده بود " کره زمین " و پانچ نیز در گوشهٔ بالا پرتو افشانی می‌کرد. کف گالری کوچك‌ترین افتی نداشت و جمعیت خوشحال دست‌ها را به علامت پیروزی بالا برده بودند.

کریستال پالاس نه تنها از نظر جزئیات سازه‌ای بی‌نظیر بود بلکه از

لحاظ نگهداری و تزئینات نیز مثال زدنی بود. تخته‌های کف با فواصل اندکی از یکدیگر نصب شده بودند و در نتیجه گرد و خاك و آشغال‌ها از این شیارها به زیر ریخته می‌شد و محوطهٔ کف همیشه تمیز و پاکیزه می‌ماند. دستگاه‌های جارو کردن گرد و خاك را به داخل شیارهای یك سانتیمتری بین الوارها می‌راند، اگرچه که چندان نیازی به این کار نبود زیرا دامن‌های خانم‌ها عملاً همین کار را انجام می‌داد. پسر بچه‌هایی مأمور شده بودند که دائماً در محوطه بگردند و هرگونه کاغذ پاره‌ای که روی کف افتاده باشد جمع‌آوری کنند تا خطر ایجاد آتش‌سوزی کم‌تر شود.

همهٔ کارهای تزئینی و دکوراسیون ساختمان زیر نظر اوئن جونز[1] انجام شده بود که به دلیل آشنایی زیاد وی با معماری اسلامی به الحمرا جونز معروف بود. جونز در رنگ‌آمیزی قطعات سازه‌ای از ایده‌های خود در مورد رنگ استفاده کرد. نتیجهٔ کار مورد تحسین همهٔ معاصرین وی قرار نگرفت، و امروزه نیز چون رنگ‌های اولیه کاملاً رنگ پریده شده‌اند مشکل می‌توان اظهارنظر کرد، ولی به‌هرحال رنگ‌ها مورد بحث و توجه بسیاری قرار گرفت.

تمام قطعات فلزی قائم در داخل به رنگ آبی کم‌رنگ بود، که احساس فضای باز و آسمان را تداعی می‌کرد. قسمت زیرین شاه‌تیرها رنگ قرمز سیر بود و همین رنگ در دور تا دور قسمت ورودی غرفه‌ها به کار رفته بود. برای زوارها از رنگ زرد استفاده شده بود که در کنار رنگ آبی ستون‌ها جلوهٔ خاصی به آن می‌داد. روی‌هم‌رفته بایستی رنگ‌آمیزی شگفت‌آوری بوده باشد. با به اهتزاز در آوردن پرچم همهٔ کشورها بر سر هزار دیرك در دور تا دور سقف ساختمان، جلوهٔ دیگری

---

۱ - Owen Jones ، (۱۶۵۲-۱۵۷۳م)، آرشیتکت انگلیسی

از ترکیب رنگ‌ها به آن اضافه شد. (این کار به پیشنهاد چارلز باری[1] یکی از مسؤولین نمایشگاه بزرگ انجام شد). این پرچم‌ها تأثیر دلپذیر و مناسبی در تغییر حالت یکنواخت و طویل سقف داشت.

یکی دیگر از نمونه‌های توجه جونز به جزئیات، ساعت الکتریکی به قطر بیست و چهار فوت بود که بر سردر ورودی جنوبی جناح مرکزی نصب شد. اگر جونز شکل سنتی دایره‌ای ارقام ساعت را در روی صفحهٔ ساعت، به‌منظور ترکیب و استفاده از خود طرح محوطهٔ مرکزی در طرح صفحهٔ ساعت، بر هم نزده بود، این ساعت باعث دوگانگی و بدنما شدن جناح مرکزی می‌گردید. ارقام ساعت به شکلی شبه دایره و بر روی قطعات سازه‌ای شعاعی جناح مرکزی قرار داده شده بود. به‌جای عقربهٔ ساعت شماری که صفحهٔ ساعت را در هر دوازده ساعت دور بزند، این ساعت عقربهٔ ساعت شماری داشت که دارای دو بازو همانند ملخ هواپیما بوده و در هر بیست و چهار ساعت یك دور می‌چرخید و یك بازوی آن ساعت را نشان می‌داد. عقربهٔ دقیقه شمار آن نیز به همین شکل طراحی شده بود.

اگر همهٔ کارهای کریستال پالاس مانند ساعت آن خوب از کار در نمی‌آمد، دیگر یادی از آن نمی‌شد. انسان‌ها در بارهٔ یك طرح معیوب معمولاً فقط نواقص و شکست آن را به خاطر می‌آورند و هر آنچه از آن را که ممکن است ابتکار عالی و موفقی بوده باشد از یاد می‌برند، همین‌طور نیز در مورد طرح‌های موفق معمولاً چیزی جز قسمت‌های موفق آن را به خاطر نمی‌آورند. کریستال پالاس بسیار بیش از انتظار همگان موفق از کار در آمد و هوریس گریلی[2] روزنامه‌نگار در بارهٔ

---

1 - Charles Barry

۲ - Horace Greely ، (۱۸۷۲-۱۸۱۱م)، روزنامه‌نگار و سیاستمدار آمریکایی

جوزف پکستون چنین نوشت: " نتیجهٔ کار وی خیلی بهتر از آن بود که می‌توانست فکرش را بکند ". توجه مردم به خود ساختمان نمایشگاه بیش‌تر از توجه آنان به محصولات و تولیداتی بود که به نمایش گذاشته شده بودند.

روز اول ماه می ۱۸۵۱ ملکه ویکتوریا طی مراسم مفصل و باشکوهی در حضور نمایندگان کشورهای خارجی نمایشگاه بزرگ را افتتاح کرد. پیش‌بینی می‌شد که در طی ۱۴۱ روز بیش از شش میلیون نفر از نمایشگاه بازدید کنند (نمایشگاه روزهای یکشنبه تعطیل بود). در شلوغ‌ترین روز نمایشگاه بیش از ۱۰۰۰۰۰ نفر بازدیدکننده داشت که در یك زمان ۹۰۰۰۰ نفر آن‌ها داخل ساختمان بودند. هیچ‌کدام از گالری‌ها دچار لرزش نشدند، و هیچ‌گونه ترس و نگرانی از ایمنی سازه وجود نداشت. ملکه ویکتوریا تا قبل از خاتمهٔ نمایشگاه در ۱۵ اکتبر ۱۸۵۱، حدود پنجاه بار از نمایشگاه دیدن کرد و به‌نظر می‌رسید که وی از گذراندن ساعت‌های مدید برای بازدید غرفه‌ها خسته نمی‌شود. ملکه در روز خاتمهٔ نمایشگاه در دفتر یادبود نمایشگاه چنین نوشت: " دوران درخشان و باشکوه نمایشگاه همانند یك رویا و با موفقیت و افتخار به پایان می‌رسد. "

اگرچه که طبق برنامه‌ریزی قبلی قرار بود پس از اتمام نمایشگاه ساختمان کریستال پالاس برچیده شود و هاید پارك به حالت و شکل اولیهٔ خود در بیاید، لیکن مقامات رسمی به‌طور جدی موضوع باقی ماندن ساختمان را در آن محل مطرح کردند. بعضی‌ها پیشنهاد کردند که از این ساختمان به‌عنوان باغ زمستانی استفاده شود تا مردم بتوانند در روزهای ملال‌آور زمستان‌های لندن در میان گل‌ها و گیاهان آن قدم بزنند. هزینهٔ تغییرات و بازسازی ساختمان برای استفادهٔ دائم در هاید پارك در مقایسه با هزینهٔ برچیدن آن و برپایی مجدد در مکانی دیگر مفصلاً مورد بررسی قرار گرفت. اما سرهنگ سیبتورپ مخالف استقرار

دائمی ساختمان بود. پیشنهادهای گوناگونی در مورد جابه‌جایی ساختمان همچنان ارائه می‌شد.

در میان پیشنهادهای جالب، استفاده از ستون‌ها و شاه‌تیرهای ساختمان برای ساختن یك برج بلند به ارتفاع سیصد متر بود. طبق نظر طراح، این برج بهترین استفادهٔ اقتصادی از زمین را می‌کرد. بالای ساختمان ساعتی به قطر چهل و پنج فوت و اعدادی به ارتفاع ده فوت نصب می‌شد و طرفداران طرح معتقد بودند که نمای شیشه‌ای ساختمان کاملاً در مقابل نیروهای باد مقاومت می‌کرد. چنین ایده‌ای از آسمانخراش‌های مدرن ـ اگر از لحاظ سازه‌ای هم نگوییم ـ از لحاظ زیبایی‌شناسی و معماری یك قرن از زمان خود جلوتر بود و کاملاً با طرح‌های مدرن امروز قابل قیاس است. این طرح بدون تردید باعث ترغیب پیشبرد تکنولوژی آسانسور در اوائل دههٔ ۱۸۵۰ بوده است، و مسلماً جهش جسورانه‌ای در مهندسی سازه حتی بیش از کریستال پالاس بوده است، اگرچه که به موفقیت آن دست نیافت.

علی‌رغم اینکه آسمانخراش‌های واقعی تا قبل از قرن بیستم پا به عرصهٔ زمین نگذاشتند، لیکن طرح کریستال پالاس در موارد مهمی زمینه‌ساز ایجاد آن گردید. مدول‌های ساختمانی سبك و مشابه که به‌طرز ماهرانه‌ای در مقابل بار باد تقویت شده باشند اساس اصلی ساختمان‌های مدرن بلند است. و روش ابتکاریی که در دیوارهای کریستال پالاس به‌کار رفت و دیوارها به‌جای اینکه به‌طور یکپارچه و درگیر با قطعات باربر سازه ساخته شوند توسط اتصالات مجزایی همانند پرده آویزان شده بودند، ایدهٔ اولیه‌ای بود برای دیوارهایی که در نمای بسیاری از ساختمان‌های مدرن به‌کار می‌رود و دیوار پرده‌ای[1] خوانده می‌شود.

---

1 - curtain wall

با توسعهٔ سریع فکر برپایی نمایشگاه‌های بین‌المللی در دنیا، کریستال پالاس الهام‌بخش بسیاری از معماری‌های آن دوره بود. در سال ۱۸۵۳ نمایشگاهی جهانی در نیویورك برپا شد که ساختمان آهنی شیشه‌ای آن به شکل صلیب بوده و گنبدی به ارتفاع ۱۶۸ فوت داشت. در اینجا الیشا اوتیس[1] طرح جدیدی برای آسانسورها ارائه کرد. وی برای نمایش ایمنی این آسانسورها، سوار اتاقك آسانسور شد و تا ارتفاع زیادی بالا رفت و در مقابل نفس‌های حبس‌شدهٔ حضار طناب نگهدارندهٔ آن را قطع کرد. آسانسور ابتدا سقوط کرد ولی به‌کمك دستگاه ساده‌ای که اوتیس ساخته بود و به‌صورت قفل ثقلی عمل می‌کرد آسانسور به‌تدریج متوقف شد. این وسیله، همانند اثر برجسته‌ای که ساختمان کریستال پالاس در مهندسی ساختمان داشت، اثر مهمی در مهندسی مکانیك به‌وجود گذاشت و قدمی اساسی در ایجاد و توسعهٔ آسمانخراش‌های واقعی برداشته شد.

اگرچه کریستال پالاس محکوم به برچیده شدن از هاید پارك شد ولی پکستون برای این ساختمان که شهرت و افتخار جهانی برایش نصیب کرده بود برنامهٔ دیگری داشت. برچیدن ساختمان در تابستان ۱۸۵۲ شروع شد و ستون‌ها و شاه‌تیرها و آبروها و شیشه‌ها به محوطه‌ای پردرخت به مساحت دویست هکتار در سیدنهام هیل[2] در جنوب لندن انتقال یافت. خرید این قطعه زمین در سیدنهام و مصالح ساختمان بیش از نیم‌میلیون پوند برای پکستون هزینه داشت.

ساختمان کریستال پالاس سیدنهام چیزی بیش از بازسازی ساختمان اصلی بود. سقف در تمام طول آن به‌صورت قوسی در آمد، و جناح مرکزی به مقدار بسیار زیادی بزرگ‌تر شده و عرض آن دو برابر شد تا

---

1 - Elisha Otis
2 - Sydenham Hill

در ترکیب جدید سقف جلوهٔ خود را از دست ندهد. بزرگ‌تر شدن این جناح نیز عملاً مستلزم اضافه کردن دو طبقه و دو جناح جنبی برای ایجاد توازن بود. هزینهٔ نهایی طرح با احتساب باغ‌های وسیع و آبنماها یك میلیون و سیصد هزار پوند شد.

قسمتی از این هزینهٔ زیاد صرف ساختن دو برج مرتفع آب شد که برای تأمین آب آبنماهای زیبای محوطه بود که به قصد رقابت با مشابه خود در ورسای[1] ساخته شده بودند. این برج‌ها نه تنها به‌عنوان مخزن آب عمل می‌کردند بلکه برج جنوبی ساختمان مدرسهٔ مهندسی کریستال پالاس را نیز در خود جای داده بود، که یکی از دانشجویان آن در سال‌های آتی جوانی به نام جفری دهاویلند[2] بود. سال‌ها بعد سرجفری سازندهٔ معروف هواپیما در کتاب شرح حال خود از ساختمان سیدنهام به خوشی یاد کرده است، که نه فقط برای دانشجویان مهندسی بلکه برای تمام اهالی لندن تفرجگاه کم‌نظیری بوده است.

جناح شمالی در آتش‌سوزی سال ۱۸۶۶ ویران شد ولی بقیهٔ بنا که یادبودی از جوزف پکستون بود و بنای اصلی کریستال پالاس سال‌های سال در مقابل باد و باران ایستادگی کرد تا اینکه تمام ساختمان در آتش‌سوزی دیگری در سال ۱۹۳۶ ویران شد. دو برج آب استوار باقی مانده بودند تا اینکه در سال ۱۹۴۰ و احتمالاً به دلیل امکان استفادهٔ بمب‌افکن‌های دشمن از آن به‌عنوان نشانه‌ای برای هدف گرفتن لندن تخریب شدند. اکنون در این منطقه یك دکل تلویزیونی مستقر شده است که در کنار آن مجسمهٔ نیم‌تنهٔ سرجوزف پکستون بر روی ستون سنگی ترك‌دار نصب شده است. در بسیاری از نقاط لندن و جهان نمونه‌های

---

۱ - Versailles ، شهری در شمال فرانسه

2 - Geoffrey de Havilland

مشابه معماری کریستال پالاس فراوان یافت می‌شود، ولی هر چقدر هم که بزرگ باشند یارای برابری با عظمت نمونهٔ اصلی را ندارند.

در حالی که کریستال پالاس مقامی استوار ـ اگرچه که قابل بحث ـ در تاریخ مهندسی و معماری دارد، اما شاهکار بودن آن در هر یك از زمینه‌های مهندسی و معماری از همان سال ۱۸۵۰ به‌شدت مورد مشاجره و منازعه بوده است. گرچه پکستون به مدتی بیش از بیست سال طراحی و سرپرستی ساخت پارك‌ها و باغ‌ها و گلخانه‌ها و ساختمان‌های متداول را عهده‌دار بود، به‌علت نداشتن آموزش تخصصی در هیچ کدام از این دو زمینه با طرح‌های وی تا مدت‌ها به‌سردی برخورد می‌شد. انسان‌ها، همانند ساختمان‌هایی که می‌سازند، دارای ناتوانی‌ها و نقایصی هستند. اعضاء معروف انجمن مهندسان راه و ساختمان[1] از اولین کسانی بودند که به مخالفت با ساختمان کریستال پالاس برخاسته و خراب شدن آن را پیش‌بینی کردند، و مدال سلطنتی معماری هرگز نصیب پکستون نشد.

معماران آن دوره عموماً کریستال پالاس را فاقد فورم قوی و یکپارچگی ارگانیك دانستند. به عقیدهٔ آنان استفادهٔ پکستون از مدول‌ها و المان‌های تکرارشونده به‌طور قراردادی بوده و تهی از انگیزش‌ها و قیود هنری است. در واقع برای این انتقادات بعضی مستنداتی نیز وجود داشت، مثلاً طرح اولیهٔ پکستون بر اساس مدول‌های بیست فوتی بود. وی این اندازه را بعداً ، که دانست حداقل عرض مورد نیاز برای غرفه‌های نمایشگاه بیست و چهار فوت است، تغییر داد. و مطابق اشارهٔ چارلز دیکنز[2] در هفته‌نامهٔ خود هاوس‌هولد ووردز[3] ، طول ساختمان صرفاً بر اساس احساسات و تعصب برابر ۱۸۵۱ فوت ـ سال برپایی نمایشگاه ـ تعیین

---

1 - British Institute of Civil Engineers

۲ - Charles Dickens ، (۱۸۷۰-۱۸۱۲م)، داستان‌نویس انگلیسی

3 - *Household Words*

شده است. ولی علی‌رغم تمام اظهارات متخصصین آن زمان، کریستال پالاس ـ پکستون قلوب لندن و جهان را در نیمهٔ قرن نوزدهم به‌طوری تسخیر کرد که تا آن زمان کم‌تر ساختمان یا سازه‌ای توانسته بود چنین توجه مردم را به‌خود جلب کند.

پکستون تحصیلات و اطلاعات عمیقی در مورد کارهای مهندسی و معماری نداشت، و به همین دلیل وی در رویارویی با مسائل طراحی هیچ تمایل جهت‌داده‌شده‌ای به‌طرف این سازهٔ خاص یا آن فورم زیبایی شناختی خاص نداشت. وی مسائل طراحی جا دادن نیلوفرهای آبی غول‌پیکر و یك نمایشگاه بزرگ را با ساختمان‌هایی مشابه هم و با استفاده از سنت‌های معماری و روش‌های متداول ساختمانی حل کرد. مختصر اینکه، پکستون با سادگی و عدم تبحر تخصصی خود، در مسیرهای جدید و درخشانی گام نهاد که الگوی مهندسان و معماران در قرن بعد بود. کریستال پالاس اولین ساختمان بزرگ و واقعاً غول‌آسایی بود که از فلز و شیشه ساخته می‌شد، اولین ساختمان بزرگی بود که از دیوارهای خارجی غیرباربر استفاده می‌کرد، و اولین ساختمانی بود که با استفاده از قطعات استاندارد پیش ساخته، که به‌طور ساخته‌شده و آمادهٔ نصب به محل ساختمان حمل می‌شد، ساخته شد. چنین روش‌هایی هم اکنون در بسیاری از پروژه‌های بزرگ ساختمانی متداول و مرسوم است. یکی از ابداعات کریستال پالاس استفادهٔ وسیع از فضای بسیار بزرگ ساختمانی بود. تکرار قطعات سازه‌ای ـ که با طرح رنگ‌آمیزی اوئن جونز بر اساس " زوار زرد و ستون آبی و تیر قرمز " بیش‌تر خودنمایی می‌کرد ـ بدون تردید طلایه‌دار بسیاری از کارهای معماری مدرن بود. این ساختمان نمونهٔ موفقی از نظر مدیریت عملیات ساختمانی نیز به شمار می‌آید. گرچه این ساختمان در زمانی ساخته شد که دوران ابتدایی‌تری به‌نظر می‌رسد، اما کریستال پالاس نیز درگیر بسیاری از مسائل و مشکلاتی بود که می‌تواند

هر پروژهٔ ساختمانی مدرن را با تأخیر روبرو سازد و آن را سال‌ها از برنامهٔ زمانی خود عقب بیاندازد. این پروژه مستلزم برنامه‌ریزی دقیق و کارهای مالی و مدیریتی و پرسنلی وسیعی بود. مقدار مصالحی که بایستی سفارش می‌شد و ساخته می‌شد و تحویل گرفته می‌شد و روی آن‌ها کار می‌شد و سپس نصب می‌شد، حتی در مقیاس‌های امروز نیز بسیار زیاد و حجیم بود. مشکلات و موانع سیاسی و اجتماعی نیز وجود داشت، گرچه در سال ۱۸۵۰ قوانین و فشارهای زیست محیطی وجود نداشت، لیکن باز هم پکستون ناچار بود خود را با بسیاری از مخالفت‌ها و اعتراضاتی تطبیق دهد که هر طرفدار محیط زیستی امروزه می‌تواند مطرح کند.

با هر چه بیش‌تر جدا شدن نقش معماران و مهندسان در نیمهٔ دوم قرن نوزدهم، ساختمان کریستال پالاس به عنوان الگویی از آنچه که می‌توان انجام داد، گرچه تا اواسط قرن بیستم دیگر تکرار نشد، در نظر گرفته می‌شد. البته هنوز هم سالن‌ها و گلخانه‌هایی به روش پکستون ساخته می‌شد، ولی برای دیگر ساختمان‌ها استفاده از آجر و سنگ و آهن ترجیح داده می‌شد.

شاید یادبود یکصدسالگی کریستال پالاس در تجدید حیات سبك معماری آن سهیم بوده باشد. در سال ۱۹۵۱ با برپایی نمایشگاه‌های متعدد و انتشار کتاب‌هایی در مورد کریستال پالاس، از جوزف پکستون و ساختمان وی قدردانی شایسته‌ای به عمل آمد. ساختمان لیور هاوس[1] و ساختمان سیگرام[2] که در دههٔ ۱۹۵۰ در نیویورك و با استفاده از دیوار پرده‌ای غیرسازه‌ای برپا شدند عملاً به ایدهٔ ساختمان جعبه‌ای بلند شیشه‌ای،

---

1 - Lever House
2 - Seagram Building

که بعدها همه‌گیر شد، تجسم عینی دادند. مایز وان در روهه[1] طراح ساختمان سیگرام، که وی نیز همانند پکستون دارای تحصیلات رسمی معماری نبود، در سال ۱۹۲۱ به‌درستی پیش‌بینی کرده بود که بزودی ساختمان‌های مشابه بسیاری ساخته خواهد شد. و ساختمان‌های آپارتمانی وی در شیکاگو، با فورم نمای خارجی قوی که با استفادهٔ مصرانه از تیرها و ستون‌های فلزی که صرفاً جنبه تزئینی داشتند طراحی شده بود، باعث توجه مجدد به ریشه‌های تکنولوژیکی معماری ـ به کار رفته در کریستال پالاس شد. مثال بارزی برای این فکر را می‌توان در المان‌های مکانیکی و سازه‌ای نمایان ساختمان شیشه‌ای مرکز فرهنگی هنری ژرژ پمپیدو در پاریس مشاهده کرد.

نفوذ مؤثر کریستال پالاس در معماری امروزه نیز کاملاً محسوس است، استفادهٔ معماران از سالن‌های میانی وسیع و فضاهای عمومی باز در طرح‌های مراکز تجاری و دیگر ساختمان‌های شهری نمونه‌ای از این تأثیرگذاری است. ساختمان آی بی ام[2] در نیویورک گلخانه‌ای به ارتفاع چهار طبقه دارد، و درخت‌های بامبوی آن در زمستان نیز در زیر سقف دندانه‌ای کاملاً سبز هستند، و این طرح به‌طور گریزناپذیری طرح ابداعی سقف پکستون را تداعی می‌کند. آثار کریستال پالاس در استفاده از یك سالن میانی وسیع امروزه حداقل در دو پروژهٔ ساختمانی بزرگ آمریکا قابل مشاهده است، ساختمان اینفومارت[3] در دالاس عظیم‌ترین مرکز جهانی فروش محصولات کامپیوتری است، و مارتین گرووالد[4] معمار ساختمان تا آنجا که می‌شده است نمای آن را مشابه کریستال

---

1 - Ludwig Mies van der Rohe
2 - IBM Building
3 - Infomart
4 - Martin Growald

پالاس در آورده است. وی حتی سعی کرد که از ترکیب رنگ‌آمیزی ساختمان نمایشگاه بزرگ لندن نیز استفاده کند، ولی رنگ‌های محوشدهٔ این سازهٔ قرن نوزدهم و مشکل ـ پیدا کردن نمونهٔ دست‌نخوردهٔ آن باعث عدم کامیابی در این کار شد.

کریستال پالاس ـ ساختهٔ گرووالد در کنار بزرگراه استمونز[1] و در میان ساختمان‌هایی غالباً جعبه‌ای شکل و تیره‌رنگ در مجتمع تجاری بزرگی که مرکز تجاری دالاس خوانده می‌شود بنا شده است. ایدهٔ اولیه برای ساختمان فروشگاه کامپیوتر، سازه‌ای متداول به شکل مستطیل با دیوارهای شیشه‌ای و گرانیت و سقف قوسی شیشه‌ای بود. وقتی از گرووالد برای طراحی ساختمان دعوت شد وی برای ساختمان فروشگاه کامپیوتر طرحی داد که به‌صورت قطری نسبت به دیگر ساختمان‌های مجتمع قرار داشت. طرح این معمار برای ساختمان اینفومارت طرحی مناسب برای مرکزی برای نمایشگاه کامپیوتر و همچنین فروش کامپیوتر بود. ساختن این کریستال پالاس مدرن مستلزم صرف هزینه‌هایی بسیار بیش‌تر از هزینهٔ مورد نیاز برای ساختن مراکز فروش عادی بود و بررسی‌های مقایسه‌ای اقتصادی و بحث‌های مربوط به آن باعث تأخیر در اجرای پروژه گردید. بالاخره در ماه می سال ۱۹۸۳ فاز اول طرح، شامل شش طبقه از پانزده طبقهٔ نهایی، با هزینه‌ای معادل ۸۵ میلیون دلار به تصویب رسید و کلنگ آن به زمین زده شد. عملیات اجرایی ساختمان در ژانویه ۱۹۸۵ به اتمام رسید. گرچه این مدت طولانی‌تر از زمان ساختن کریستال پالاس ـ پکستون بود ولی روی‌هم‌رفته اینفومارت طبق استانداردهای مدرن پروژهٔ ساختمانی نسبتاً بی‌دردسر به‌شمار می‌آید.

---

1 - Stemmons Freeway

کریستال پالاس ـ سال ۱۸۵۱ الهام‌بخش مرکز گردهمایی نیویورک[1] نیز بوده است، لیکن ساختن آن با مشکلات و تأخیرات بسیاری روبرو گردید که ساختمان‌های پکستون و گرووالد دچار آن نشده بودند. در سال ۱۹۸۰ کلنگ ساختمان به زمین زده شد و قرار بود کارهای اجرایی آن بر اساس روش طراحی و ساخت فشرده انجام شده و در سال ۱۹۸۳ برای افتتاح آماده شود. زیربنای شانزده جریبی این ساختمان به مقدار همان زیربنای ساختمانی است که در ۱۸۵۱ در هاید پارك بنا شد ولی طرح آن کلاً متفاوت بوده و طرحی قرن بیستمی بود. ساختمان کریستال پالاس ـ نیویورك به‌جای شاه‌تیرها و ستون‌های پیچ‌شده دارای بزرگ‌ترین قاب فضایی بود. در سقف این سازهٔ طویل دو درز انبساط در نظر گرفته شده بود که به اعتقاد مهندسان بیش‌تر شبیه پل عمل می‌کرد تا مثل ساختمان، و در طراحی آن برای مقابله با نیروهای جابرکن[2] باد از تجربیات کسب‌شدهٔ قبلی در مورد وزش باد از میان پل استفاده شده بود. قاب فضایی ساختمان از میله‌هایی فولادی تشکیل می‌شد که با زوایای مختلف توسط توپی‌های سوراخدار به یکدیگر متصل می‌شدند.

بودجهٔ پروژه که در اواخر ۱۹۷۹ مطرح گردید ۳۷۵ میلیون دلار برآورد شده بود. در اوایل ۱۹۸۳ گزارش‌هایی رسید که در بسیاری از توپی‌های ساخته‌شده، که بایستی به تعداد هجده هزار عدد در گره‌های قاب فضایی به‌کار می‌رفت، معایبی وجود دارد. آزمایشاتی که با اشعه ایکس بر روی گره‌های ساخته‌شده انجام گردید نشان داد که در تعداد زیادی از این توپی‌های ریختگی‌شده تخلخل و ترك‌های مویی وجود دارد که عملاً باعث تضعیف قطعات شده و قدرت باربری به میزان طراحی‌شده

---

1 - New York Convention Center
2 - uplift force

را نخواهند داشت. گزارش‌های اولیه حاکی از آن بود که این مشکل غیرمنتظره حدود پنج میلیون دلار به هزینه‌ها خواهد افزود، و پیشنهاد شده بود که به‌منظور جلوگیری از به‌هم خوردن برنامهٔ کار و تأخیر در عملیات اجرایی، از توپی‌های معیوب بزرگ‌تر برای موارد مصرف توپی‌های کوچك‌تر استفاده شود. بدین ترتیب ناچار نمی‌شدند که همهٔ دوازده هزار توپی را که قبلاً ساخته شده بودند و حدود شصت درصد آن‌ها معیوب بودند دور بریزند. این پیشنهاد نهایتاً مورد قبول واقع نشد و سفارش ساخت جدید همهٔ توپی‌ها داده شد، که هزینهٔ آن بیش از یك میلیون دلار بوده و باعث تأخیری بیش‌تر از یك سال در کار پروژه شد. در طی این مدت ستون‌های غول‌پیکر و مرتفع ساختمان در محوطهٔ این کارگاه نیمه‌تعطیل همانند درختان بی‌شاخ و بر یك باغ خشك به‌نظر می‌آمدند.

با هرچه نزدیك‌تر شدن موعد برنامه‌ریزی‌شدهٔ اتمام این ساختمان عظیم در مانهاتان، گفتگو در مورد آن بیش‌تر بالا می‌گرفت. قبل از اینکه مشکلات ساختمانی این پروژه به روزنامه‌ها و مجلات کشانده شود، بیش از پنجاه قرارداد برگزاری گردهمایی فقط برای نیمهٔ دوم ۱۹۸۴ منعقد شده بود. عواقب تأخیر در پروژه بسیار فاجعه‌بار بود، زیرا علاوه بر از دست دادن درآمد و مواجه شدن با ادعای خسارت طرف‌های قرارداد، انعقاد قراردادهای جدید نیز متوقف می‌شد. و بالاخره چه کسی با اطمینان می‌توانست بگوید که کار این ساختمان کی به اتمام خواهد رسید؟ فرماندار نیویورك خواستار گزارشی در مورد پروژه و تأخیرات آن شد، و وقتی گزارش پس از سه ماه به دست وی رسید، زمان اتمام کار تابستان ۱۹۸۶ تعیین شده بود. هزینهٔ پروژه بالغ بر ۵۰۰ میلیون دلار تخمین زده شده بود، و این بدون احتساب صدها میلیون دلار خسارات وارده به شهر نیویورك از بابت عدم امکان برگزاری مراسم و گردهمایی‌ها در سال

۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ بود.

علت بسیاری از تأخیرات کارهای ساختمانی مرکز گردهمایی نیویورك را به روش طراحی و ساخت فشرده نسبت می‌دادند. طی این روش ساختمانی، قسمت‌هایی از عملیات اجرایی ساختمانی در مراحلی قبل از اتمام کامل کارهای طراحی انجام می‌شود، و به عقیدهٔ مخالفان این روش، بدین ترتیب عملاً امکان تغییرات در طرح بسیار محدودتر می‌شود و هزینهٔ نهایی ساختمان را نیز نمی‌توان در ابتدا تعیین کرد. متقابلاً طرفداران این روش می‌گویند که با هم‌زمانی بعضی از مراحل طراحی و عملیات اجرایی کم‌تر دچار تورم قیمت‌ها خواهیم شد و پروژه نیز زودتر از حالتی به اتمام خواهد رسید که بخواهیم قبل از شروع کار ساختمانی منتظر اتمام کامل کلیه جزئیات طراحی بشویم. روش طراحی و ساخت فشرده که برای عملیات ساختمانی یك مرکز گردهمایی در واشینگتن و همچنین در ساخت یك مرکز تجاری بزرگ در سان‌فرانسیسکو به‌کار گرفته شده بود نتایج بسیار خوبی نشان داده بود. مشکلاتی که این پروژه در نیویورك با آن مواجه شد شاید فی‌نفسه به علت انتخاب روش طراحی و ساخت فشرده نبوده است، بلکه ناشی از مشکلات خاص آن پروژه از لحاظ مدیریت چنین کار ساختمانی عظیم و فقدان کنترل کیفی مناسب در اجرای کارها بوده است.

مشکل تولید قطعات سازه‌ای ایمن از طریق ریختگی بر سازندگان کریستال پالاس اصلی پوشیده نبوده است، و به همین دلیل آن‌ها همهٔ شاه‌تیرهای ریختگی را قبل از به‌کار بردن مورد آزمایش قرار می‌دادند. همچنین آن‌ها می‌دانستند که آهن ورزیده قابلیت اطمینان بیش‌تری دارد و به همین دلیل نیز فقط تعداد اندکی از این نوع شاه‌تیرها را مورد آزمایش قرار می‌دادند و نتایج حاصل را قابل تعمیم می‌دانستند. توپی‌های ریختگی مرکز گردهمایی نیویورك به‌طور نمونه‌ای مورد آزمایش قرار

گرفته بودند و نمونه‌گیری آماری این اطمینان را می‌داده است که آزمایش تعدادی از قطعات ـ و نه همهٔ آن‌ها ـ کافی می‌باشد. اما گرچه که روش‌های نمونه‌گیری نسبت به قرن نوزدهم پیشرفت کرده است، ولی همان مشکلات ذاتی قطعات ریختگی هنوز هم وجود دارند که در پروژهٔ نیویورك خود را نشان داد.

شاید بتوان گفت که در کارهای ساختمانی وجود مشکلات و شکست امری معمول است، اما نمونهٔ تاریخی کریستال پالاس اصلی (و همچنین ساختن ساختمان امپایر استیت[1] در چهارده ماه که نمونهٔ مثبت دیگری است) نشان می‌دهد که این مشکلات اجتناب‌ناپذیر نیستند. و وقتی هم که مشکلات بروز می‌کنند، همگی پس از اتمام سازه به فراموشی سپرده می‌شوند. ابتکار و نوآوری، چه در طراحی سازه یا در روش‌های ساختمانی، صرفاً عامل تهدیدکننده‌ای در موفقیت کار نیست، بلکه می‌تواند باعث شود که طراحان و سازندگان در پیش‌بینی و حل مشکلات کوشش و دقت بیش‌تری به‌کار ببرند. با آگاهی از چنین نمونه‌هایی به عنوان پلی اطلاعاتی بین فواصل و نه به عنوان دفاتر بایگانی شده‌ای از اطلاعات، توجه مهندسان به جزئیاتی که باعث شده کریستال پالاس به‌صورت سمبل موفقیت شناخته شود جلب خواهد شد.

---

1 - Empire State Building

۱۳

فراز و نشیب پل‌ها

اولین کتاب چیستان در انگلیس به سال ۱۵۱۱ منتشر شد که یکی از سؤال‌های آن عبارت بود از " آن چیست که هر چقدر نحیف‌تر باشد مهیب‌تر است؟ " و جواب آن " پل " بود. در آن زمان نیز مانند دوران حاضر، سازندگان پل همواره در جستجوی راه‌هایی بودند که بتوانند به دلایل اقتصادی و زیبایی شناختی پل‌ها را هرچه ممکن سبک‌تر بسازند، و در همان حال نیز دهانه‌های پل‌ها روزبه‌روز بزرگ‌تر می‌شد. و به‌خاطر کشمکش‌های موجود میان سبک‌تر یا سنگین‌تر بودن از دیدگاه‌های روانشناسی و سازه‌ای، تاریخچهٔ پل‌ها مملو از نمونه‌های فراوان از شکست‌های سهمگین و موفقیت‌های تماشایی بوده، و چیستان‌ها و درس‌ها و شگفتی‌های فنی بسیاری به‌خود دیده است.

بیش از یکصد سال است که پل ایدز[1] با سه قوس فولاد کرومی بر روی رودخانهٔ میسی‌سی‌پی[2] در سن‌لوئیز و پل بروکلین به‌صورت معلق با

---

1 - Eads Bridge
2 - Mississippi

چهار کابل فولادی بر روی رودخانهٔ ایست ریور[۱] در نیویورك استوار شده‌اند. این دو پل نمونه‌های بارزی از اولین استفاده‌ها از تکنولوژی صندوقهٔ پنوماتیکی و فولاد در طرح‌های سازه‌ای جسورانهٔ آن زمان می‌باشد، و هر دوی آن‌ها مثال‌های موفقی در زمینه‌های متفاوت خود به‌شمار می‌روند. هر دو طرح دارای جهش‌ها و نوآوری‌های مهندسی متعددی بوده‌اند و بدین ترتیب بالقوه امکان بسیاری برای وجود اشتباهات در آن‌ها بوده است. با این وجود، این پل‌ها و کریستال پالاس و برج ایفل[۲] و دیگر سازه‌های منحصر به‌فرد قرن نوزدهم همگی مواردی ارزشمند از پروژه‌های با عظمت و جسورانهٔ مهندسی هستند که عملاً توانسته‌اند بر هر آنچه که ممکن بوده است اشتباه باشد فائق آیند و بدین ترتیب علیه قانون مورفی برخاسته‌اند.

هر دو پروژه با مشکلات خاص خود روبرو بودند که از مهم‌ترین آن‌ها استفاده از مصالح جدید در قطعات سازه‌ای مهم بود. جیمز ایدز[۳] وقتی نتوانست فولاد کربنی مناسب برای قطعات پل به‌دست آورد از فولاد کرومی استفاده کرد که مورد ظن بسیاری از متالورژیست‌های آن زمان بود. و واشینگتن پسر جان روبلینگ[۴] ، که پس از مرگ ناگهانی پدرش سرپرستی کارهای ساختمانی پل بروکلین را به‌عهده گرفته بود، پس از مدتی که مقدار زیادی سیم فولادی برای بافتن کابل‌های پل مورد استفاده قرار گرفته بود متوجه شد که تأمین کنندهٔ سیم‌ها از مصالح نامرغوب‌تری استفاده می‌کند. روبلینگ به‌جای اینکه کارهای انجام‌شدهٔ قبلی و مصالح

---

۱ - East River ، رودی در جنوب شرقی نیویورک

2 - Eiffel Tower

۳- James Eads ، (۱۸۸۷-۱۸۲۰م)، مهندس و مخترع آمریکایی

٤- John Roebling ، (۱۸۶۹-۱۸۰۶م)، مهندس ساختمان آمریکایی (متولد آلمان)

مذکور را کنار بگذارد تصمیم گرفت که مقدار سیم‌های کابل‌ها را اضافه کند تا بدین ترتیب ضعف مفتول‌ها را جبران کرده باشد. آن سیم‌های نامرغوب هنوز امروز هم در کابل‌های پل هستند و شاهدی هستند بر استفادهٔ صحیح از ضریب اطمینان و کارهای اصلاحی که می‌توان در طراحی و ساخت انجام داد و اینکه وجود عیب فی‌نفسه لزوماً به شکستگی منجر نمی‌شود.

آنان که در مورد موفقیت سازه‌ای طرح‌های ایدز و روبلینگ تردید داشتند پس از اتمام ساختن پل‌ها شاهد نتیجهٔ کار بودند. ساختن پل ایدز در ماه می ۱۸۷۴ به پایان رسید و تا اواسط ماه ژوئن قطارهای متعددی که به‌تدریج وزن آن‌ها هم افزایش داده می‌شد از روی پل عبور داده شدند. ظاهراً آخرین آزمایش، عبور یك فیل بدون هیچ دودلی از روی پل بوده است، زیرا به اعتقاد عامه این حیوان به‌طور غریزی از قدم گذاشتن بر روی پلی که سلامت آن مشکوك باشد اجتناب می‌کند. در چهارم جولای ۱۸۷۴ طی مراسم شکوهمندی اتمام موفقیت‌آمیز پل بین ایلینویز جنوبی و سن‌لوئیز جشن گرفته شد و ایدز در سخنرانی خود با اشاره به تردیدهایی در مورد ایمنی پل و مردود شمردن آن‌ها خاطرنشان کرد که: " دیروز دوستان با خیال اینکه مرا از نگرانی رها سازند خشنودی و رضایت خود را از نتایج آزمایش پل ابراز کردند، ولی این صحبت آن‌ها هیچ تأثیری نداشت چون من اصلاً از این بابت نگران نبودم. " اما حتی اگر ایدز اطمینان داشته که سازهٔ فولادی و سنگی وی عمری به درازی عمر اهرام مصر خواهد داشت، قاعدتاً بایستی به دلیل ناکامی اقتصادی پل دچار یأس شده باشد. پل ایدز نه تنها نتوانست درآمد پیش‌بینی‌شده از محل اخذ عوارض را به‌دست آورد، بلکه هرگز نتوانست جای راه‌های تجاری غرب از شیکاگو را که از میان سن لوئیز می‌گذشت ــ و به دروازهٔ غرب مشهور بود ــ بگیرد.

پل بروکلین، که هشتمین عجایب دنیا نیز خوانده می‌شد، در ماه می ۱۸۸۳ طی مراسم باشکوه رژه و آتش‌بازی افتتاح شد. از نظر اقتصادی درآمد پل مطابق انتظار بود. ولی از بدشانسی، ایمنی پل بروکلین از طریق عبور دادن فیل مورد آزمایش قرار نگرفته بود، و یك هفته پس از افتتاح شکوهمند پل، بر اثر ازدحامی در پی بروز شایعه‌ای در مورد فاجعهٔ سقوط قریب‌الوقوع پل، دوازده نفر در زیر پاهای جمعیت هراسان بیست هزار نفری کشته شدند. روزنامه‌ها به‌خاطر ایجاد تردید در بارهٔ ایمنی پل در اذهان مردم مورد سرزنش قرار گرفتند. پل بروکلین تا امروز به عنوان سمبل پایداری در این دنیای ناپایدار استوار مانده است (اگرچه که در سال ۱۹۸۱ یکی از کابل‌های قطری آن پاره شد و باعث مرگ یك عابر پیاده گردید که مشغول تماشای منظرهٔ زیبای پل و رودخانه بود).

تاریخچهٔ پل‌های معلق که به‌خوبی بیانگر رابطهٔ ظریفی است که بین موفقیت و شکست سازه‌ای وجود دارد، بیش از هر نوع سازهٔ دیگر با افسانه و روایت آکنده بوده و مسائل فراموش‌شدهٔ بسیاری دارد. گفته می‌شود که یکی از اولین پل‌های معلق بر روی رودخانهٔ ماین[1] در آنژه[2] فرانسه زده شده که در سال ۱۸۵۰ زیر رژهٔ قدم‌های پانصد سرباز فرو ریخته و باعث مرگ حدود نیمی از آن‌ها شده است. عادت سربازان به قطع رژه و قدم آهسته رفتن در روی پل‌ها به این حادثه ارتباط داده می‌شود، و انجام آزمایش گالری‌های کریستال پالاس در حالت بالا و پایین پریدن کارکنان تا حدی ناشی از شکست‌های نسبتاً قابل توجه پل‌های معلق قرن نوزدهم در اثر عبور جمعی سربازان و گله‌ها و حتی ازدحام جمعیتی که مسابقهٔ قایقرانی تماشا می‌کنند بود. چنین حوادثی

---

۱ - Maine River ، رودی در شمال غربی فرانسه

۲ - Angers ، شهری در غرب فرانسه

احتمالاً در ذهن افرادی نیز بوده است که در بارهٔ حادثه هتل هایت ریجنسی این فرضیه را مطرح کردند که رقص ریتم‌دار مهمانان در روی راهروهای آویزان و معیوب هتل باعث افزایش نوسان آن و در نهایت باعث سقوط آن شده است. با توجه به اینکه راهروهای آویزان هتل بسیار سخت‌تر از یك پل معلق طویل هستند، خراب شدن پل بر اثر رقص نوسانی آنچنان‌چه در ابتدا به‌نظر می‌رسد چندان دور از ذهن نیست. لیکن احتمالاً کارکنان و مهمانان هتل نوسان راهروها را بدتر و نگران کننده‌تر از نوسان گالری‌های بتنی و بالکن‌های دیگر هتل‌ها و مراکز خرید نمی‌دانسته‌اند.

واشینگتن روبلینگ از خطرات احتمالی راهروهای ارتباطی آویزان باخبر بود و به همین دلیل در محل مناسبی در ابتدای راهروهای معلق، موقتی که برای دسترسی به پایه‌های پل بروکلین در حین ساخت نصب شده بود تابلوی هشداردهنده‌ای قرار داده بود. این تابلو به‌طور واضحی خطر پدیدهٔ تشدید سازه‌ای را گوشزد می‌کرد:

ظرفیت ایمن حداکثر برای ۲۵ نفر
نزدیك یکدیگر راه نروید، دویدن و پریدن ممنوع است!
آهسته قدم بردارید!

و. روبلینگ
سرمهندس کارگاه

موارد اشاره‌شده هشدار علنی نسبت به شرایطی است که به عقیدهٔ طراح سازه می‌تواند به شکست منجر گردد. در اینجا نیز همانند اغلب کارگاه‌های ساختمانی به‌جای آنکه سازه‌های موقت را کاملاً مستحکم

بسازند نحوهٔ استفاده از آن را محدودتر کرده بودند. راهروهای ارتباطی این پروژه هیچ حادثهٔ ناگواری نداشتند، و با اتمام ساخت پل بروکلین زمینهٔ مناسب و جدیدی برای پل‌های معلق به‌وجود آمد. عرشهٔ این پل کاملاً در مقابل نوساناتی که بعدها موجب فرو ریختن پل تاکوما گردید مقاوم بود.

جان روبلینگ در دورانی زندگی می‌کرد که پل‌های معلق یکی پس از دیگری فرو می‌ریختند، و موفقیت‌های عالی وی- مانند پل دو عرشه‌ای نیاگارا[۱] و پل سین‌سیناتی[۲] بر روی رود اوهایو و پل بروکلین- همگی استقامت و پایداری دهانه‌های بسیار طویل خود را در برابر بارهای باد و ترافیك مدیون درك صحیح وی از علت خراب شدن بسیاری از پل‌های معلق معاصرین وی بودند که آن را ناشی از عدم تقویت مناسب عرشهٔ پل در مقابل بارها می‌دانست. با این وجود موفقیت‌های طرح‌های روبلینگ بیش از آنکه به‌صورت درس‌های آموزنده‌ای باشند به عنوان سمبل و مشوقی برای مهندسان پل‌های آینده بود که در تکاپوی پوشاندن رودخانه‌های عریض‌تر با سازه‌هایی اقتصادی‌تر بودند.

روبلینگ اقدام به زدن پلی بر روی درهٔ رود نیاگارا بر اساس طرحی کرد که در آن زمان جسورانه تلقی می‌شد، تعدادی از معاصرین وی حتی متعقد بودند که این کار عملی نیست. رابرت استونسن[۳] مهندس عالی‌مقام انگلیسی که پل بریتانیا را از قوطی‌های فولادی عظیمی برای عبور قطار ساخته بود و باور نمی‌کرد که پل معلق بتواند قطار را از خود

۱- Niagara ، شهری در غرب نیویورک

۲- Cincinnati ، شهری در جنوب غربی اوهایو

۳- Robert Stephenson ، (۱۸۵۹-۱۸۰۳م)، مهندس انگلیسی ، فرزند جورج استونسن ابداع کننده راه‌آهن

عبور دهد، در بارهٔ پیشنهاد روبلینگ برای ساختن پل معلق بر روی رود نیاگارا برای عبور قطار به وی چنین نوشت: " اگر پل شما موفق گردد، معلوم خواهد شد که پل من اشتباه بزرگی بوده است. " پل نیاگارا موفق از کار درآمد، همچنان‌که " اشتباه بزرگ " استونسن نیز موفق بود. طرح وی به مدت بیش از یکصد سال مسیر عبور قطار از روی منای استریتز بود، تا اینکه در سال ۱۹۷۰ بر اثر آتش‌سوزی بزرگی ویران شد و بعداً یك پل قوسی به‌جای آن ساخته شد.

رابرت استونسن به دلیل اصرار و ستیزی که بر سر طرح خود داشت که از نظر سازه‌ای هیچ پل کارآمدتر دیگری نمی‌توان ساخت که بتواند قطارهای سنگین را تحمل کند، قاعدتاً بایستی پل قوطی خود را در مقام طرحی مقتدر شکست‌خورده بداند (اگرچه که سازهٔ موفقی بوده است). ویلیام فربرن[1] از معاصرین وی شدیداً موفقیت پل قوطی فولادی استونسن را، که حتی به حمایت کابل‌هایی که به پایه‌ها متصل باشند نیازی نداشت، مورد ملامت قرار داد زیرا پل‌های ضعیف متعددی بعد از سال ۱۸۵۰ و احتمالاً بر اثر اطمینان بیش از حد در پی موفقیت پل بریتانیا ساخته شده بودند. در همان زمان، پیروزی روبلینگ در ساخت پل نیاگارا مهر باطلی بود بر ادعای استونسن در بارهٔ پل‌های معلق، و الگویی شد برای طراحان پل‌های آینده که برای پیشرفت و برتری یافتن تلاش کنند. روبلینگ در ساختن پل‌های سین‌سیناتی و بروکلین از بسیاری از ابداعات شخصی خود در پل نیاگارا ـ از قبیل عرشهٔ عمیق و تقویت‌شده و کابل‌های قطری برای مقابله با نیروهای باد ـ سود جست، اما دیگر طراحان پل‌های معلق روزبه‌روز عرشه‌ها را طویل‌تر و کم‌عمق‌تر می‌کردند و بدین ترتیب پل نه تنها در مقابل بار ترافیك بلکه در مقابل

---

1 - William Fairbairn

باد نیز انعطاف‌پذیرتر می‌شد، و به‌تدریج نیز کابل‌های قطری را که عملاً نشان خاص پل‌های روبلینگ بود از طرح‌های خود حذف کردند. بنابراین پل‌های معلق ثلث اول قرن بیستم عموماً طرح‌هایی طویل‌تر و جمع و جورتر بودند که از آن میان می‌توان از پل جورج واشینگتن و پل برانکس - وایتستون[1] و پل تاکوما نام برد. که البته لاغری این آخری ماورای محدودهٔ منطقی تجربیات قبلی بود.

در طراحی مهندسی این پارادوکس وجود دارد که موارد موفق سازه‌ای باعث افول و منتهی به شکست‌ها می‌گردد، در حالی که شکست‌های بزرگ در نوآوری و برآمدن سازه‌های موفق نقش بسزایی دارد. اما اگر به هدف اصلی کار طراحی یعنی جلوگیری و اجتناب از شکست توجه کنیم، آن‌گاه معمای این پارادوکس حل خواهد شد. سازه‌ای که دچار شکست می‌شود نمونهٔ نقیض فرضیهٔ اولیهٔ کارآمد بودن آن است و آشکارا به ما نشان می‌دهد که چه کارهایی نبایستی انجام گیرد، ولی سازه‌ای که بدون حادثه‌ای استوار باقی می‌ماند معمولاً نقایص احتمالی موجود در آن را پنهان می‌دارد و مهندسان را از درس‌های آموزنده‌ای برای استفاده در کارهای بعدی محروم می‌سازد. هیچ جایی مثل تاریخچهٔ پل‌های معلق آکنده از اثرات متقابل رفت و برگشت بین موفقیت و شکست نبوده است، گرچه که ساختمان‌های جسورانه‌ای که سقف آن‌ها بی‌شباهت به پل‌ها عمل نمی‌کنند نیز می‌توانند حاوی درس‌های مهم و ارزشمندی برای آینده باشند. اتمار امان که پل جورج واشینگتن و چندین پل دیگر را طراحی کرده است می‌نویسد:

"... شکست پل تاکوما اطلاعات گران‌بهایی را در اختیار ما قرار

---

1 - Bronx-Whitestone Bridge

داده است. . . . این طرح ثابت کرد که هر سازهٔ جدیدی که به زمینه‌ها و حوزه‌های جدیدی قدم بگذارد با مشکلات جدیدی روبرو خواهد شد که برای حل آن‌ها نه تئوری‌ها و نه تجربه‌های عملی نمی‌توانند راهنمایی دقیقی در اختیار بگذارند. به همین سبب ما ناچار هستیم که تا حد زیادی به قضاوت‌های خود متکی شویم، و اگـر در نتیجهٔ آن اشتباهات یا شکست‌هایی به‌وجود آیـد، بایستی آن‌ها را به‌عنوان بهای پیشرفت انسان بپذیریم. "

پل تاکوما یکی از استثنایی‌ترین شکست‌ها در تاریخ مهندسی است. این پل معلق که شبه جزیرهٔ المپیك[1] را به ایالت واشینگتن متصل می‌ساخت پلی بسیار باریك با دو خط عبور و طول دهانهٔ نیم مایل بود. طرح پل طرحی غیرمتداول بود که عمق سازهٔ عرشه آن به دلیل استفاده از شاه‌تیر ِ تقویت‌شده بسیار کم‌تر از طرح‌هایی بود که در عرشه از خرپاهای عمیق استفاده می‌کنند. این نوآوری شکل لاغری به پل داده بود که ظاهر آن را بسیار قشنگ و تماشایی کرده بود، ولی درعین‌حال عرشهٔ باریك و کم عمق آن در مقابل باد خیلی انعطاف‌پذیر شده بود.

کف عرشهٔ پل تاکوما در هنگام ساخت دارای نوسانات شدیدی بود و این حرکات غیرعادی تا ماه‌ها پس از گشایش پل در ۱۹۴۰ نیز ادامه داشت. این پل که به اسب چهارنعل معروف شده بود علاقمندانی را که می‌خواستند سواری بر روی ترن هوایی کودکان را تجربه کنند به‌خود جذب می‌کرد. در روزی که پل خراب شد عرشهٔ آن آخرین جفتك هشداردهندهٔ خود را انداخت و لذا با نگرانی از خطرات احتمالی آن را بر روی ترافیك عبوری بستند. آخرین حرکات تماشایی پل که با پیچ و

---

۱ - Olympic Peninsula ، شبه جزیره‌ای در شمال غربی واشینگتن

تاب عرشه منجر به سقوط آن گردید بر روی فیلم ضبط گردید و همانند کارهای تحقیقاتی مهندسانی بود که بر روی مدل‌های کوچك پدیدهٔ ناپایداری آیرودینامیکی را مورد بررسی قرار می‌دهند. فیلم آخرین دقایق سقوط پل تاکوما از مدارك بسیار ارزشمند به‌شمار می‌آید.

بررسی‌هایی که بعداً در بارهٔ شکست پل تاکوما انجام شد نشان داد که کف عرشهٔ پل بیش‌تر همانند بال هواپیما در تحت اثر تلاطم باد عمل می‌کرده است. پس از آن دیگر چنین تلقی آیرودینامیکی از طراحی پل را چشم‌پوشی نمی‌کنند، و همهٔ پل‌های معاصر پل تاکوما که مورد تردید واقع شده بودند به‌سرعت با فولادهایی در مقابل وزش باد تقویت شدند، اضافه کردن این فولادها گرچه ظاهر این پل‌ها را خراب می‌کرد ولی ایمنی سازه‌ای آن‌ها را تضمین می‌کرد. برای طراحی پل‌های بعدی، همانند طراحی‌های هواپیماها، از آزمایش در تونل باد استفاده می‌شد.

احتمال شکست پل تاکوما بر اثر وزش بادی به سرعت حدود شصت و پنج کیلومتر در ساعت اصلاً توسط طراحان آن پیش‌بینی نشده بود و در نتیجه چنین حالتی مورد آنالیز قرار نگرفته بود. بر روی کاغذ رفتار پل برای تحمل وزن مردهٔ خود و بار ترافیك سبك عبوری عالی بود. با توجه به اینکه طبق برآوردهای انجام‌شده بار ترافیکی این پل بسیار کم‌تر از طرح مشابه آن در پل برانکس - وایتستون بود، پل تاکوما برای دو خط و پل برانکس - وایتستون برای شش خط عبوری طراحی شده بودند. پل برانکس - وایتستون یك سال زودتر از پل تاکوما افتتاح شد و برای مقابله با حرکات شدید و غیرمنتظره‌ای که در هنگام وزش باد داشت توسط کابل‌های اضافی و تقویت کننده‌های خاصی مجهز شده بود. این کارهای اصلاحی حرکات بالا و پایین رفتن کف عرشهٔ پل را تا حد بسیار زیادی کاهش داد، ولی با این وجود کسانی که در ساعات شلوغ از آن استفاده می‌کردند کاملاً حرکات نوسانی و موجی آن را حس

می‌کردند. یك روز بعدازظهر که از برانکس[۱] به لانگ آیلند[۲] می‌رفتم و در روی پل در ترافیك سنگین گیر کرده بودم حرکات نگران‌کنندهٔ پل را حس می‌کردم، اگرچه که پس از فرو ریختن پل تاکوما دیواره‌ای شبکه‌ای از فولاد در طرفین پل و بین پایه‌ها برای تقویت کردن آن افزوده بودند. در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ مجدداً کارهای اصلاحی دیگری برای کاهش حرکات پل در هنگام وزش باد انجام گردید.

به‌هرحال، حرکات پل تاکوما آن‌قدر شدید بود که به‌جای اینچ برحسب فوت بیان می‌شد و مدت کوتاه عمر آن فرصت انجام کارهای اصلاحی را نداد. در همان زمانی که پل بر اثر باد از هم گسیخته می‌شد، مدل کوچکی از آن در دانشگاه واشینگتن[۳] تحت آزمایش بود تا با بررسی مشکل نسبت به یافتن راه چاره اقدام کنند. مدل مشابهی نیز از پل برانکس - وایتستون در دانشگاه پرینستون ساخته شده بود، و گرچه که هر دوی آن‌ها قادر به ایجاد حرکات مشابه پل بودند، هیچ‌کدام از آن‌ها نمی‌توانستند به‌درستی مشکل را توجیه کنند. بالاخره پس از کشیده شدن ماجرای فرو ریختن اسب چهارنعل به تیتر روزنامه‌ها و تحقیقات انجام‌شدهٔ بعدی، پدیدهٔ ناپایداری آیرودینامیکی پل‌های معلق مورد توجه قرار گرفت که چگونه باعث می‌شود عرشهٔ لاغر پل در برابر وزش باد همانند بال هواپیما عمل کند.

از میان اولین اشاره‌ها به علت واقعی شکست پل، نامهٔ تئودور فون کارمن[۴] مدیر آزمایشگاه هوانوردی دانیل گوگنهایم[۵] انستیتوی

---

۱ - Bronx ، محله‌ای در نیویورک

۲ - Long Island ، جزیره‌ای در جنوب شرقی نیویورک

۳ - University of Washington ، در سن‌لوئیز

4 - Theodore von Karman

5 - Daniel Guggenheim Aeronautical Laboratory

تکنولوژی کالیفرنیا[1] به مجلهٔ انجینیرینگ نیوز رکورد می‌باشد. در نامهٔ وی که شرحی خلاصه و مقدماتی از وضعیت پل است، با استفاده از معادلات دیفرانسیل، برای مدل کردن حرکت نوسانی عرشهٔ پل همانند بال هواپیما، نیروهای برا[2] که باعث ایجاد خمش در عرشه می‌شود بیان شده است. وی نشان داده بود که در حالاتی که کابل‌های معلق عامل مقاوم اصلی در مقابل چرخش باشند جواب ساده‌ای می‌توان برای این معادله یافت که تعیین کنندهٔ سرعت بحرانی باد برای ایجاد چرخش عرشه پل خواهد بود. در معادلات به‌دست‌آمده توسط فون کارمن نشان داده شده بود که پل تاکوما نسبت به پل برانکس - وایتستون حدود سه برابر باریک‌تر بوده و از نظر عمق عرشه در مقایسه با طول دهانهٔ خود، که در آن زمان از لحاظ طول سومین پل دنیا محسوب می‌شد، با ضریب دو کم‌عمق‌تر بود. بدین ترتیب فون کارمن ثابت کرد پل تاکوما شدیدتر از هر پل دیگری متأثر از پدیدهٔ ناپایداری آیرودینامیکی بوده است. در واقع نیز پل بر اثر بادی که سرعت آن حدود پانزده کیلومتر در ساعت کمتر از سرعت محاسبه‌شده در این نامه بود، که دو هفته پس از حادثه نوشته شده بود، فرو ریخته بود.

به‌هرحال، اگرچه که چنین محاسباتی از حل معادلات دیفرانسیل قبلاً وجود نداشته است، ولی تجربیاتی به قدمت یکصد سال وجود داشته است که می‌توانسته هشدار لازم را به طراحان پل تاکوما در مورد نوع خاصی از شکست که فون کارمن مشخص کرده بود بدهد، و چنین فاجعه‌های تاریخی هستند که قویاً به مهندسان گوشزد می‌کنند که بایستی با تاریخچهٔ تکنولوژی آشنا باشند. اگر طراحان پل تاکوما از ماجرای

---

۱ - California Institute of Technology ، در پاسادنا ایالت کالیفرنیا

2 - lift force

پل معلق ویلینگ[1] ، که در موقع اتمام ساخت در سال ۱۸۴۹ طویل‌ترین پل دنیا بود، اطلاع داشتند دیگر هیچ عذری نمی‌توانستند داشته باشند که در هنگام طراحی از پیش‌بینی باد به‌عنوان عاملی محتمل برای ایجاد شکست غافل شوند. پل ویلینگ پس از پنج سال بر اثر طوفان فرو ریخت. در گزارش فنی حادثه به جزئیات اشاره‌ای نشده است و بدین ترتیب مهندسان معاصر و مهندسان آینده ـ و منجمله مهندسان پل تاکوما ـ را از درس‌های ارزنده‌ای که می‌توانستند از این شکست بیاموزند محروم کرده است، اما یك خبرنگار محلی طی گزارش خود در تاریخ ۱۷ ماه می ۱۸۵۴ در روزنامهٔ ویلینگ اینتلیجنسر[2] ماجرای آخرین دقایق حیات پل را چنین ثبت کرده است:

> با اندوهی غیرقابل وصف به اطلاع می‌رساند که سازهٔ باشکوه و معروف دنیا پل معلق ویلینگ بر اثر طوفانی شدید از جایگاه مستحکم خود فرو ریخت، و اکنون به‌صورت توده‌ای آهن قراضه در آمده است. دیروز نیز مانند روزهای دیگر هزاران نفر این سازهٔ شگفت‌انگیز را که با قدرت هرچه تمام بر روی آب‌های زیبای اوهایو استوار بود مشاهده کردند، و از وجود آن به عنوان غرورانگیزترین کارهای عمرانی شهرمان به‌خود بالیدند. اکنون از آن همه عظمت جز پایه‌هایی مرتفع در میان انبوه درهم فرو ریختهٔ پل چیزی باقی نمانده است.
>
> دیروز ساعت ۳ مانند بسیاری از اوقات دیگر قدم‌زنان به روی پل رفتیم و از نسیم خنك و نوسان پل لذت بردیم. هنوز یکی دو دقیقه از برگشتن ما نگذشته بود که متوجه شدیم چندین نفر از پل

---

۱ - Wheeling Suspension Bridge ، در ایالت اوهایو

2 - *Wheeling Intelligencer*

به‌طرف ساحل می‌دوند و این سازهٔ غول‌پیکر دچار تکان‌های شدیدی شده است.
نفس‌هایمان در سینه حبس شده بود و به این صحنه خیره شده بودیم، پل مانند یك کشتی در دریای طوفانی تکان می‌خورد، یك بار کف پل تا نزدیکی بالای پایه‌ها بالا آمده و با پیچ و تاب زیاد پایین آمد. بالاخره بر اثر چرخش شدیدی در تمام طول دهانه تقریباً نصف کف پل وارونه شد و این سازهٔ عظیم‌الجثه با غرش مخوفی از ارتفاع زیاد به‌درون رودخانه سرنگون شد.
برای یافتن دلایل سقوط غیرمنتظرهٔ این سازهٔ شگفت‌انگیز بایستی منتظر بررسی‌های بعدی بود. ما شاهد این واقعهٔ سهمگین بودیم. بدنهٔ بزرگ عرشه و آویزهای آن، که مانند زنبیلی آویزان از پایه‌های آن به‌نظر می‌آمد، مثل آونگ ساعت به اطراف تاب می‌خورد. با هر حرکت نوسان آن بیش‌تر می‌شد و فشار بیش‌تری به کابل‌های نگهدارندهٔ پل وارد می‌شد، کابل‌ها دیگر توان تحمل این نیروی زیاد در جهات مختلف را نداشتند و به‌تدریج با پیچ و تاب خوردن از محل اتصالات خود جدا شده و . . .
اطمینان داریم که با تکیه بر روحیهٔ فعال و همکاری جمعی شهروندان این ضایعهٔ بزرگ در اسرع وقت ممکن جبران خواهد شد. مایهٔ خوشبختی است که این حادثـــه هیچ تلفات جانی نداشتـــه است.

توصیف فوق از فرو ریختن پل ویلینگ همانند صحنه‌هایی است که حدود یك قرن بعد، از شکست پل تاکوما بر روی فیلم ثبت شده است. اگرچه که هر دو حادثه تلفات جانی نداشت و پل دیگری در طی مدت کمی به‌جای پل تاکوما نصب گردید، ولی اصلاً مایهٔ خوشبختی نیست که

چنین شکستی در اواسط قرن بیستم، آن‌هم نه تنها پس از وجود نمونه‌ای همانند پل ویلینگ، بلکه با وجود موردی نیز مانند پل معلق منای استریتز، اتفاق بیافتد. این پل نیز فقط یك ماه پس از افتتاح آن در اوایل ۱۸۲۶ بر اثر طوفان دچار چنین حرکات شدیدی شده و چندین میلهٔ قائم نگهدارندهٔ آن و تعدادی از تیرهای عرشهٔ این پل ۱۵۰۰ فوتی پاره شد. گزارشی که در آن زمان تهیه شده است کاملاً مشخص کرده که خراب شدن سازه به علت نوسانات عرشهٔ آن بوده است. پل مذکور تعمیر و تقویت شد ولی باز هم در طوفان‌های بعدی دچار حرکات شدید و خسارات زیاد می‌شد. نمونه‌های مشابه تاریخی دیگری نشان از احتمال خرابی پل تاکوما می‌داد، ولی ظاهراً طراحان جدید به این تجربیات و آموخته‌های حاصل از آن‌ها چندان توجهی نداشته‌اند. و اگر چنانچه که امکان وقوع فاجعهٔ خرابی پل یا هر سازهٔ دیگری از روی نقشه‌ها فهمیده نشود، بعداً پس از روی دادن حادثه مهندسان و مردم را دچار تعجب و شگفتی خواهد کرد، همان‌گونه که با فرو ریختن پل تاکوما در سال ۱۹۴۰ چنین شد.

اگر شکست‌های اشاره‌شده عاملی در جهت ساخت پل‌های بهتر بوده است، سازه‌های موفق نیز به نوبهٔ خود عاملی برای پیدایش سازندگان بهتری برای پل‌ها بوده است. پل بروکلین که دیوید اشتینمن[1] به همراه کارهای ساختمانی آن ترقی کرده بود باعث ترغیب وی شد تا به یك سازندهٔ پل معلق تبدیل شود. در همان زمانی که پل تاکوما دستخوش نوسانات نگران‌کننده‌ای بود، اشتینمن در حال نوشتن سرگذشت جان روبلینگ و پسرش واشینگتن و امیلی[2] همسر واشینگتن بود که پس از

---

1 - David Steinman
2 - Emily Roebling

زمینگیر شدن شوهرش در حادثهٔ ساخت یکی از پایه‌ها سرپرستی کارهای وی را عهده‌دار شده بود. اشتینمن که خود طراح بیش از چهارصد پل می‌باشد، می‌گوید برای اینکه دین خود را به پل بروکلین عامل الهام‌بخش وی ادا کرده باشد به مدت پنج سال سرگرم تحقیق و نوشتن سرگذشت خانوادهٔ روبلینگ بوده است، و سپس در سال ۱۹۴۸ مسؤولیت بازسازی این سازهٔ تاریخی برای تحمل ترافیك سنگین‌تر به وی محول گردید. بدین ترتیب پلی که در اواخر دههٔ ۱۹۴۰ تقریباً به یك بنای یادبود تاریخی تبدیل شده بود برای ترافیك شش خط عبوری بازسازی گردید در حالی که طرح اصلی آن به دو خط عبوری محدود بود.

اشتینمن طراح پل‌های باشکوهی از قبیل پل عظیم مکیناك[1] در میشیگان بوده است. ولی بدون تردید موفقیت سازه‌ای وی بیش از آنکه ناشی از پل بروکلین باشد مدیون شکست پل تاکوما است. اشتینمن با بررسی و درك صحیح اشکال پل تاکوما توانست اقدامات لازم را برای جلوگیری از ایجاد آن‌ها در طرح‌های خود به عمل آورد. ولی بعضی از طراحان نیز در رابطه با مشکلات پدیدارشده در پل تاکوما اقداماتی در طرح‌های خود به عمل آوردند که نتیجه‌ای جز سرافکندگی نداشت، مانند پل سورن که بر روی رودخانهٔ سورن ساخته شد و جنوب شرقی ولز را به جنوب غربی انگلیس متصل می‌سازد. پل سورن در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ و با ادعای انجام ابداعاتی در مقابله با مشکلات بارگذاری باد بر روی سازه طراحی گردید. شاه‌تیرهای عرشه از قوطی‌های سبکی بود که، همانند پل بروکلین، برای تحمل انواع ترافیك عبوری که در آن زمان پیش‌بینی می‌شد طراحی شده بود. اگرچه که پل بروکلین پس از نیم قرن عبور دادن ترافیك نیازمند به تقویت گردید، لیکن پل سورن پس از

---

۱ - Mackinac ، جزیره‌ای در شمال میشیگان

پانزده سال سنگینی فشار فزایندهٔ ترافیك را به‌تدریج در خود حس کرد.

کابل‌های مورب پل به‌تدریج ضعیف‌تر و فرسوده‌تر شده‌اند و بایستی تعویض شوند، و استفاده از پل نیز فقط به یك خط عبوری در هر جهت محدود شده است. این تمهیدات الزامی بود زیرا محدودهٔ مقاومت ذخیره‌ای پل اندك بود و بار ترافیکی درصد مهمی از بار وارده به سازه را تشکیل می‌داد. پل در هنگام وزش باد استوار و بدون لرزش به‌نظر می‌آید اما به کابل‌ها و عرشهٔ آن نیروی زیادی وارد می‌شود و عامل خوردگی در هوای مرطوب نیز وضعیت را بحرانی‌تر می‌کند. موفقیت‌های بزرگ استونسن‌ها و روبلینگ‌ها و اشتینمن‌ها الگو و الهام‌بخش آیندگان ـ و البته نه به‌صورت قاعده و قانون ـ می‌باشد. استواری پل‌های عظیم بیانگر آن است که هر ابتکار و نوآوری الزاماً محکوم به خطا و شکست نیست، و درعین‌حال این پل‌ها ممکن است منشاء اطمینان بیجا نیز باشد.

اگر از هرگونه ابتکار و نوآوری خودداری گردد شاید بتوان از شکست‌های سازه‌ای جلوگیری کرد. هر پل جدید را می‌توان دقیقاً مشابه پل دیگری که در طول زمان امتحان خود را پس داده است ساخت، ولی ترافیك عبوری از روی پل را هرگز نبایستی از ترافیك پل قدیمی بیش‌تر کرد. از هیچ مصالح جدیدی نبایستی استفاده کرد، و هیچ پل جدیدی بر روی هیچ رودخانه‌ای نبایستی زد مگر در جایی که پی‌ها و شرایط باد آن دقیقاً مشابه با وضعیت پل‌های موفق ِ موجود باشد. به‌سادگی و با اعلام منع ابتکار و تغییر می‌توان عملاً از خطرات شکست پرهیز کرد. اما این منع در واقع منع پیشرفت هم خواهد بود، زیرا بدون مجاز بودن تغییرات ما عملاً مجاز نخواهیم بود پلی را در جایی که قبلاً پل دیگری به‌صورت موفقیت‌آمیز ساخته نشده باشد بسازیم. هیچ محلی دقیقاً مانند محل دیگر نیست، و هیچ وضعیت ترافیکی دقیقاً مانند وضعیت ترافیك دیگر نیست. حتی اگر خودمان را متقاعد کنیم که می‌توان پلی را دقیقاً با

مصالح و کیفیتی مشابه با پل دیگر ساخت، آن‌گاه با چنین پلی باعث توقف پیشرفت کارهای تجاری منطقه‌ای خواهیم شد که پل به آنجا خدمات رسانی می‌کند، زیرا پیشرفت بیش‌تر در کارهای تجاری مستلزم وارد شدن بار ترافیکی بیش‌تری به پل در مقایسه با نمونهٔ اصلی خواهد شد.

حتی شاعران و نقاشانی که پل‌های بروکلین و برج‌های ایفل را به عنوان سمبل‌هایی هنری به‌کار می‌برند آن‌ها را به‌صورت کلمات یا نقش‌هایی منجمد بر روی کاغذ یا بوم نمی‌خواهند. اشاراتی که هارت کرین[۱] و جوزف استلا[۲] در آثار خود به پل داشته‌اند، در طی سال‌های متمادی برای استخراج معانی بیش‌تر و وسیع‌تری در ساخته‌هایشان مورد مداقه قرار گرفته است. هر چه هنر آن‌ها تحول پیدا می‌کند سمبل‌هایشان نیز متحول می‌شود. همان‌طور که انتظار آخرین ابداع در عرصهٔ هنر انتظار عبثی است، نبایستی در انتظار چیزی به نام آخرین پل نیز بود. پل‌های بزرگ همانند ساخته‌های هنری شکسپیر[۳] و میکل آنژ[٤] نسل جوان‌تر را به چیزی فراتر از کپی کردن آثار بزرگ می‌خواند. گرچه که کپی کردن در دوران یادگیری می‌تواند مفید باشد، ولی هر کسی خواهان آن است که چیزی از خودش خلق کند، و آن چیز که می‌تواند یك پل یا یك شعر باشد حرکتی است در مسیری ناآزموده و غیرمطمئن. اما اگر طرح مورد نظر متکی به اصول متقن باشد و درصدد توسعهٔ بلندپروازانه و جلوتر از زمان محدوده‌های هنر و مهندسی نباشد،

۱- Hart Crane ، (۱۹۳۲-۱۸۹۹م)، شاعر آمریکایی

2 - Joseph Stella

۳- William Shakespeare ، (۱٦۱٦-۱٥٦٤م)، درام‌نویس و شاعر انگلیسی

٤- Michelangelo ، (۱٥٦٤-۱٤۷٥م)، مجسمه‌ساز و نقاش و آرشیتکت و شاعر ایتالیایی

شانس بسیار زیادی خواهد داشت که به دریای بیکران موفقیت‌ها بپیوندد.

اگر موفقیت‌های سازه‌ای، مهندسان را هرچه بیش‌تر در جهت طرح‌های جسورانه سوق دهد و باعث شود که آن‌ها به آنچه که واقعاً طرح ابتکاری نیستند بیش از حد اطمینان کنند، آن‌گاه بر اثر شکست سازه‌ای است که هشدار داده خواهد شد که آن‌ها از هدف خود دور افتاده‌اند. به همین دلیل است که شکست‌های سازه‌ای غالباً موضوع بررسی‌ها و تحقیقات دامنه‌درای هستند، البته نه بدان ترتیبی که ما به اشتباهات یکدیگر به طعن و بغض نظر می‌اندازیم، بلکه با این هدف که همهٔ مهندسان آشنایی و تسلط بیش‌تری نسبت به آنچه که برخی را قبلاً دچار مشکل ساخته بوده است پیدا کنند.

۱۴

مهندسی قانونی و داستان‌های تخیلی مهندسی

الکساندر کیلند[1] هیولایی عظیم‌الجثه از ده هزار تن فولاد بود که بر روی پنج پایهٔ یك دکل حفاری نفت نصب شده بود و قادر به حرکت در داخل آب بود. این شناور زمخت، که از نوع شناورهای نیمه غوطه‌ور به‌شمار می‌رفت، اصلاً برای انجام عملیات اکتشاف نفت در دریا ساخته شده بود، بدین منظور که در دریا از محلی به محل دیگر حرکت کند و در نقاطی که از نظر زمین‌شناسی مستعد وجود نفت شناخته شده لنگر انداخته و در بستر دریا چاه نفت اکتشافی حفر کند. در نقاطی که به نفت فراوانی برسند سکوی نفتی دائمی به نشانهٔ موفقیت این دکل حفاری دوره‌گرد در آن‌جا نصب می‌گردد که کار تولید و بهره‌برداری نفت زیر دریا را انجام می‌دهد.

اما چنین موفقیت شکوهمندی هرگز نصیب الکساندر کیلند نشد. با اتمام ساخت کیلند به سال ۱۹۷۶، به علت پیشرفت‌های سریعی که در کارهای مهندسی دریا به‌وجود آمده بود استفاده از چنین دستگاهی دیگر

---

1 - *Alexander L. Kielland*

منسوخ شده بود. این شناور پنج ضلعی که توسط فرانسوی‌ها ساخته شده بود هنگام نقل مکان، آب داخل محفظه‌های آن خالی می‌شد و وقتی به نقطهٔ مورد نظر می‌رسید به داخل محفظه‌ها مجدداً آب انداخته می‌شد و هفتاد فوت در آب فرو رفته و به‌صورت نیمه‌شناور در می‌آمد تا میزان پایداری آن در هنگام توقف افزایش یابد. بالاخره این شناور غول‌پیکر توسط مالکان نروژی آن به هتل شناوری برای اسکان ۳۴۸ نفر از کارکنان دکل‌های حفاری مدرن‌تری که در دریای شمال کار می‌کردند تبدیل شد. دکل صد و سی فوتی کیلند در جای خود باقی گذاشته شد ولی در اطراف آن به‌جای اینکه پر از لوله‌های حفاری باشد ده‌ها اتاق خواب و دیگر ساختمان‌های رفاهی برپا شد. چند سالی کارکنان سکوها از کیلند به‌عنوان محل خواب و استراحت استفاده می‌کردند و از آن‌جا با هلیکوپتر به محل کار خود در سکوهای اطراف می‌رفتند، همانند کسانی که در حومهٔ شهرها اقامت دارند و با اتوبوس یا قطار به محل کار خود در مرکز شهر رفت و آمد می‌کنند.

عصر روز بیست و هفتم مارس ۱۹۸۰، دویست و دوازده نفر در کیلند مشغول شام خوردن یا مطالعه یا استراحت در سونا یا سینما بودند. هوای بیرون سرد بود ولی یخ‌کننده نبود، باد شدیدی می‌وزید ولی هوا طوفانی نبود، امواج دریا بلند بود ولی چندان شدید و خطرناك نبود. در این زمان که هتل شناور (فلوتل)[1] کیلند در قسمت ادا از حوزهٔ نفتی اکوفیسك[2] دریای شمال لنگر انداخته بود درجهٔ حرارت هوا پنج درجهٔ سانتیگراد و سرعت باد شصت و پنج کیلومتر در ساعت و ارتفاع امواج بیست و پنج فوت بود، اما این ناحیه شرایط جوی بسیار شدیدتری را قبلاً

---

1 - Floatel
2 - Eda section of Ekofisk oilfield

به‌خود دیده بود. کیلند نیز برای شرایط محیطی بسیار سخت‌تری از این طراحی شده بود ـ شرایطی که هر یکصد سال یك بار می‌توان انتظار وقوع آن را داشت. بنابراین ساکنان دکل، گرچه شاید به دلیل دریازدگی احساس ناراحتی می‌کرده‌اند، مسلماً چندان نگران ایمنی خود نبوده‌اند. حتی اگر کیلند دچار فاجعه‌ای می‌شد که باعث شکسته شدن یکی از پنج پایهٔ آن می‌شد انتظار می‌رفت که دکل به‌تدریج کج شود و سرنشینان آن فرصت کافی برای استفاده از جلیقهٔ نجات و قایق‌های نجات را داشته باشند.

اما متأسفانه وقتی که یکی از پایه‌ها در ساعت شش و نیم عصر شکست، سازهٔ آن شروع به لرزیدن کرد و دکل با سرعت بسیار بیش‌تری از آنچه که قبلاً پیش‌بینی شده بود کج شد. جهت وزش باد طوری بود که مستقیماً به سطح کج‌شدهٔ عرشه می‌خورد، و طبق نظر بعضی‌ها تغییراتی نیز که بعدها در خوابگاه‌ها داده شده بود مزید بر علت شده بود. تعدادی از قایق‌های نجات نیز واژگون شده و کابل‌های آن‌ها در هم پیچیده شده بود و لذا امکان استفاده از آن‌ها وجود نداشت. این حادثه که بدترین حادثهٔ صنعت نفت دریایی بود ۱۲۳ قربانی به‌جای گذاشت و فقط ۸۹ نفر نجات یافتند.[۱]

در بارهٔ علت شکسته شدن پایهٔ کیلند حرف‌های بسیاری چون برخورد با یك زیردریایی و اشتباهات اساسی در طراحی زده می‌شد. توجیه اخیر بسیار نامحتمل بود زیرا کیلند یکی از ده دکل حفاری مشابهی بود که جدیداً ساخته شده بودند، درحالی که اشتباهات اساسی طراحی معمولاً

---

۱ ـ در حال حاضر بدترین حادثه صنعت نفت دریایی فاجعه آلفا پایپر می‌باشد. سکوی نفتی آلفا پایپر که در دریای شمال نصب شده بود در سال ۱۹۸۸ بر اثر نواقصی در طراحی سیستم‌های ایمنی فرآورش دچار آتش‌سوزی شد و از ۲۲۷ نفر کارکنان سکو ۱۶۷ نفر جان خود را از دست دادند. (م)

ابتدا در مورد سکوهای قدیمی مورد توجه قرار می‌گیرد. با حمل پایهٔ شکسته‌شده به محلی در نزدیکی بندر استونگر[1] در نروژ و بررسی سطوحی که دچار گسیختگی شده بودند، تعداد دیگری از نظریه‌های علت شکست پایه مردود شد. در یکی از مهارهایی که شکسته شده بود علائمی مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ وجود ترك بزرگی بوده است که علت آن نامعلوم بود. بر اثر هر موج ترك موجود در سازهٔ دریایی به میزانی کم‌تر از یك میلیونیم اینچ بزرگ‌تر می‌شود، اما با توجه به اینکه سازه‌ای مثل کیلند هر سال در معرض میلیون‌ها بار وزش موج قرار می‌گیرد بنابراین پس از مدتی احتمال وجود ترك‌های بزرگ در چنین سازه‌هایی امکان‌پذیر است. سازه‌های مهندسی حتی با وجود ترك‌های خستگی می‌تواند به کار خود ادامه دهد تا زمانی که مشخصات این ترك‌ها به حدی برسد که همانند تکه چوبی که اره می‌شود به‌طور ناگهانی دچار شکستگی گردد. در سازه‌های جدید، مهندسی برای مقابله با خستگی فلز از وجود هرگونه ترکی پرهیز می‌شود ولی ترك‌های جزئی و مویی غیرقابل اجتناب است، بنابراین طی برنامه‌ای منظم و دوره‌ای سازه مورد بازرسی قرار می‌گیرد و توسعهٔ ترك‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و قبل از اینکه آن ترك‌های بی‌اهمیت و جزئی تبدیل به ترك‌هایی خطرناك بشوند سازه را از سرویس خارج می‌کنند (به همین دلیل است که سکوی نفتی دریایی را می‌توان طوری طراحی کرد که عمر خستگی آن تقریباً معادل زمان مورد نیاز برای استخراج نفت آن محل باشد).

با حصول اطمینان از اینکه در سازهٔ تازه ساخته‌شده هیچ ترك یا نقص منجر به ترکی وجود ندارد می‌توان از ایجاد شکست خستگی در سازه جلوگیری کرد، زیرا تا زمانی که ترك‌های تازه‌ای در فلز سالم

---

۱ - Stavanger ، بندری در جنوب غربی نروژ

به‌وجود آید یا ترک‌هایی از نواقص قابل قبول قبلی توسعه پیدا کند ده‌ها میلیون سیکل کار ایمن سازه را می‌توان تضمین کرد. به‌هرحال، بررسی‌هایی که پس از حادثهٔ الکساندر کیلند به‌عمل آمد نشان داد که هنگام ساخته شدن آن، در محل جوش اتصال ورق تقویت‌کننده به مهار پایهٔ شکسته‌شده ترکی به‌طول حدود هفت سانتیمتر وجود داشته است. این ترک که تا آن زمان شناسایی نشده بود قبل از به آب انداخته شدن دکل وجود داشته است زیرا سطح این هفت سانتیمتر جوش شکسته‌شده کاملاً با رنگ پوشانده شده بود که این رنگ‌پاشی به درون شکاف ترک فقط هنگام انجام آخرین تمیزکاری‌ها و اصلاحات در خشکی و قبل از به آب انداخته شدن دکل ممکن بوده است. بقیهٔ سطوح گسیختگی کاملاً نشان‌دهندهٔ مشخصات توسعهٔ ترک خستگی بود که فلز تا حدی که بیش از آن قادر به تحمل نبود ترک خورده بوده و بالاخره به‌طور ناگهانی از هم جدا شده است. حتی یك موج نه چندان بزرگ نیز کافی بوده است تا این سازه را که دارای چنین شکاف بزرگی در پایه بوده است در هم بکوبد.

بعد از حادثه، لاشهٔ الکساندر کیلند به خلیج استونگر حمل شد و به مدت بیش از سه سال به همان صورت وارونه در آب باقی ماند، طی این مدت نظرات مختلفی در مورد سرنوشت آن ابراز می‌شد. برگرداندن این دکل واژگون به حالت قائم خود در تاریخ کارهای اسقاطی می‌توانست کار برجسته و بی‌نظیری باشد، و با توجه به اینکه اجساد سی و یك تن از قربانیان حادثه پیدا نشده بود و احتمال یافتن آن‌ها در اتاق‌ها یا سینمای فلوتل وجود داشت موضوع جابه‌جایی دکل جنبهٔ احساسی و انسان - دوستانه‌ای نیز پیدا کرده بود. بالاخره تقاضاهای بسیار برای یافتن اجساد قربانیان حادثه، حکومت نروژ را بر آن داشت که با صرف مبلغ ۳۴ میلیون دلار و با برنامه‌ای دقیق که شامل استفاده از مخازن شناوری و

بارج‌ها و کنترل از ساحل بود اقدام به برگرداندن دکل نماید. کار به حالت قائم در آوردن دکل با موفقیت انجام گردید ولی فقط اجساد شش نفر در آن پیدا شد. پس از آنکه لاشهٔ دکل توسط متخصصین مختلف شامل پلیس (به‌منظور بررسی بعضی ادعاها مبنی بر توزیع مواد مخدر در فلوتل) و مأموران بیمه (به‌منظور یافتن شواهدی علیه سازندهٔ دکل) مورد بررسی کامل قرار گرفت، در نوامبر ۱۹۸۳ لاشهٔ الکساندر کیلند را در عمق آب‌های هفتصدمتری دریا غرق کردند. اکنون این دکل از جلوی دیدگان همه محو شده است، اما یاد آن همیشه در ذهن بستگان قربانیان حادثه و مهندسانی که در صدد طراحی دکل یا سکوهای دریایی جدید هستند باقی خواهد ماند.

بازرسی لاشهٔ کیلند نمونه‌ای از کار مهندسی قانونی[1] است که با اصطلاح آنالیز شکست[2] یا بررسی شکست از آن اسم برده می‌شود. اگرچه که علت اصلی علاقه به انجام بررسی‌های پس از حوادث بدون تردید ناشی از مسائل مربوط به ادعاهای بیمه‌ای و حقوقی می‌باشد، لیکن طی این بررسی‌ها با درك دقیق علل شکست سازه‌ای تجربیات مهندسی بسیار ارزشمندی را می‌توان به‌دست آورد. مخصوصاً شناخت دقیق نحوهٔ خراب شدن سازه‌ای مانند کیلند از آن جهت نیز اهمیت دارد که امکان تصمیم گیری منطقی و مستدل در مورد اصلاح یا عدم اصلاح طرح و یا در خصوص نحوهٔ استفاده از سازه‌های ساخته‌شده‌ای که کاملاً مشابه آن هستند فراهم می‌سازد. توقف پرواز کلیهٔ هواپیماهای ملك‌دانل داگلاس دی‌سی- ۱۰ در سال ۱۹۷۹ تصمیمی محتاطانه مبتنی بر این احتمال بوده است که فاجعهٔ سقوط یك فروند از این نوع هواپیما در شیکاگو نشانه‌ای

---

1 - forensic engineering
2 - failure analysis

از وجود برخی اشتباهات در طراحی هواپیما می‌باشد. گرچه قطع پرواز برای خطوط هوایی و سازندگان هواپیما مشکلات مالی بسیاری به‌بار می‌آورد، اما کاملاً ضروری می‌باشد و علت ضرورت چنین کارهایی ارتباط آن‌ها با بررسی و تحلیل دقیق و زیرکانهٔ آثار و نشانه‌هایی است که حتی کارگاه شرلوك هولمز نیز هرگز در کار خود روبرو نبوده است. گزارش‌های مقدماتی بررسی‌های شکست معمولاً ابتدایی و نارسا می‌باشد، و گزارش‌های نهایی نیز که پس از بررسی‌ها و مطالعات سنجیده و عمیق ارائه می‌شود ممکن است به‌طور کلی اشتباه باشد.

نمونهٔ بارزی از مهندسی قانونی در رابطه با پیشرفت و توسعهٔ اولین هواپیمای جت مسافربری می‌باشد. در اولین سالگرد پروازهای جت مسافربری یك هواپیمای دهاویلند کامت[1] در دوم می ۱۹۵۳ هنگام بلند شدن از فرودگاه دام دام[2] کلکته در هندوستان دچار حادثه شده و منهدم گردید. با توجه به اینکه اجزاء هواپیما در منطقهٔ نسبتاً وسیعی پراکنده شده بود، چنین به‌نظر می‌آمد که احتمالاً هواپیما در هوا دچار انفجار شده باشد و در این رابطه نیز بعضی‌ها تصادم با رعد و برق شدید حاره‌ای را علت انفجار قلمداد می‌کردند. پس از بازرسی قطعات لاشهٔ هواپیما مشخص شد که دم هواپیما احتمالاً بر اثر برخورد با جسمی سنگین شکسته شده باشد، اما اینکه جسم سنگین مذکور چه چیز می‌توانسته باشد معلوم نبود. ضمن اینکه چنین حدسی منجر به این نتیجه‌گیری شد که آتش‌سوزی پس از وقوع حادثه ایجاد شده است و علت به‌وجود آمدن حادثه نبوده است. هیأت تحقیق دولت مرکزی هندوستان رسماً علت حادثه را نوعی شکست سازه‌ای ناشی از وارد شدن

---

1 - de Havilland Comet
2 - Dum-Dum Airport

نیرویی زیاد به بدنه هواپیما بر اثر طوفان شدید یا عدم کنترل صحیح خلبان در هنگام مواجه شدن با طوفان اعلام کرد. با توجه به اینکه نیروهایی که عامل سقوط هواپیما در کلکته بود بسیار فراتر از حدی تشخیص داده شدند که منطقاً در پروازها می‌توان انتظار آن را داشت، بنابراین اساس طراحی هواپیما مبرا از عیب دانسته شد. بدین ترتیب اولین هواپیمای جت مسافربری، که به گفتهٔ طراحان " از روی میز نقشه‌کشی به پرواز در آمده بود " ، زیرا قبل از اینکه حتی یك مدل نمونه‌ای از آن ساخته شده باشد به خط تولید افتاده بود، همچنان به‌عنوان شاهکاری مهندسی جلوه‌گر شد. طراحان کامت عموماً بر این باور بودند که در پیشبرد تکنولوژی هواپیماسازی فوق‌العاده محافظه‌کاری کرده‌اند، و اعتقاد داشتند که هواپیما را بسیار دست‌بالا طراحی کرده‌اند. تا زمانی که سقوط کامت به شرایط جوی شدید یا اشتباه خلبان نسبت داده می‌شد، طرح آن نمی‌توانست به‌عنوان مظنون شماره یك مورد توجه قرار گیرد.

بدین ترتیب هواپیماهای کامت مبری از نقص شناخته شدند و بدون کم‌ترین نگرانی و شك مجدداً به خدمت گرفته شدند، اما این وضعیت هشت ماه بیش‌تر طول نکشید. در دهم ژانویه ۱۹۵۴ و در شرایط جوی آرام یك فروند هواپیمای کامت پس از بلند شدن از فرودگاه رم در ارتفاع ۲۷۰۰۰ فوتی منفجر شد و قطعات آن در محوطهٔ وسیعی در اطراف جزیره الب[1] در دریای مدیترانه پراکنده شد. مسؤولیت رسیدگی و تحقیق در بارهٔ حادثه به موسسهٔ هواپیمایی سلطنتی فارنبرو[2] در انگلستان واگذار گردید، لیکن جمع‌آوری قطعات هواپیما بسیار مشکل بود و قطعاتی نیز که پیدا شد کمك چندانی به این تحقیقات نکرد. و این بار هم

---

1 - Elba
2 - Farnborough Royal Aircraft Establishment

شواهدی که نشان‌دهندهٔ وجود نقص در طرح هواپیما باشد به‌دست نیامد.

دلایل احتمالی بسیاری برای توجیه سقوط دومین هواپیمای کامت ارائه شد، اما به علت وجود شواهد اندك امکان نتیجه‌گیری قطعی میسر نشد. بدین ترتیب درحالی‌که این حادثه در هاله‌ای از ابهام فرو رفته بود، ده هفته پس از سقوط دومین هواپیما، کامت‌ها مجدداً در خطوط هوایی به پرواز در آمدند، تا اینکه در هشتم آوریل ۱۹۵۴ سومین، و آخرین، انفجار هواپیمای کامت در نیمه راه اوج‌گیری در پرواز مسیر لندن - قاهره - ژوهانسبورگ و هنگام برخاستن هواپیما از فرودگاه رم اتفاق افتاد. لاشهٔ این هواپیما در آب‌های خیلی عمیق پراکنده شده بود و هیچ امیدی به یافتن قطعات آن نبود، بنابراین تلاش برای یافتن بازماندهٔ قطعات حادثهٔ الب مجدداً مطرح شد و با شدت بیش‌تری پیگیری گردید. طرحی در فارنبرو تهیه گردید و چند مدل چوبی از هواپیمای کامت را در روی دریا منفجر کردند تا محل دقیق‌تر افتادن قطعات آن را شناسایی کنند. بررسی‌هایی که از این طریق و با کمك دوربین‌های تلویزیونی زیرآبی انجام شد منجر به یافتن قطعات بیش‌تری از هواپیما گردید و مسؤولین طرح تلاش‌های خود را برای پیدا کردن شواهد و ارتباط دادن آن‌ها به یکدیگر ادامه دادند. وقتی که قسمت دم هواپیما نیز پیدا شد شواهدی قطعی مبنی بر اینکه قسمت جلوی هواپیما قبل از قسمت عقب آن منهدم شده است به‌دست آمد. هنگام بررسی دم هواپیما معلوم شد که این قسمت به‌شدت گرم شده بوده است زیرا که آثار تکه‌ای از نوشته‌های یك روزنامه به‌طور معکوس بر روی آن یافت شد که حتی پس از چند ماه که در دریای مدیترانه غرق شده بود هنوز قابل خواندن بود. با یافتن اثر یك سکهٔ هندی بر روی دم هواپیما هیچ‌گونه شك و تردیدی باقی نماند که کابین تحت فشار کامت قبل از شکسته شدن دم هواپیما منفجر شده است، زیرا که سکهٔ مذکور پس از منفجر شدن کابین مسافران از آن جا

به بیرون پرتاب شده بوده و به قسمت دم هواپیما اصابت کرده بوده است.

علی‌رغم مشخص شدن منفجر شدن کابین، هنوز علت آن معلوم نشده بود. برای یافتن علت انفجار، یکی از هواپیماهای کامت را درون حوضچهٔ آب قرار دادند، و از طریق پمپ کردن متناوب آب به درون کابین، افزایش و کاهش فشار وارده به کابین را که در هنگام پرواز به‌وجود می‌آید شبیه‌سازی کردند. بال‌ها را نیز به‌طور هم‌زمان توسط جك‌های هیدرولیکی بالا و پایین می‌بردند تا شبیه عملکرد اثر باد بر روی بال‌ها در هنگام پرواز باشد، این آزمایش شبیه‌سازی را برای حدود سه هزار بار پرواز ادامه دادند. و ناگهان در این مرحله، که تعداد پروازها بسیار کم‌تر از میزانی بود که پیش‌بینی شده بود پس از حداقل حدود ده هزار پرواز مسائل و مشکلات ناشی از خستگی پدیدار گردد، در گوشهٔ یکی از پنجره‌های کابین ترکی ایجاد گردید که پس از ادامهٔ آزمایشات شبیه‌سازی پرواز توسعه پیدا کرده و بالاخره پنجره از بدنهٔ هواپیما جدا شد. در این آزمایش با خروج آب از این روزنه فشار آب داخل کابین کاهش یافته و کابین دچار انفجار نگردید، لیکن در پرواز واقعی سرعت گسترش ترك بسیار بیش‌تر از آن است که فرصتی برای خروج هوای تحت فشار کابین باشد و توسعهٔ این ترك سریعاً منجر به انفجار کابین می‌گردد. در واقع اگر این آزمایشات از سر لاعلاجی و توسط مهندسان در فارنبرو انجام نشده بود، پروازهای کامت مجدداً از سر گرفته می‌شد تا اینکه نقص در طراحی خستگی آن به شکلی دیگر آشکار و مشخص گردد.

بدنهٔ کابین تحت فشار هواپیمای کامت هنگام طراحی به‌عنوان سازه‌ای جدید و مهم مورد توجه بود، ولی پیش‌بینی نمی‌شد که موضوع خستگی عامل قابل توجهی باشد زیرا تحت فشار قرار گرفتن و تخلیهٔ این فشار فقط یك بار در هر پرواز اتفاق می‌افتاد. بنابراین رسیدن به صدها

هزار یا حتی میلیون‌ها بار تکرار سیکل بارگذاری، که تا آن زمان تصور می‌شد لازمهٔ امکان ایجاد آسیب خستگی است، مستلزم دفعات پرواز بسیاری بود که عملاً دور از ذهن بود. (در حالی که محور یك قطار در هر مایل مسافت حدود هزار دور می‌چرخد، هواپیماهای اولیهٔ کامت فقط پس از حدود چند هزار ساعت پرواز از مقدار سی هزار ساعت پرواز پیش‌بینی‌شده برای طول عمر آن‌ها دچار خرابی شدند). به همین علت، طراحان کامت هیچ نگرانی در رابطه با خستگی نداشتند بلکه صرفاً به توانایی بدنهٔ هواپیما برای تحمل این فشار توجه داشتند. با اینکه فشار داخل بدنهٔ هواپیما فقط ۸/۲۵ پوند بر اینچ مربع (۶/۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) بیش‌تر از فشار خارج آن بود، دیوارهٔ آن طوری طراحی شده بود که تا ۲۰ پوند بر اینچ مربع (۱/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) فشار مازاد بر فشار خارجی را تحمل کند. یعنی ضریب اطمینان طراحی آن نزدیك ۲/۵ بوده است که بیش‌تر از ضریب اطمینان متداول در آن زمان در صنعت هواپیمایی که ۲ بود می‌باشد. همچنین، هر هواپیمای کامت پس از ساخته شدن و قبل از اینکه در خطوط تجاری به‌کار گرفته شود تحت آزمایش گواه تا حد فشار ۱۶/۵ پوند بر اینچ مربع (۱/۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) قرار می‌گرفت که به‌عنوان تضمینی بر کارکرد آن در نظر گرفته می‌شد. در گزارش کمیتهٔ تحقیق فاجعهٔ کامت خاطرنشان شده است که،

> در طراحی هواپیما، دهاویلندها متکی به اصول و روش‌های شناخته شده‌ای بوده‌اند که عمدتاً توسط کلیهٔ طراحان هواپیما به‌کار گرفته می‌شود. لیکن آن‌ها در صدد انجام کاری فراتر از حدود تجربیات انجام‌شدهٔ قبلی بودند و لذا تصمیم گرفتند که آزمایشات کاملی از هر قطعهٔ سازهٔ کابین به‌عمل آورند.

. . . آن‌ها بر این باور بودند، و شورای عالی هوایی و هر متخصص دیگری نیز چنین باور داشت، که هرگاه کابینی بتواند از آزمایشی تحت دو برابر فشار حالت کاربردی آن بدون صدمه‌ای سلامت بیرون آید . . . هنگام به‌کار برده شدن دچـــار شکست ناشـــی از خستگی نخواهد شد. . . .

و البته که این باور آن‌ها اشتباه بود، و تجربهٔ حاصل از کامت‌ها نهایتاً باعث اصلاح و پیشبرد هنر طراحی هواپیما گردید. با مشخص شدن اینکه مسألهٔ خستگی بر اثر وجود تنش‌های زیاد در اطراف سوراخ پرچ‌های بدنهٔ هواپیما در کنار پنجره‌ها تشدید می‌شود، دور تا دور دریچهٔ پنجره با طرح جدید تقویت‌شده‌ای جایگزین شد. بدین ترتیب مقاومت کابین در برابر خستگی افزایش یافت، و آزمایشات نشان داد که بدنهٔ آن می‌تواند بیش از یکصد هزار بار فشار متناوب را تحمل کند، که بیانگر امکان پرواز به مدت صدها هزار ساعت می‌باشد. بنابراین می‌شد ادعا کرد که مدل جدید کامت ۴ ، با رعایت بازرسی دوره‌ای در هر ده هزار ساعت پرواز، هواپیمایی ایمن است.

سرجفری دهاویلند در کتاب خاطرات خود ضمن بر شمردن مراحل و آزمایشات سختی که کامت برای اثبات کارآیی خود گذرانده اشاره می‌کند که تنی چند از دوستان خوش‌نیت پیشنهاد کردند که با توجه به حوادث کامت‌های قبلی نام مدل‌های جدید آن تغییر داده شود. اما سرجفری به‌جای تغییر نام هواپیما که مایهٔ اعتبار و افتخار شرکت بوده است و صادقانه به‌منظور بهبود اوضاع اقتصادی پس از جنگ کشور انگلستان و با هدف تسخیر بازار رو به رونق مسافرت‌های هوایی دور پرواز طراحی و ساخته شده بود، مصرانه با حفظ نام کامت فقط عدد ۴ را برای نشان دادن مـــدل جدید به انتهای آن اضافه کرد. وی با تغییر نام

هواپیما مخالف بود، و علت مخالفت خود را چنین نوشته است:

. . . تغییر نام به عقیدهٔ من نوعی عوام‌فریبی ناشیانه بود و بیش از اینکه فایده‌ای داشته باشد به اعتبار شرکت لطمه وارد می‌کرد. اگر چنین می‌کردیم دیر یا زود به ما گفته می‌شد که با حقهٔ بچگانه‌ای ظاهرفریبی کرده‌ایم، و این مغایر با هـــدف ما بود که می‌خواستیم ثابت کنیم شکست کامت به موفقیت کامت تبدیل شده است.

و عملاً نیز چنین شد. گرچه که گمان می‌شد شرکت بوئینگ[1] اولین شرکتی باشد که در آن سوی اقیانوس هواپیماهای جت را در خطوط منظم مسافربری در اقیانوس اطلس به‌راه اندازد، اما این هواپیماهای دهاویلند کامت ۴ بودند که به‌عنوان اولین هواپیمای جت مسافربری در سال ۱۹۵۸ در خطوط ماوراء اقیانوس اطلس به‌کار گرفته شدند و برای نام هواپیما اعتبار کسب کردند. این پیروزی تأکید مجددی بر این واقعیت بود که شکست سازه‌ای بالقوه می‌تواند در نهایت به موفقیت رهنمون شود، اگرچه که پیمودن این روند گاهی ممکن است طولانی باشد. تکنولوژیست‌ها نیز مانند دانشمندان تا زمانی که شواهدی قوی، که معمولاً به‌صورت شکست‌هایی می‌باشند، آن‌ها را به پذیرفتن طرحی جدید متقاعد نکند به نظریه‌های خود پایبند هستند.

نویل شوت نوروی[2] در سال ۱۹۲۲ پس از اتمام تحصیلات مهندسی هواپیما در دانشگاه آکسفورد به شرکت هواپیمایی دهاویلند[3] پیوست و از سال ۱۹۲۳ نیز به‌صورت تمام وقت در سمت محاسب در آن جا مشغول

---

1 - Bocing Company

۲ - Nevil Shute Norway ، (۱۹۶۰-۱۸۹۹م)، مهندس هوانوردی و نویسنده انگلیسی

3 - de Havilland Aircraft Company

به کار شد. وی اولین داستان خود را در همان زمان در اوقات فراغت نوشت، ولی پس از اینکه چند ناشر از چاپ آن خودداری کردند آن را کنار گذاشت. ولی همچنان نوشتن را ادامه داد و داستانی را در سال ۱۹۲۶ به چاپ رساند. در همین دوره نیز نوروی در حرفهٔ مهندسی پیشرفت کرد و از شرکت هاویلند به پروژهٔ هواپیمایی دیگری پیوست و بعداً به سال ۱۹۳۰ در تأسیس شرکت جدید هواپیماسازی ایراسپید[1] مشارکت کرد. با گسترده شدن فعالیت‌های حرفه‌ای عملاً ناچار شد کار نوشتن را متوقف کند، و در سال ۱۹۳۴ به عضویت انجمن سلطنتی هوانوردی[2] در آمد. از سال ۱۹۳۷ مجدداً کار نوشتن را از سر گرفت، و وقتی هم که با فروش امتیاز داستان شهر ویران[3] برای فیلم سینمایی از نظر مالی تأمین کافی یافت تمام دیگر کارهای خود را رها کرده و با نام نویل شوت به کار نویسندگی رو آورد. در حال حاضر وی به عنوان نویسندهٔ مشهوری شناخته شده است و کتاب‌های معروف وی عبارتند از کتاب در ساحل[4] که داستان حادثهٔ انفجار یك نیروگاه اتمی است و در اواسط دههٔ ۱۹۵۰ نوشته شده است، و کتاب شهری به نام آلیس[5] که آن را پس از سفری به استرالیا در اواخر دههٔ ۱۹۴۰ نوشت و، بیست سال بعد از مرگ نویسنده در سال ۱۹۶۰، در برنامهٔ تلویزیونی پرطرفدار شاهکارهای نمایش[6] مورد استفاده و توجه بسیار فوق‌العاده‌ای قرار گرفت.

یکی از داستان‌های نویل شوت که کم‌تر معروف است و به سال ۱۹۴۸ منتشر شده است به‌طرز شگفت‌انگیزی حکایت از پیش‌بینی موضوع

---

1 - Airspeed Ltd
2 - Royal Aeronautical Society
3 - *Ruined City*
4 - *On The Beach*
5 - *A Town Like Alice*
6 - *Masterpiece Theatre*

غفلت از مسألهٔ خستگی در هواپیماهای کامت دهاویلند دارد. این کتاب که نام آن *No Highway* است داستان دانشمند محققی می‌باشد که در بخش سازهٔ مؤسسه سلطنتی هواپیمایی در فارنبرو کار می‌کند. نام این محقق تئودور هانی است، وی بر اساس نتایج مطالعات خود در بارهٔ خستگی فلزات آلیاژی، پیش‌بینی می‌کند که هواپیمای مسافربری دور پرواز ماوراء اقیانوس که جدیداً ساخته شده و نام رینـدر بر آن گذاشته شده است دچار شکست سازه‌ای ناشی از خستگی خواهد شد. طرح هواپیما طوری بود که بال آن تحت اثر نیروی آیرودینامیکی نامطلوبی قرار می‌گرفت که طی آن تنش‌های تناوبی شدیدتری در فرکانس‌های بالا به‌وجود می‌آمد و در نتیجه مسائل خستگی بسیار زودتر از آنچه که در حالت عادی انتظار می‌رود پدیدار می‌شد. محاسبات هانی نشان می‌داد که این هواپیمای جدید پس از حدود هزار و چهار صد ساعت پرواز دچار گسیختگی ناشی از خستگی فلز خواهد شد، بنابراین وی تلاش می‌کند که توجه کارشناسان و اربابان صنعت هواپیمایی را به این خطر عظیم جلب کند. اما تکنوکرات‌ها محاسبات نظری وی را چندان مرتبط با وضعیت کاربردی هواپیماهای واقعی در عمل ندانستند، اگرچه که مسائل خستگی در تکنولوژی رو به پیشرفت دیگر صنایع حمل و نقل از قبیل راه‌آهن تا حدی خود را نشان داده بود. بنابراین هانی پس از سقوط یك هواپیمای رینـدر در کانادا، که مقدار ساعت پروازی آن حدود همان مقداری بود که وی پیش‌بینی کرده بود، اقدام به جمع‌آوری شواهد و مدارك کرد. سقوط هواپیمای مذکور صرفاً به اشتباه خلبان نسبت داده شده بود، و لذا هیچ بررسی جدی و جامع بر روی لاشهٔ هواپیما انجام نگردید تا شاید بتوان شواهدی خلاف آن به‌دست آورد. هانی شخصاً به کانادا پرواز کرد تا شواهد و مدارکی در بارهٔ شکست خستگی، که وی مطمئن بود در میان قطعات مدفون در برف هواپیما وجود دارد، پیدا کند.

هانی در میان راه در می‌یابد هواپیمایی که با آن پرواز می‌کند هواپیمایی از نوع ریندر با حدود هزار و چهار صد ساعت پرواز است، سراپای وجودش را ترس فرا می‌گیرد و هر لحظه نگران سقوط هواپیما بر اثر خستگی فلز است. در اولین فرودگاهی که هواپیما برای سوخت‌گیری فرود می‌آید هانی تلاش می‌کند تا خدمهٔ هواپیما را متقاعد کند که هواپیما را تا انجام بازرسی دقیق به‌منظور اطمینان از عدم وجود ترک‌های خستگی بزرگ در فرودگاه نگهدارند، اصرار هانی به جایی نمی‌رسد و در پی آن وی با خرابکاری قسمت چرخ فرود هواپیما از پرواز ریندر جلوگیری می‌کند. این اقدام خشونت‌بار هانی سبب می‌شود که مقامات بالاتر وی را برای ادامهٔ کارش کمک کنند. بالاخره پس از بازرسی دقیق لاشهٔ هواپیما ادعای هانی ثابت می‌شود، و در هواپیمایی نیز که در فرودگاه متوقف شده بود ترک خستگی خطرناکی یافت می‌شود.

داستان، ظاهراً بعید نویل شوت به‌طور وهم‌انگیز و عجیبی شبیه چیزی است که بعدها بر سر کامت دهاویلند آمد. درست مثل این است که شوت سناریوی ماهرانه‌ای بر اساس قانون مورفی ساخته و آن را تا اخذ نتیجهٔ مورد نظر دنبال کرده باشد. با توجه به اینکه آلیاژهای جدید در رابطه با توسعهٔ ترک خستگی دارای رفتاری جدید و عموماً ناشناخته هستند، و با توجه به اینکه طراحان هواپیماهای جت مسافربری طبیعتاً خواهان استفاده از آلیاژهایی جدید با وزن کم‌تر و مقاومت بیش‌تر هستند تا هواپیمای طرح‌شده سریع‌تر و راحت‌تر و بی‌صداتر پرواز کرده و اقتصادی‌تر نیز باشد، بنابراین در چنین شرایطی امکان ایجاد هرگونه حادثهٔ غیرمترقبه برای این سازه‌های بدیع دور از انتظار نخواهد بود.

نویل‌شوت در یادداشت مقدمهٔ کتاب *No Highway* چنین نوشته است:

این کتاب اثری تخیلی است. هیچ کدام از شخصیت‌های داستان از اشخاص واقعی اقتباس نشده است. هواپیمای ریندر در این داستان بر اساس هیچ هواپیمای مسافربری خاصی ساخته و پرداخته نشده است، و مشکلات حوادث مربوط به آن نیز از هیچ رویداد و مورد واقعی بر گرفته نشده است. . . .

. . . بازرسی بسیار دقیق حوادث راهی است به‌سوی ایمن‌تر کردن مسائل هوانوردی، و این امر مستلزم بهره‌گیری از همکاری افرادی با تخصص بسیار بالا می‌باشد. اگر این داستان توانسته باشد این موضوع را ملموس‌تر کرده باشد انگیزهٔ من از نگارش کتاب برآورده شده است.

هیچ گریزی نیست از اینکه افراد تصور کنند که اصرار زیاد شوت در تکرار این مطلب که هرگونه شباهتی در شخصیت‌های داستان با افراد واقعی تصادفی است صرفاً دروغی مصلحت‌آمیز بوده باشد، و انسان متحیر می‌ماند از اینکه شوت چقدر اعتقاد داشته که تکامل هواپیمایی که مستعد خستگی بوده است امری نسبتاً اجتناب‌ناپذیر است. به‌هرحال بایستی در نظر داشت که وی نه تنها به‌عنوان طراح هواپیما که با محدودیت‌های طراحی و آنالیز سازه‌ای آشنا بوده کار می‌کرده است، بلکه به‌عنوان یك داستان‌نویس نیز کار می‌کرده است و از کمال مطلوب و جاودانهٔ انسان طراح و تحلیل‌گر آگاه بوده است.

کتاب *No Highway* وقتی منتشر شد که فقط یك سال از اتمام طرح کلی کامت می‌گذشت. شوت مدتی دوست نزدیك سرآلفرد پاگسلی[1] ، رئیس بخش سازهٔ فارنبرو، بود که در اوائل دههٔ ۱۹۴۰

---

1 - Alfred Pugsley

مرکزی پیشگام در انجام کارهایی در بارهٔ خستگی فلزات در هواپیماهای نظامی بود، بنابراین نویسندهٔ کتاب در موقعیتی قرار داشت که می‌توانست کاملاً از جزئیات فنی مطالبی که نوشته است آگاهی یابد. اگرچه که شاید وی نسبت به شکست طرح کامت اطمینان قطعی نداشته بوده است، ولی به‌خوبی تشخیص داده بود که امکان بسیاری وجود دارد که اگر کامت هم نباشد دیگر هواپیماهایی از قبیل کاپید یا دونر یا بلیتزن یا هر نوع هواپیمای دیگری دچار مشکل خستگی شوند که صنعت گردن‌فراز و بیش از حد به‌خود مطمئن هواپیمایی از آن غفلت کرده بود.

ارادهٔ مصمم تئودور هانی در مردود شمردن عقیدهٔ متعارفی که در بارهٔ علت حوادث ریندر وجود داشت، و محققین فارنبرو که یك کامت را درون مخزن آب قرار دادند، نشانگر آن هستند که یافتن دلایل واقعی شکست همان‌قدر که می‌بایستی به مفاهیم اصلی طراحی متکی باشد مستلزم اندیشه و تفکر تحلیل‌گر والایی نیز می‌باشد. و پذیرش عامه در بارهٔ دلایل معقول ولی غیرمسلم شکست سازه‌ای نیز می‌تواند همانند اعتقاد گروهی ولی بی‌اساس یك تیم طراحی مبتنی بر اینکه تمامی احتمالات ممکن شکست را پیش‌بینی کرده‌اند باعث ایجاد حوادث مشابه گردد.

استیون بارلی[1] ، که گزارش مستند وی در بارهٔ حوادث هواپیمایی تجاری تحت عنوان ردیابی حوادث هوایی[2] در انگلستان منتشر شده است، تأکید دارد حتی وقتی که علت یك حادثهٔ هواپیمایی کاملاً روشن می‌نماید، گزارش نهایی حادثه فقط به‌صورت " علت احتمالی " ارائه می‌گردد، زیرا هیچ معلوم نیست که در آینده چه حادثه یا اطلاع یا پیشرفت تکنولوژیکی احتمالاً بتواند علتی ماوراء علت مفروض قبلی

---

1 - Stephen Barlay
2 - *Aircrash Detective*

مطرح کند. وی به داستان ایکاروس[1] که بال‌های پرواز وی " اولین شکست سازه‌ای در هوانوردی " است اشاره می‌کند و خاطرنشان می‌سازد که دانش جدید در بارهٔ خواص مصالح و شکست سازه‌ای می‌تواند تبیین جدیدی از حادثه‌ای که در این افسانه اتفاق افتاده است به‌دست دهد. وی با بی‌اعتنایی کامل به نظرات طرفداران آثار کلاسیك، این داستان را به‌طرزی بیان می‌کند که آن را می‌توان افسانهٔ تکنولوژی دوران مدرن نام نهاد. همان‌طور که افسانه‌های سنتی یونان و روم تعقل خود را در هاله‌ای از مبالغه فرو برده است، این پرواز قهرمانانه و خیال‌پردازی مستند درس آموزنده‌ای برای مهندسانی که بیش‌تر به نتیجه‌گیری‌ها علاقمند هستند دارد. و اگر افسانه‌هایی مثل داستان ایکاروس بعد از هزار سال بازگویی و بازنگری در ادبیات حفظ شده‌اند، بایستی باز هم بتوانند حالت اساطیری خود را پس از عبور از زیر تیغ آنالیزی مهندسی حفظ کنند.

بارلی دو سؤال را که به اعتقاد وی قرن‌ها به‌صورت معما مانده است مطرح می‌کند. اول اینکه علت واقعی شکست بال‌های ایکاروس چه بوده است؟ و سؤال دوم، آیا هیچ توضیح منطقی وجود دارد که چرا دو دریا و جزیره‌ای که چهل کیلومتر از هم فاصله دارند هر دو ایکاروس نامیده شده‌اند؟ با توجه به عدم وجود قطعات لاشهٔ بال‌های ایکاروس، بارلی به بررسی گزارشات و شواهد قدیمی و استفاده از اطلاعات ادارهٔ هواشناسی در براکنل[2] و بخش حوادث مؤسسه سلطنتی هواپیمایی در فارنبرو می‌پردازد.

ددالوس[3] برای رهایی خود و پسرش ایکاروس از محلی که در آن جا گرفتار شده بودند اقدام به طراحی و ساخت بال‌هایی می‌کند تا با

---

1 - Icarus
2 - Bracknell
3 - Daedalus

بستن آن‌ها به خودشان بتوانند پرواز کنند. ددالوس به‌عنوان مهندس طراح از محدودیت‌های سازهٔ خودش آگاهی داشت، این بال‌ها برای رساندن آن‌ها به آزادی کفایت می‌کردند اما بال‌ها برای کاری بیش از این طراحی نشده بودند و توانایی تحمل بعضی شرایط خاص، حساب‌نشده را نداشتند. ددالوس مخصوصاً به ایکاروس سفارش کرد که اگر هنگام پرواز زیاد به خورشید نزدیك شود چسبی که پرها را به بدنهٔ بال متصل کرده است بر اثر حرارت آب خواهد شد، و اگر هم زیاد به سطح دریا نزدیك شود رطوبت آب بال‌ها را کار خواهد انداخت. اوید[1] اخطارهای احتیاطی ددالوس را چنین بیان کرده است:

پسرم، ایکاروس ! مواظب باش ،
در میان آسمان پرواز کن : نه در بالا، نه در پایین ؛
در پایین ترشح آب دریا پرها را از کار خواهد انداخت ؛
و در بالا ، اشعهٔ سوزان آفتاب بال‌هایت را سست خواهد کرد.

ایکاروس که جوان جسور و نترسی بوده است، پس از پرواز خیلی زود هشدارهای پدر را فراموش می‌کند و، مطابق آنچه که تا کنون همه بر این باور بوده‌اند، بالاتر و بالاتر به‌سوی خورشید پرواز می‌کند تا آن‌گاه که اشعهٔ کشندهٔ آفتاب لذت پرواز را به کام او تلخ می‌کند. طبق توجیه متعارف و سنتی این افسانه، حرارت خورشید باعث ذوب شدن بال‌های ایکاروس شده و وی به درون دریایی که نام او را به خود گرفته است سقوط می‌کند. مطابق نظریهٔ بارلی، که همکارانش پرهایی را از آسمان رها کردند تا نحوهٔ پایین افتادن آن‌ها را از بال‌های آن پسرك حادثه‌جو بررسی کنند و بر اساس اطلاعات مربوط به وزش باد محل

---

۱ - Ovid ، (؟ ۱۷م-٤۳قم)، شاعر رومی

احتمالی افتادن قطعات را تعیین کنند، توضیح منطقی جدا بودن آن دو جزیره و دریای هم‌نام فقط وقتی میسر است که ایکاروس در ارتفاعی حدود سه هزار فوت از سطح دریا پرواز کرده باشد. این حد ارتفاع قابل قبولی برای پرواز هوانوردی است که به روایت اوید از دیدگاه ماهی‌گیران دریا پرواز ایکاروس در نزدیکی خدایان بوده است و نه در ارتفاعی که بیش‌تر پرندگان پرواز می‌کنند. لیکن بارلی تأکید می‌کند که در چنان ارتفاعی هوا به‌جای گرم بودن نسبتاً سرد است، و به‌جای اینکه گرما باعث ذوب شدن چسب اتصال پرها شده باشد سردی هوا باعث شکنندگی آن و در نتیجه شکسته شدن ناگهانی بال، همانند شکست فلز کامت یا دی‌سی‌ـ ۱۰ شده است. این نظریه در واقع بیان علت احتمالی جدیدی برای شکست سازهٔ ددالوس است، ضمن آنکه از افسانهٔ اساطیری قدیم صورتی ملموس‌تر و زمینی‌تر ارائه می‌دهد. اکنون تمام آن کسانی که به افسانهٔ ایکاروس به دلیل غیرممکن بودن پرواز تا نزدیك خورشید با دیدهٔ شك نگاه می‌کردند می‌توانند آن را باور کنند.

آنالیز مستدل شکست‌ها، چه از نوع واقعی یا تخیلی یا افسانه‌ای، دارای ارزش فوق‌العاده‌ای برای مهندسان است، زیرا این کار مهندسان است که بدانند هر سازه‌ای چگونه ممکن است دچار شکست شود، همان‌طور که بازیکن شطرنج بایستی بداند که یك حرکت اشتباه چگونه ممکن است منجر به مات شدن شود. شکست‌های مهندسی آزمایشاتی اتفاقی هستند که در تجربهٔ مهندسان سهیم هستند، همانند اشتباهات فاحش استادان شطرنج که برای بازیکنان شطرنج بسیار آموزنده است.

اما طراحی مهندسی بسیار پیچیده‌تر از بازی شطرنج است، اگرچه که حتی امکان پیش‌بینی واکنش طبیعت نسبت به حرکات ما بیش‌تر از پیش‌بینی واکنش یك حریف قدر در مقابل مدافع قهرمانی شطرنج جهان باشد. آنچه که بازی طراحی را پیچیده می‌کند از آنجا ناشی می‌شود که

مهندس نمی‌تواند همواره نتایج هر حرکت طراحی را که انجام می‌دهد به‌درستی شناسایی کند. بنابراین، هر چقدر هم که وی بتواند استراتژی طبیعت را به‌خوبی ارزیابی کند، ممکن است که نتواند واکنش آن را به‌درستی پیش بینی کند زیرا نمی‌تواند به حرکات خود از دیدگاه آن سوی صفحه بنگرد. بدین سبب است که هیچ مهندسی پیش‌بینی وجود ترك در سازهٔ تازه ساخته‌شدهٔ الکساندر کیلند را نمی‌کرد، که نیروهای طبیعت نمی‌تواند از آن در گذرد، بدین سبب است که هیچ مهندسی فکر نمی‌کرد هواپیمای کامت مستعد خستگی باشد، که فلز آن تا سرحد انهدام دچار ترك شود، بدین سبب است که هیچ مهندسی پیش‌بینی نمی‌کرد بال هواپیمای دی‌سی- ۱۰ بر اثر اشتباه تعمیراتی دچار اشکال شود، که سازهٔ آن نتواند به‌طور مطلوب کارآیی خود را حفظ کند، بدین سبب است که هیچ مهندسی فکر نمی‌کرد راهروهای هتل هایت ریجنسی طوری طراحی شده باشد که اتصالات آن به‌سختی تحمل نگهداری خودش را داشته باشد.

هرگاه مشخص شود که می‌شده است یك شکست سازه‌ای را قبلاً پیش‌بینی کرده و از آن جلوگیری کرد بر شدت مصیبت حادثه افزوده می‌شود. لیکن پیش‌بینی همهٔ راه‌های محتمل شکست هر سازه به‌سادگی یافتن کلیه ترکیب‌های ممکن برای پاسخ یك حرکت شطرنج نیست. طراحان الکساندر کیلند با هوشیاری احتمال از دست رفتن یکی از پنج پایهٔ سکو را در نظر گرفته بودند، ولی نتوانسته بودند دقیقاً پیش‌بینی کنند که عواقب آن چه می‌توانسته باشد. بنابراین آن‌ها تصور می‌کردند که انهدام سریع سکو در آن وضعیت را به‌درستی پیش‌بینی کرده‌اند. و اگر کسی حدس زده بود که شاید ترك بزرگی هنگام جوش کردن هیدروفون به پایهٔ سکو به‌وجود آمده باشد، حتماً مهندسان پاسخ داده بودند که اگر چنین ترکی وجود داشته باشد قطعاً توجه بازرسان را جلب

خواهد کرد و آن‌ها گزارش خواهند داد. و اگر کسی از بازرسان پرسیده باشد آیا آن‌ها چنین ترکی را گزارش می‌کرده‌اند، حتماً جواب می‌داده‌اند که " البته ! " . و اگر کسی عنوان می‌کرده است که ممکن است بازرسان ترکی به بزرگی هفت سانتیمتر را گزارش نکنند، حتماً مهندسان جواب می‌داده‌اند که " بس کنید ! این داستان‌ها را کنار بگذارید. اگر بخواهیم این‌قدر دنبال ' اما و اگرها ' باشیم باید اجرای پروژه را کنار بگذاریم. "

در مورد طراحان کامت نیز می‌توانسته چنین چیزی بوده باشد که یك سال قبل از اولین پرواز آزمایشی و چهار سال قبل از اولین پرواز رسمی و شش سال قبل از اولین سقوط آن احتمالاً داستان نویل شوت را خوانده بوده‌اند. اگر آن‌ها داستان را دقیق و جدی فرض گرفته بودند قاعدتاً به طرح خود رجوع می‌کردند و عمر خستگی هواپیما را کنترل می‌کردند. اما این موضوع را نمی‌توان به سقوط کامت ارتباط داد، زیرا مگر می‌توان طراحان را به دلیل عدم مطالعه یا عدم قیاس و بسط استعارات داستان شوت مقصر دانست؟ آن‌ها فکر می‌کردند که طراحی خستگی را به‌درستی انجام داده‌اند و دلیل نداشت که صرفاً به‌خاطر نوشته‌ای تخیلی که خلاف آن را تصور کرده است در اعتماد آن‌ها به طرح خود خللی ایجاد شود. ضمن آنکه، قهرمان داستان شوت عمر خستگی این هواپیمای خیالی را دقیقاً ۱۴۴۰ ساعت تعیین کرده بوده است که در چنین محاسباتی بسیار دقیق‌تر از آن است که بتوان آن را جدی گرفت.

آنالیز شکست نقش بازیکن خط حمله را دارد، در حالی که طراحی به کار مربیگری نزدیك‌تر است. اما مهندس طراح بایستی بهتر از هر مربی عمل کند، زیرا از او توقع دارند که در تك تك بازی‌ها برنده باشد. و این تکلیف بسیار دشواری است، آن هم در وضعیتی که غالباً فقط یك

اشتباه می‌تواند به معنی باخت و شکست باشد. وقتی هم که کسی یا تیمی مغلوب می‌شود، تنها چیزی که می‌توان به آن امیدی داشت آنالیز فیلم بازی و پند گرفتن از اشتباهات است به‌طوری‌که احتمال تکرار آن‌ها در دفعات بعدی کم‌تر شود.

۱۵

از خط‌کش محاسبه تا کامپیوتر

بیست و پنج سال پیش، خط کش محاسبه نماد بی‌چون و چرای مهندسی بود. دانشجویان مهندسی، که در آن زمان عمدتاً از پسرها بودند، خط کش محاسبهٔ خود را با جلدهای غلاف مانند از کمربند خود آویزان می‌کردند، و مهندسان با سابقه‌تر مدل‌های کوچک‌تری از خط کش محاسبه را همراه خود داشتند که در مواقع ضروری برای محاسبات به‌کار می‌بردند. من خودم وقتی که دانشجوی مهندسی شدم، یکی از مهم‌ترین کارهایی که در پیش داشتم تعیین مدل خط کش محاسبه‌ای بود که بایستی می‌خریدم. در سال ۱۹۵۹ بیست دلار پول زیادی بود، ضمن آنکه گفته می‌شد وسیله‌ای که می‌خواهم بخرم در تمام طول کار حرفه‌ای‌ام در آینده مورد استفاده قرار می‌گرفت، و به من توصیه می‌کردند که در شروع کار خط کش محاسبه‌ای مناسب که همهٔ امکانات مورد نیاز در آینده را داشته باشد خریداری کنم. پس از مقایسه‌های بسیار، مدل معروفی از کارخانه کوفل و اسر (کی ای)[1] خریدم، که تا

---

1 - Keuffel & Esser (K-E)

مدتی با ارزش‌ترین دارایی من بود. بسیاری از همکلاسی‌هایم نیز خط کش‌های محاسبهٔ کی ای را انتخاب کرده بودند، و میزان فروش این شرکت در دههٔ ۱۹۵۰ بیست هزار عدد در ماه بود.

برای انجام تکالیف درسی و امتحانات داشتن یك خط کش محاسبه ضروری بود، و همهٔ استادان ما فرض بر آن داشتند که هر دانشجوی مهندسی خط کش محاسبه دارد و طرز به‌کار بردن آن را هم می‌داند. اگر دانشجویی در دبیرستان با خط کش محاسبه آشنا نشده بود مجبور بود که در اسرع وقت کتابچهٔ راهنمای آن را مطالعه کند و کارکردن با آن را یاد بگیرد. آنچه که استادان مهندسی ما بر آن تأکید داشتند نه فقط توانایی کاری مدل‌های مختلف خط کش محاسبهٔ ما بود، بلکه بر محدودیت‌های عمومی و مشترك آن‌ها نیز تأکید داشتند. آن‌ها با ما از ارقام با معنی صحبت می‌کردند، زیرا که در آن زمان اغلب اداوت و وسایل مهندسی دارای صفحات مدرج و سنجش عقربه‌ای بودند و برای خواندن آن‌ها بایستی مقدار اندازه‌گیری‌شده را در بین کوچك‌ترین تقسیمات صفحه حدس زد، همان‌طور که هنگام اندازه‌گیری طول چیزی با خط کش بایستی مقدار دهم میلیمتر آن را حدس بزنیم. اندازه‌های روی خط کش محاسبه‌ها نیز همین محدودیت‌ها را داشتند، و ما بایستی توجه می‌کردیم که با این خط کش قادر هستیم فقط تا سه رقم با معنی را به‌طور دقیق به‌دست آوریم، مگر اینکه از قسمت منتهی‌الیه سمت چپ خط کش که تقسیمات ریزتری داشت استفاده بکنیم.

برای آشنایی و تسلط به چنین مواردی غالباً از طریق تمرین و سعی و خطا عمل می‌کردیم. اگر پاسخ به سؤال امتحانی مستلزم ضرب کردن مثلاً ۰/۳۴۶ در ۰/۱۶۸۹۲ بود و ما جواب آن را ۰/۰۵۸۴۴۶۳۲ می‌نوشتیم از لحاظ ارقام با معنی برای ما غلط می‌گرفتند، زیرا پاسخ این ضرب نمی‌توانست دقتی بیش از کم دقت‌ترین دو رقم اولیه داشته باشد.

(وقتی مهندسان قدیمی‌تر می‌نویسند ۳۴۶/۰ ، منظور این است که مقدار آن فقط تا سه رقم بعد از اعشار معلوم است، و در غیر این صورت به شکل ۳۴۶۰/۰ یا ۳۴۶۰۰/۰ یا تا هر محل اعشاری که عدد مشخص است نوشته می‌شد). با توجه به اینکه هیچ کس نمی‌تواند از روی خط کش محاسبه تعداد ارقامی تا حد ۵۸۴۴۶۳۲/۰ را بخواند، نزدیک‌ترین عددی که وی می‌تواند به آن برسد ۵۸۵/۰ می‌باشد. (از ارقام اضافی صرفاً به دیدهٔ ارفاق می‌شد گذشت که مثلاً دانشجو بدون استفاده از خط کش محاسبه و با انجام ضرب دستی روی کاغذ پاسخ را به‌دست آورده است، یا اینکه وی اهمیت ارقام با معنی را فراموش کرده بوده است). همچنین ما یاد می‌گرفتیم که چگونه مرتبهٔ اعداد پاسخ را بیابیم، زیرا خط کش محاسبه نمی‌توانست محل ممیز اعشار در حاصل‌ضرب ۳۴۶/۰ در ۱۶۸۹۲/۰ را مشخص کند، و ما این احساس ذهنی را در خود بایستی به‌وجود می‌آوردیم که پاسخ حاصل‌ضرب می‌باید حدود ۰۶/۰ باشد و نه مثلاً ۶/۰ یا ۰۰۶/۰. وجود چنین الزاماتی در نگرش و تشخیص‌های ما باعث می‌شد که دو چیز مهم در بارهٔ کارهای مهندسی کاملاً برای ما ملموس گردد: اول اینکه، پاسخ‌ها همواره به‌صورت تقریب‌هایی هستند که میزان دقت آن‌ها مطابق با میزان دقت اطلاعاتِ داده‌شده است، و دوم اینکه، مقادیر به‌دست‌آمده مرتبط با درک حسی مسأله است و صرفاً به‌صورت ارقامی مجرد به‌طور اتوماتیک از ماشین یا هر وسیلهٔ حسابگر بیرون نیامده است.

در همان دورانی که من دانشکدهٔ مهندسی را می‌گذراندم، در اوائل دههٔ ۱۹۶۰ صنعت الکترونیک در حال پیشرفت گسترده‌ای بود، به‌طوری که به‌تدریج تغییراتی را در تدریس و کار مهندسی ایجاب می‌کرد. اما به‌هرحال تا آن زمان شناخت وسیعی در بارهٔ عمق این تغییرات وجود نداشت، به‌طوری که حتی در سال ۱۹۶۷ که شرکت کوفل

و اسر مطالعات و بررسی‌هایی را در خصوص وضعیت کارهای آینده به عمل آورد پیش‌بینی گردید که در سال ۲۰۶۷ میلادی شهرهای گنبدی شکل و تلویزیون سه بعدی به‌وجود خواهد آمد ـ لیکن اصلاً پیش‌بینی نشده بود که خط کش محاسبه طی مدت پنج سال از دور خارج خواهد شد.

در سال ۱۹۶۸ مقاله‌ای با عنوان " خط کش محاسبهٔ رقمی الکترونیکی " در مجلهٔ الکترونیک انجینیر[1] چاپ شد. طی این مقاله به جرأت پیش‌بینی شده بود که: " چنانچه ساخت تجاری این ماشین حساب دستی آغاز شود، خط کش محاسبه بزودی روانهٔ موزه خواهد شد " . نویسندگان مقاله که دو مهندس برق بودند مدلی را که با مدارهای یکپارچهٔ رقمی ساخته بودند معرفی کرده بودند. این مدل ِ نمونه‌ای شبیه یك صفحهٔ کنترل الکتریکی بوده و از نظر اندازه که ۴×۱۳×۱۸ سانتیمتر بود بسیار جالب توجه بود. این ماشین حساب برای هر ضرب چهار رقمی جوابی چهار رقمی می‌داد و عملیات تقسیم و جذر و توان و لگارتیم را نیز انجام می‌داد. اما این وسیله یك نقص داشت که مهندسان بر اساس آن اظهار نظر کردند که " چون این وسیله ممیز اعشاری ندارد، همانند خط کش محاسبه بایستی اعداد اعشاری آن حدس زده شود " . تا آنجا که موضوع هزینه و اقتصادی بودن وسیله بررسی شده بود در سال ۱۹۶۸ فقط یك مانع بزرگ وجود داشت که بر اساس گزارش این مقاله " فقط سیستم خواندن و نمایش ِ رقمی این وسیله مشکل دارد، زیرا در حال حاضر هیچ وسیلهٔ کوچك و کم قیمتی برای این کار وجود ندارد. ولی بدون کوچك‌ترین تردیدی این آخرین مانع نیز بزودی برطرف خواهد شد. "

---

1 - *Electronic Engineer*

آن‌ها کاملاً حق داشتند، بزودی پس از اندك سالی شرکت تکزاس اینسترومنتز با به‌کار بردن تراشهٔ الکترونیکی اولین ماشین حساب دستی و واقعاً جیبی و جمع و جور را عرضه کرد. تکزاس اینسترومنتز تولید ماشین حساب‌های جیبی را از سال ۱۹۷۲ شروع کرد، ولی در سال ۱۹۷۳ نیز هنوز بسیار گران بود و قیمت آن حدود ده برابر گران‌ترین نوع خط کش محاسبه بود. ولی بزودی در سال بعد مانع قیمت‌ها نیز پشت سر گذاشته شد، و شرکت کمودور[1] ماشین حساب مدل SR - 1400 خود را چنین تبلیغ می‌کرد: " ماشین حساب علمی واقعی، با ۳۷ عملیات ریاضی پیشرفته " که این ماشین حساب قادر بود کارهایی بیش از خط کش محاسبهٔ من انجام دهد. اگر تا ده رقم با معنی به آن داده می‌شد، می‌توانست روی آن عملیات انجام دهد.

در زمان این تحول بزرگ در ماشین حساب‌ها، من در دانشگاه تکزاس[2] در آستین[3] تدریس می‌کردم، و آنجا تعدادی دانشجوی مهندسی داشتیم که پدرانشان منتظر آن نمانده بودند تا قیمت ماشین حساب‌های جیبی پایین آمده و در حد قابل رقابت با خط کش محاسبه گردد. کادر آموزشی دانشگاه با این مشکل روبرو بود که دانشجویانی که خط کش محاسبهٔ الکترونیکی دارند در هنگام امتحانات مزیتی ناعادلانه نسبت به دانشجویانی که از خط کش محاسبهٔ سنتی استفاده می‌کنند دارند، زیرا این وسیلهٔ جدید الکترونیکی بسیار سریع‌تر عمل می‌کرد و همچنین می‌توانست عمل جمع و تفریق را نیز انجام دهد ـ کاری که خط کش محاسبه آن را فقط از طریق لگاریتم می‌توانست انجام دهد. عموم کادر آموزشی دانشگاه با همهٔ قابلیت‌ها و ویژگی‌های

---

1 - Commodore

2 - University of Texas

۳- Austin ، مرکز ایالت تکزاس

ماشین حساب‌ها که خرید آن هنوز از عهدهٔ آن‌ها خارج بود آشنا نبودند، و به‌نظر می‌رسید که اما و اگرها و بحث‌های بی‌پایانی در این مورد که آیا خط کش محاسبهٔ الکترونیکی معادل با خط کش محاسبهٔ معمولی است در پیش است. بالاخره با کاهش شدید قیمت‌ها این موضوع عمومیت یافت، به‌طوری که هر کسی که توانایی خرید خط کش محاسبه داشت قادر بود از عهدهٔ خرید ماشین حساب نیز بر آید. در سال ۱۹۷۶ شرکت کوفل و اسر ماشین حساب‌های ساخت تگزاس اینسترومنتز را بیش‌تر از خط کش محاسبه به فروش می‌رساند، و در این زمان فروش خط کش محاسبه فقط پنج درصد از فروش کل آن شرکت را تشکیل می‌داد، و بالاخره شرکت کی ای دستگاه‌هایی را که برای خراطی خط کش محاسبه‌های چوبی به کار می‌برد کنار گذاشت.

در اواسط دههٔ ۱۹۷۰ شرکت‌های سازندهٔ ماشین حساب سالی پنجاه میلیون از آن را تولید می‌کردند، و بزودی تقریباً هر کسی، از جمله مهندسان، برای خود ماشین حساب داشت. ولی تا آنجا که من می‌دانم هیچ مهندس قدیمی خط کش محاسبهٔ خود را به دور نیانداخت و یا آن را به موزه نسپرد. در نهایت خط کش محاسبه را در کشوی میز گذاشتند تا در مواقع اضطراری به کار گرفته شود. بر اساس تحقیقی که در اوایل دههٔ ۱۹۸۰ سازمان فیوچرز گروپ[1] انجام داد معلوم شد که بسیاری از مهندسانی که در رده‌های بالای مدیریت هستند همچنان خط کش محاسبهٔ خود را در دسترس دارند و هنوز هم از آن استفاده می‌کنند " چون که راحت‌تر هستند. " اما بدیهی است که جوان‌ترها عقیده‌ای درست مقابل آن را دارند. در سال ۱۹۸۱ از دانشجویان سال دوم مهندسی در کلاس درس پرسیدم چند نفر آن‌ها از خط کش محاسبه استفاده

---

1 - Future's Group

می‌کنند، و پاسخی را که انتظار داشتم شنیدم ـ هیچ کس. (تعدادی از آن‌ها خط کش محاسبه داشتند، شاید مثلاً به این دلیل که پدر مهندس آن‌ها هنگام ورود به دانشکدهٔ مهندسی برایشان خریده بوده است. شرکت کی ای در سال ۱۹۸۱ همچنان باقی‌ماندهٔ موجودی انبار خط کش محاسبهٔ خود را که به ۲۳۰۰ عدد می‌رسید به فروش می‌رساند که میزان فروش ماهانهٔ آن‌ها از دویست عدد تجاوز نمی‌کرد). اما از دانشجویان کلاس نپرسیدم چند نفر آن‌ها از ماشین حساب استفاده می‌کنند، چون مثل این بود که از آن‌ها بپرسم چند نفرشان از تلفن استفاده می‌کنند. و از آن‌ها نیز نپرسیدم که چند نفرشان با کامپیوتر کار کرده‌اند، زیرا از آن زمان استفاده از کامپیوتر با توجه به برنامهٔ آموزشی درس‌های مهندسی اجتناب ناپذیر بود. جریان پیشرفت کار به‌طور نمایان بیانگر آن است که نهایتاً دیگر هیچ مهندسی نه صاحب خط کش محاسبه خواهد بود و نه از آن استفاده خواهد کرد، و کسانی که به‌کار مهندسی می‌پردازند از هر ردهٔ سنی که باشند از کامپیوتر استفادهٔ ـ صحیح و ناصحیح ـ خواهند کرد.

اعضاء هیأت علمی دانشکده‌های مهندسی، تقریباً مثل همهٔ مردم، آن‌قدر از پیشرفت‌های جدید تکنولوژی الکترونیك در دههٔ ۱۹۷۰ مبهوت شده بودند که توجهی به مسائل مهم‌تر و عمیق‌تری از قیمت و سهولت کار و سرعت محاسبات نداشتند. اکثریت بسیار زیادی از اعضاء هیأت علمی در فکر این نبودند که آن همه ارقامی که بر روی صفحه به نمایش در می‌آید از کجا می‌آید و یا به کجا می‌رود؛ هنوز از خودشان سؤال نمی‌کردند که آیا ماهیت تقریبی بودن جواب‌های مهندسی همچنان برای این دانشجویان ملموس و شناخته‌شده خواهد ماند، و یا اینکه اگر ماشین حساب به‌طور اتوماتیك در تمام مراحل محاسبه اعشار را در نظر بگیرد آن‌گاه آیا دانشجویان احساس و درك مستقیم خود از اعشار را از دست نخواهند داد؟ اکنون، یك دهه پس از آنکه ماشین حساب جایگزین

خط کش محاسبه شده است، ما به فکر چنین سؤال‌هایی افتاده‌ایم، و البته که این سؤال‌ها نه در بارهٔ ماشین حساب بلکه در بارهٔ کامپیوتر شخصی است. و علت مطرح شدن چنین سؤال‌هایی در حال حاضر آن است که بر اثر بازی تقدیر، تلفیق و تحلیل ماشین حساب در کامپیوتر در زمانی صورت می‌گیرد که نسل‌های جدیدتر مهندسان در حال اتمام درس و پرداختن به کار می‌باشند، و عواقب و آثار نامطلوب آن در حال نمایان شدن است. تعدادی از شکست‌های سازمای اخیر به استفاده از کامپیوتر یا استفادهٔ ناصحیح از آن، چه به‌وسیلهٔ فارغ‌التحصیلان جدید و چه قدیمی‌ترها، نسبت داده شده است، ونگرانی عمیقی وجود دارد که استفادهٔ وسیع و روزافزون از کامپیوتر با توجه به قدرت فزایندهٔ آن منجر به شکست‌های بیش‌تری نیز گردد.

کامپیوتر مهندسان را قادر می‌سازد محاسبات بیش‌تری را با سرعتی بیش‌تر از خط کش محاسبه یا ماشین حساب انجام دهند، بنابراین به کمك کامپیوتر می‌توان به‌سوی مسائلی در آنالیز سازه‌ها خیز برداشت که هیچ گاه در دورهٔ پیش از کامپیوتر پرداختن به آن‌ها امکان‌پذیر نبوده است. به‌عنوان مثال، اگر بخواهیم سازهٔ بغرنجی را که از قسمت‌های متعددی تشکیل شده است طراحی کنیم، ابتدا بایستی به روش‌های منطقی اندازه‌های اعضاء مختلف آن را حدس بزنیم و سپس بر این اساس تنش‌های آن‌ها را محاسبه کنیم. اگر این تنش‌ها بالا باشند بایستی متناسباً آن قسمت‌ها تقویت شوند، و اگر در بعضی قسمت‌ها تنش‌های محاسبه‌شده پایین باشند آن قسمت‌ها بایستی ضعیف‌تر شوند تا از نظر وزن و هزینه صرفه‌جویی گردد. به‌هرحال، هر تغییری در هر کدام از اجزاء سازه در تنش‌های قسمت‌های دیگر تأثیر می‌گذارد، و در نتیجه بایستی انجام آنالیز تنش کلاً تکرار شود. واضح است که در دورانی که محاسبات به‌طور دستی با خط کش محاسبه یا ماشین حساب انجام می‌گردید، چنین فرآیند

تکرارشونده‌ای به‌دلیل نیازمندی آن به صرف وقت بسیار زیاد عملاً ممکن نبوده و به‌صورت محدود انجام می‌شده است، و به‌همین دلیل طراحی سازه‌ها از ابتدا به‌صورت دست‌بالا صورت می‌گرفت و بر همان اساس نیز ساخته می‌شد. علاوه بر این، مهندسان از طراحی و ساخت سازه‌های فوق‌العاده بغرنج و مشکل پرهیز می‌کردند زیرا تعیین ابعاد اولیهٔ اعضاء بسیار مشکل بوده و محاسبات مورد نیاز بعدی برای حصول اطمینان از ایمنی سازه منطقاً و عملاً قابل انجام نبود. به‌همین خاطر عموم مهندسان به طراحی سازه‌هایی می‌پرداختند که از همان ابتدای شروع مراحل طراحی برای آن‌ها شناخته‌شده و ملموس باشد.

امروزه کامپیوتر نه تنها می‌تواند میلیون‌ها محاسبات ساده و تکراری را در طی مدت معقول انجام دهد، بلکه سازه‌هایی را نیز که از نظر مهندسان دوران خط کش محاسبه بغرنج محسوب می‌شدند آنالیز کند. از کامپیوتر می‌توان برای آنالیز چنین سازه‌هایی با کمك برنامه‌های نرم‌افزاری خاصی که به ادعای تهیه کننده‌های آن‌ها کاملاً کارآمد می‌باشند استفاده کرد، و کامپیوتر را چنان می‌توان برنامه‌ریزی کرد که اندازهٔ اجزاء مختلف سازه را طوری محاسبه کند که حداقل وزن را داشته باشند و در نتیجه تنش‌های موجود در همهٔ اجزاء برابر حدود تنش ماکزیمم مجاز باشد. این کار را بهینه‌سازی می‌نامند. اما اگر در تبدیل سیستم سازه‌ای مورد نظر طراح به مدل عددی، برای آنالیز کردن به کمك کامپیوتر که فاقد شعور و قوهٔ تفکر است، در موردی ساده‌سازی زیادی صورت گرفته باشد یا اشتباه خاصی شده باشد، آن‌گاه ممکن است نتایج آنالیز کامپیوتری چندان ارتباط و شباهتی با واقعیت نداشته باشد. و چون در چنین شرایطی مهندس طراح معمولاً احساس ملموسی از سازه‌ای که طرح می‌کند ندارد، وی کم‌تر می‌تواند نسبت به اعداد و ارقامی که کامپیوتر برای طراحی به‌دست می‌دهد به دیدهٔ شك و قضاوت نگاه بکند.

در مراکز طراحی گاهی مقام این مغز الکترونیکی از ردهٔ یك حسابگر یا کارمند دفتری به مقامی حتی بیش از کمك مهندس نیز ارتقاء یافته است. انجام طراحی به کمك کامپیوتر (که با حروف مخفف نیشدار و غریب CAD معروف شده است)[1] با جار و جنجال بسیار توسط سازندگان کامپیوتر و مهندس - دانشمندان کامپیوتر به‌عنوان راه آینده معرفی می‌شود. اما تاکنون هر جا که کامپیوتر به‌عنوان کامپیوتر مهندس و ابرمغزی در نظر گرفته شده است که قادر است به حل مشکلاتی بپردازد که قبلاً برای محاسبات قلم و کاغذی انسان، مهندس بسیار پیچیده و بغرنج بوده، به همان میزان نیز به‌عنوان عاملی برای طراحی غیرایمن در آمده است. رویای قدرت کامپیوتر برای رویارویی با مسائل و مشکلات بغرنج باعث اتکاء و وابستگی روزافزون به کامپیوتر برای حل مسائلی است که مهندسان، بر اساس درك و تشخیص واقع بینانه از محدودیت‌های خود، از آن‌ها اجتناب می‌کردند، و این شعور همان چیزی است که کامپیوتر فاقد آن است.

آنچه که معمولاً هنگام استفاده از کامپیوتر از نظر دور می‌ماند این واقعیت است که هنوز هم هدف اصلی طراحی جلوگیری از شکست می‌باشد، و بنابراین تعیین دقیق چگونگی احتمال شکست سازه از اهمیت بسزایی برخوردار است. کامپیوتر نمی‌تواند این کار را انجام دهد، گرچه

---

۱ - Computer Aided Design برنامهٔ نرم‌افزار کامپیوتری برای نقشه‌کشی و طراحی می‌باشد. cad به معنی وردست و پادو است. البته بایستی یادآور شد که برخی از چنین اختصارات بعمد اختیار می‌شود تا به استفاده‌کننده بطور دائم هشدار دهد. مثلا برنامهٔ آنالیز سازه‌ای SAP (Structural Analysis Program) که در سال ۱۹۷۰ منتشر شد، این جملهٔ توضیحی را بهمراه داشت: " نام عامیانهٔ SAP بدان جهت برای این برنامه اختیار شد که به استفاده‌کننده یادآوری کند که این برنامه، همانند همهٔ دیگر برنامه‌های کامپیوتری، فاقد هوش و ادراک است. این وظیفهٔ مهندس است که سازه را بطرز مطلوبی ساخته و پرداخته کند و مسؤولیت نتایج آن را به عهده بگیرد. " sap به معنی آدم سادطوح و کودن است. (م)

که کوشش می‌شود نوعی هوش مصنوعی در دستگاه ایجاد کنند تا تبدیل به یك " سیستم متخصص " بشود، و شاید روزی این رویا به واقعیت بپیوندد که نسخهٔ پیشرفته‌ای از CAD بتواند کامپیوتر را به آموختن از تجربیات وادارد که در فایلی به نام شکست‌ها در کامپیوتر ذخیره خواهد شد. به‌هرحال، تا زمانی که این رویا از اندیشه به عمل در آید، مهندسی که در طراحی از کامپیوتر استفاده می‌کند هنوز بایستی با چنین سؤال‌های سختی روبرو باشد: لوله‌ای از نیروگاه راکتور اتمی که جوشکاری آن معیوب است آیا در هنگام زلزله نخواهد شکست؟ بدنهٔ این اتومبیل هنگام برخورد به دیوار با سرعتی برابر بیست کیلو متر در ساعت به چه شکل مچاله خواهد شد؟ آیا احتمال دارد که یکی از ده‌ها هزار میلهٔ نگهدارندهٔ این سقف بر اثر برف سنگین دچار خرابی بشود و در نتیجهٔ آن نیز همهٔ سقف بر روی انبوه جمعیت حاضر در آن جا فرو ریزد؟

در بارهٔ مدل کامپیوتری می‌توان سؤال‌هایی نظیر این را مطرح کرد. اما اینکه عملاً نیز چنین سؤال‌هایی مطرح بشود یا نه بستگی به همان قضاوت انسانی دارد که سؤال در بارهٔ خستگی کامت‌ها را از نظر دور داشت و یا عواقب تغییرات طراحی در راهروهای هتل هایت ریجنسی را کنترل نکرد. حتی اگر هم کسی به چنین سؤال‌های مهم و تعیین کننده‌ای بیاندیشد و بتواند آن‌ها را به‌صورتی ارائه کند که کامپیوتر قادر به پاسخگویی به آن‌ها باشد، باز هم عامل تصمیم‌گیری انسانی در آن دخالت دارد که سؤالاتی که بدین ترتیب از کامپیوتر می‌شود تا چه حد کامل و شامل جزئیات باشد و در کجا خاتمه یابد. اگرچه کامپیوتر در مقام یك کارمند دفتری بسیار سریع کار می‌کند، اما اگر از آن خواسته شود که مسائل خاص مهندسی را آنالیز کند نمی‌تواند به همان سرعت کار کند. رفتار فلزات تحت اثر بارهایی که باعث تغییرشکل دائمی اعضاء سازه‌ای می‌گردند از مسائل مهم طراحی می‌باشد. قرار دادن یك میلهٔ

فولادی در دستگاه آزمایش کشش و کشیدن آن تا زمانی که مثل یك شکلات از هم پاره شود فقط چند ثانیه طول می‌کشد، درحالی‌که شبیه‌سازی چنین آزمایش فیزیکی ساده‌ای توسط قوی‌ترین کامپیوترها چندین ساعت طول می‌کشد.

در هر نیروگاه راکتور هسته‌ای کیلومترها لوله وجود دارد و برای تعیین اینکه در قطعه لوله‌ای به‌طول ده فوت میزان توسعهٔ یك ترك خاص از نظر عرض و طول آن بر اثر فشار خروج آب و بخار چگونه خواهد بود، حتی با سریع‌ترین کامپیوترها به یك روز تمام محاسبات بدون وقفه نیاز است. نتایج چنین محاسباتی از ارزش خاصی برخوردار است زیرا علاوه بر اینکه وسعت و اهمیت بروز نشتی را که ممکن است در لوله‌ای به‌وجود آید مشخص می‌سازد بلکه معلوم می‌کند که آیا این لوله تحت شرایط فرضی خاص (که توسط انسان مهندس تعیین شده است) احتمال دارد به‌طور کامل دچار شکستگی شود یا نه. از آنجا که بررسی همهٔ انواع ترك با هر اندازه و در هر محلِ قابل تصور در هر قطعه از لوله‌های موجود نیازمند سال‌ها محاسبات بدون وقفه و صرف میلیون‌ها دلار هزینه است، انسان مهندس همانند زمان‌های قدیم بایستی قضاوت کند که امکان ایجاد کدام حالت بیش‌تر است و نظر بدهد که بر اثر کدام وضعیت احتمال ایجاد شکست بیش‌تر است. کامپیوتر با افکار و نظرات کار نمی‌کند بلکه با اعداد کار می‌کند، و در هر لحظه هم فقط می‌تواند به حل یك مسأله بپردازد. لوله‌ای که کامپیوتر می‌تواند به آن بپردازد بایستی دارای قطر مشخص، ترك مشخص، مقاومت مشخص، و بار واردهٔ مشخص باشد. علاوه‌برآن، مدل کامپیوتری لولهٔ ترك‌خورده بایستی دارای نظریه و مبنای مشخص‌شده‌ای از لحاظ چگونگی توسعهٔ ترك تحت اثر وضعیتِ فرض‌شده باشد. تمام این مشخصات توسط موجود انسانی ساخته و پرداخته می‌شود، و بنابراین قطعی بودن نتایج حاصل از

کامپیوتر در مورد ایمنی سیستم بستگی کامل به آن دارد که سؤالاتی که از آن شده است تا چه اندازه شامل موارد مهم و بحرانی بوده باشد.

کامپیوتر هم محبوب است و هم مغضوب، زیرا از طرفی انجام محاسباتی را که از توانایی انسان خارج است امکان‌پذیر می‌سازد، و از طرف دیگر عملاً توقع آدمی برای ارزیابی آن محاسبات را ناممکن می‌سازد.

نیروگاه‌های هسته‌ای و دیگر سازه‌های بغرنج را نمی‌توان بدون کمك کامپیوتر و برنامه‌های کامپیوتری بغرنج طراحی کرد. در ابتدا نقش کامپیوتر بسیار مهم جلوه می‌نماید لیکن هرگاه اشتباهی در برنامه‌ای کامپیوتری که مدت‌ها برای طراحی و حصول ایمنی در نیروگاه‌ها به کار رفته است پیدا شود، که معمولاً پی بردن به چنین اشتباهاتی نیز کاملاً تصادفی است، آن‌گاه مشکلات و سردرگمی‌های عدیده‌ای پدیدار می‌شود. آنالیز کامپیوتری سیستم‌های لوله‌کشی بی‌شمار نیروگاه‌های هسته‌ای مستعد گرفتار شدن به اشتباهات عجیب و غریبی است، مثلاً یکی از برنامه‌های کامپیوتری که برای محاسبهٔ تنش لوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است برای عدد پی، یعنی نسبت محیط دایره به قطر آن، رقم اشتباهی را به‌کار می‌برده است، عددی که بسیاری از دانش‌آموزان دبیرستان تا چند رقم اعشار آن را حفظ هستند. یا اینکه چند سال پیش معلوم شد که در یکی از نرم‌افزارهای لوله‌کشی علامت یکی از فرمول‌های آن اشتباه داده شده است. و بدین ترتیب تنش‌هایی که بایستی جمع می‌شدند، توسط کامپیوتر از هم کم می‌شدند، و نتیجهٔ نهایی را که آنالیز کامپیوتری می‌داد برای حالت زلزله کم‌تراز مقدار واقعی بود. از این برنامهٔ کامپیوتری برای آنالیز زلزلهٔ چندین نیروگاه هسته‌ای استفاده شده بود، و کلیهٔ این نیروگاه‌ها مجبور شدند که ایمنی نیروگاه را به‌وسیلهٔ برنامه کامپیوتری اصلاح‌شده کنترل کنند. این کار چندین ماه

طول می‌کشید و کمیتهٔ مقررات هسته‌ای آن‌ها را تهدید کرد که اگر طی مدت معقولی نتوانند ایمنی نیروگاه‌ها را به اثبات برسانند نیروگاه‌ها را تعطیل خواهد کرد.

حتی اگر برنامهٔ کامپیوتری اشتباهی هم نداشته باشد ممکن است که به‌طور اشتباه مورد استفاده قرار بگیرد. سقف ده هزار متر مربعی مرکز اجتماعات هارتفورد[1] ، فقط چند ساعت پس از اتمام مسابقهٔ بسکتبال و خروج تماشاچیان از سالن، بر اثر سنگینی برف و یخ در ژانویه ۱۹۷۸ فرو ریخت. سقف سالن به‌صورت قاب فضایی بود، بدین ترتیب که میله‌های فلزی در الگوهای منظم مثلثی و مربعی به‌صورت سه بعدی به یکدیگر متصل شده بودند. طول اغلب میله‌ها نه متر بود که انتهای هر هشت تای آن‌ها در یك محل به همدیگر متصل شده بود. طراحی چنین سیستمی که طی آن بایستی اطمینان حاصل شود که تك تك میله‌ها توانایی تحمل نیروی وارد بر آن را دارند مستلزم محاسبات بسیار زیادی می‌باشد، به‌طوری که در زمان‌های قدیم مهندسان از طراحی و ساخت چنین سیستمی اجتناب می‌کردند، و یا در صورتی که ناچار به طراحی آن بودند آن را بسیار قوی‌تر طراحی می‌کردند به‌طوری که دارای ایمنی کاملاً دست‌بالایی باشد، و حتی این طراحی دست‌بالا در مواردی تا آن حد باعث افزایش وزن خود سازه می‌شد که ساختن آن را غیراقتصادی می‌کرد. با کامپیوتر عملاً می‌توان کلیهٔ حالات متصور را محاسبه کرد، و از آنجا که در مورد چنین میله‌هایی موضوع تغییرشکل دائمی[2] مطرح نیست تا همانند مسألهٔ لوله‌های ترك‌دار مستلزم صرف وقت بسیار زیاد باشد، مهندسان به نتایج و اعداد حاصل از آنالیز کامپیوتری چنین

---

1 - Hartford Civic Center
2 - permanent deformation

سیستمی اعتماد غیرقابل توجیهی پیدا می‌کنند. در حالی که اعداد حاصل در واقع بیانگر رفتار و حل مسألهٔ مدل قاب فضایی داده‌شده به کامپیوتر است و نه بیانگر رفتار سیستم واقعی در تحت اثر مثلاً بار و برف. خصوصاً آنکه مدل کامپیوتری کاملاً متأثر از مقدار وزن موجود روی سقف و یا نحوهٔ ساده‌سازی و مدل کردن اتصالات میله‌ها می‌باشد. نحوهٔ اتصالات به جزئیات طراحی مربوط می‌باشد که مدل کردن آن و دادن آن به کامپیوتر بسیار مشکل‌تر از دادن طول‌ها و مقاومت‌های میله‌ها می‌باشد، در حالی که همین جزئیات اتصال است که نیروهای بحرانی را به میله‌ها منتقل می‌سازد.

پس از فرو ریختن سقف مرکز اجتماعات هارتفورد، سازهٔ آن مجدداً آنالیز شد و مشخص گردید که علت اصلی خرابی سقف مهاربندی غلط میله‌های نه متری بالایی خرپای فضایی بوده است. این میله‌ها عموماً خم شده بودند و یکی از آن‌ها مشخصاً بر اثر نیروی برف و یخ کاملاً تا شده بود. هرگاه میله‌ای خم شود دیگر نمی‌تواند عملکردی را که بدان منظور طراحی شده است داشته باشد، و سهمی از بارهای سقف که به آن اختصاص داده شده بوده است به میله‌های کناری اضافه می‌شود. بدین ترتیب سقف این سالن زنجیروار با اضافه شدن نیروهای میله‌ها به میله‌های کناری یکجا و ناگهانی فرو ریخته بوده است. در این آنالیز، کامپیوتر دقیقاً پاسخ این سؤال را که حادثه چگونه اتفاق افتاده است ارائه کرد، زیرا که به‌طور روشن و دقیق سؤال صحیح از آن پرسیده شده بود و مدل متناسبی هم به آن داده شده بود تا بتواند پاسخ صحیح را ارائه کند. ظاهراً، طراحان سقف آن‌قدر به مدل ساده‌شدهٔ کامپیوتری خود اعتماد داشته‌اند (و فکر می‌کرده‌اند که سؤال‌های صحیح و لازم را مطرح کرده‌اند) که حتی وقتی هنگام نصب قطعات سقف کارگران راجع به افت نسبتاً زیادی که در میله‌ها مشاهده می‌شد سؤال کرده‌اند، آن‌ها را

متقاعد ساخته‌اند که این وضعیت و رفتار میله‌ها با آنچه که در نظر گرفته شده است منطبق می‌باشد.

با توجه به اینکه کامپیوتر توانایی انجام محاسبات بسیار زیاد را در کوتاه‌ترین مدت ممکن دارد، امروزه تمایل زیادی وجود دارد که با استفاده از آن سازه‌ها را طوری طراحی کنند که همهٔ اجزاء آن دارای حداقل وزن و مقاومت باشد، و در نتیجه اقتصادی‌ترین سازه‌ها ساخته شوند. انجام چنین بهینه‌سازی سازه‌ها در زمانی که محاسبات به‌صورت دستی انجام می‌شد امکان‌پذیر و مورد توقع نبود، وطراحان عموماً طرح‌هایی را ارائه می‌کردند که به اذعان خودشان تا حدی دست‌بالا بود و بدین ترتیب گرچه در سازه‌ها تا حدی افراط و اسراف وجود داشت لیکن این موضوع غالباً به ایمنی بیش‌تر سازه کمك می‌کرد. به‌هرحال، وقتی همهٔ اجزا، مطابق با آیین نامهٔ ساختمانی معتبر و ضرایب اطمینان مناسب، به‌صورت حدی با حداقل وزن و حداکثر تنش مجاز ممکن ساخته شوند، آن‌گاه قدرت مانور کمتری برای مقابله با خطاهایی از قبیل خطای محاسبات کامپیوتری و خطای تولید مصالح ِ به‌کار گرفته‌شده و خطای اجرایی وجود خواهد داشت. بدین ترتیب سازه‌هایی که با کامپیوتر بهینه‌سازی شده باشند طرح‌هایی مرزی با حداقل ایمنی مجاز خواهند بود.

مؤسسه تحقیقاتی انرژی الکتریکی[1] ، به‌منظور اخذ اطلاعات دقیق، طی برنامه‌ای اقدام به بررسی قابلیت‌های برنامهٔ نرم‌افزار مورد استفاده برای آنالیز کامپیوتری سازه در تعیین رفتار دکل‌های بزرگ انتقال برق نمود، که طراحی چنین دکل‌هایی دارای مسائلی مشابه با طراحی قاب سه بعدی سقف می‌باشد. نمونه‌ای از این دکل‌های عظیم‌الجثه در اندازهٔ واقعی در

---

1 - Electric Power Research Institute

کارگاه تحقیقات مکانیکی خطوط انتقال انرژی در هسلت[1] تکزاس ساخته شد. این سازهٔ واقعی را می‌توانستند تحت اثر بارگذاری‌های کاملاً مشخص و کنترل‌شده‌ای قرار داده و عکس‌العمل‌ها و نیروهای اعضاء مختلف آن را ثبت کنند. نتایج حاصل از چنین آزمایش‌های واقعی با نتایج حاصل از آنالیز کامپیوتری مقایسه شد، و مشخص گردید که برنامهٔ کامپیوتری عملکرد رضایت‌بخشی نداشته است. نتایج حاصل از آنالیز کامپیوتری سازه در نود و پنج درصد از مواقع در محدودهٔ شصت درصدی از مقادیر واقعی ـ اندازه‌گیری‌شده قرار داشت، درحالی‌که مهندسانی که چنین نرم‌افزارهایی را به‌کار می‌برند عموماً انتظار دارند که در نود و پنج درصد از مواقع نتایج کامپیوتری در محدودهٔ بیست درصدی از مقادیر واقعی قرار داشته باشند. واضح است دکلی که با چنین نرم‌افزار غیرقابل اعتمادی طراحی شده باشد می‌تواند سرنوشتی چون سقف سالن مرکز اجتماعات هارتفورد را داشته باشد. فقط ضرایب اطمینان اعمال‌شده در این دکل‌های انتقال برق بوده است که باعث جلوگیری از خراب شدن تعداد بی‌شماری از آن‌ها در سراسر کشور آمریکا شده است.

اگر چنین آزمایش‌های هشداردهنده‌ای انجام نمی‌شد، موفقیت و عدم خراب شدن دکل‌هایی که با این برنامهٔ کامپیوتری طراحی شده بودند می‌توانست سبب بروز بحث‌هایی در مورد الزام کاهش ضرایب اطمینان گردد. مقاومت محافظه‌کارانه در برابر موضوع کاهش ضریب اطمینان سازه‌هایی که سابقهٔ خرابی و شکست نداشته‌اند کار بسیار مشکلی است، و ـ حتی اگر چیز دیگری نتواند ـ معمولاً گذشت زمان این‌گونه حریفان ـ مخالف را کنار می‌زند. لیکن ضریب اطمینان کم‌تر نیز بدون تردید نهایتاً به شکست منجر خواهد شد، و ایجاد شکست نیز به نوبهٔ خود به این

---

1 - Haslet

نتیجه‌گیری منجر خواهد شد که آن برنامهٔ کامپیوتری، آنالیز سازه را به دقتی که مورد انتظار بوده است انجام نداده است. ولی این روند به مفهوم یادگرفتن چیزی از راه مشکل آن است.

بدین ترتیب، گرچه کامپیوتر را می‌توان تقریباً جزء لاینفك کارهای طراحی دانست، ولی عملاً خود نیز می‌تواند عاملی برای ایجاد اطمینان بیش از حد در انسان‌هایی گردد که آن را به‌کار می‌برند. هرگاه از کامپیوتر برای دست و پنجه نرم کردن با ارقام و انجام محاسبات طرح‌های بزرگی که چندان خاص و بدیع نباشند استفاده شود، احتمال اینکه کامپیوتر باعث گمراهی طراح با تجربه بشود اندك است، زیرا این طراح بر اساس تجربیات خود و دیگران به‌خوبی می‌داند که چه مسائلی را بایستی مطرح سازد. اما، هرگاه به‌منظور طراحی سازه‌هایی جدید و ابتکاری که سابقهٔ تجربی موفقیت‌آمیزی در بارهٔ آن‌ها وجود ندارد، به کامپیوتر متکی بشویم، موضوع شکست سازه را هم که کنار بگذاریم، احتمال اینکه کامپیوتر دچار اشتباه بشود کم‌تر از احتمال اشتباه انسان مهندس دوران خط کش محاسبه نخواهد بود. و هر چقدر که سازه‌های بغرنج و ابتکاری بیش‌تری به دلیل این باور عمومی طراحی شوند که کامپیوتر می‌تواند کارهایی انجام دهد که انسان قادر به انجام آن نیست، عملاً احتمال شکست سازه‌ها افزایش خواهد یافت، زیرا هر چه بیش‌تر از تجربه دور شویم احتمال کم‌تری وجود خواهد داشت که به فکر همهٔ سوأل‌های صحیح باشیم.

در حال حاضر این نگرانی فقط به کامپیوترهای بزرگ منحصر نمی‌باشد، بلکه به اعتقاد عده‌ای نگرانی و خطر اصلی در استفادهٔ روزافزون از میکرو کامپیوترها نهفته است. این دستگاه‌ها به‌همراه تعداد بی‌شماری نرم‌افزار به‌آسانی و به قیمت‌های نسبتاً مناسبی در دسترس هستند، و بدین لحاظ این نگرانی به‌وجود آمدهٔ است که مهندسان به کارهایی بپردازند

که عملاً در حاشیهٔ تخصص آن‌ها قرار دارد. و نداشتن تجربه در زمینه‌های مربوطه باعث می‌شود که این مهندسان امکان کم‌تری برای بررسی ملموس و نگرش نقادانهٔ طرح‌های تهیه‌شده به کمك کامپیوتر را داشته باشند، طرح‌هایی که اعداد و اطلاعات کامپیوتری آن نمی‌تواند باعث ایجاد احساس و ارتباط با مهندس طراحی گردد که با انجام محاسبات دستی متعدد به کمك خط کش محاسبه ارتباطی ملموس با سازه برقرار می‌کرده است.

جیمز ج. مك‌گرگور[1] رئیس کمیتهٔ آیین نامهٔ بتن کانادا[2] ، در سخنرانی افتتاحیهٔ دوازدهمین کنگرهٔ مجمع بین‌المللی مهندسی سازه و پل[3] که در سال ۱۹۸۴ در وانکوور[4] برگزار شد نگرانی خود را در خصوص نقش کامپیوترها در کار طراحی سازه ابراز کرد زیرا که معتقد بود " تغییرات آنچنان سریع اتفاق افتاده است که این حرفه هنوز فرصت ارزیابی و استنتاج مفاهیم و آثار این تغییرات را نیافته است. " و بحث خود را در رابطه با نحوهٔ تهیهٔ نرم‌افزارهایی که برای طراحی به کار برده می‌شوند چنین ادامه داد:

> چون برنامه‌های آنالیز سازه‌ای و جزئیات آن‌ها بسیار بغرنج است، مجموعهٔ کل این حرفه مجبور است از برنامه‌هایی استفاده کند که توسط عدهٔ اندکی نوشته شده است. و این عدهٔ اندك نیز از ردهٔ تحلیل‌گران سازه می‌باشند . . . و نه از ردهٔ طراحان سازه. در حالت کلی، تجربه و سابقهٔ آن‌ها در کار طراحی و کار اجرایی محدود

---

1 - James G. MacGregor

2 - Canadian Concrete Code Committee

3 - International Association for Bridge and Structural Eng - ineering

٤ - Vancouver ، بندری در کانادا

است. به‌سختی می‌توان اطمینان حاصل کرد که نتیجهٔ کار چنین فردی جلوهٔ تجربه و بصیرت طراح قابلی را داشته باشد. در دفاتر طراحی کاهش مدت محاسبات وقت آزاد بیش‌تری را برای مهندس فراهم می‌سازد که می‌تواند صرف تفکر خلاق یا صرف انجام کار بیش‌تر با خلاقیت کم‌تری نسبت به امروز گردد. چون آنالیز کامپیوتری در دسترس است طبیعتاً از آن استفاده خواهد شد. و چون جواب‌های آن بسیار دقیق است، تمایل به پذیرفتن دربست و بدون شرط آن زیاد است. افزایش انبوهی از کارهای عددی می‌تواند به‌تدریج جایگزین ارزیابی رفتار سازه‌ای طرح گردد. بنابراین استفاده از کامپیوتر در طراحی بایستی تحت نظارت کامل و دقیق طراحان با تجربه و آگاهی صورت بگیرد که قادر باشند سریعاً صحت جواب‌های حاصل و عملی بودن جزئیات طرح را ارزیابی کنند. تکاپویی که حرفهٔ طراحی و مربیان در آن افتاده‌اند بیش از هر زمان دیگری باعث تربیت طراحانی خواهد شد که قادر باشند کاملاً از عهده ارزیابی و یا اصلاح و یا رد کردن نتایج حاصل از طراحی آنالیز کامپیوتری برآیند.

انجمن مهندسان ساختمان آمریکا مسألهٔ " تخصص بسط یافته توسط کامپیوتر " را آن‌قدر با اهمیت دانست که آن را موضوع مسابقهٔ جایزه مید[1] برای بهترین مقاله در باب " آیا کامپیوتر می‌تواند پروانهٔ رسمی بگیرد؟ " قرارداد. عنوان مقاله اشاره به شرایطی دارد که بر اساس آن مهندسان قبل از مشغول شدن به کار طراحی سازه‌هایی که خرابی آن‌ها می‌تواند فاجعه‌بار باشد می‌بایستی پروانهٔ رسمی بگیرند. پروانهٔ مهندسی

---

1 - Mead Prize

حرفه‌ای فقط پس از گذراندن حداقل مدتی کار مهندسی در مسؤولیت‌های پایین و قبول شدن در امتحان جامع در زمینهٔ تخصصی مربوطه صادر می‌گردد. کامپیوتر، مهندس حرفه‌ای و غیر آن را قادر می‌سازد که از عهدهٔ طراحی هر چیزی، از ساختمان عادی تا سیستم زهکشی پیشرفته، برآید و این برای افراد غیرمتبحر کاملاً مسحورکننده می‌باشد. در اعلان جایزهٔ مید موضوع مطرح‌شده به‌صورت فشرده چنین بیان شده است:

> مهندسان ساختمان به‌دلیل سرعت و دقت و کارآیی زیاد کامپیوتر به آن رو آورده‌اند. اما، آیا مهندسان با این کار به استقبال خطر مصالحهٔ ایمنی و آسایش عامه نرفته‌اند؟ بسیاری پیش‌بینی می‌کنند که شکست‌های مهندسی در آینده ناشی از استفاده از کامپیوتر خواهد بود. آیا انجام کارهای طراحی در خارج از محدودهٔ تخصصی و تجربی هر طراح صرفاً به دلیل آنکه نرم‌افزار آن در دسترس وی است تسهیل نشده است؟ مهندسان ساختمان چگونه می‌توانند دقت برنامهٔ کامپیوتری را تضمین کنند و چه تضمینی وجود دارد که مهندس ِ استفاده‌کننده از این برنامه شایستگی استفادهٔ صحیح از آن را دارد؟

انجمن مهندسان ساختمان آمریکا با مطرح کردن چنین سؤال‌هایی در میان اعضاء وابستهٔ خود، که عموماً حداقل از نظر تجربی جوان محسوب می‌شوند و تنها افراد واجدالشرایط شرکت در مسابقه جایزهٔ مید هستند، توجه مهندسان حرفه‌ای آینده را به یکی از مهم‌ترین مراحل توسعه در تاریخچهٔ مهندسی سازه جلب کرد.

۱۶

خبرگان آشفتگی‌ها[۱]

نظم شدید نوعی بی‌نظمی است، و
بی‌نظمی زیاد نوعی نظم است. این دو
یکی هستند . . .
ـ والس استیونز

دلایل شکست‌ها، همانند درس‌های حاصل از آن‌ها، متعدد و مغشوش است. وقتی برنامه‌ای کامپیوتری یا سازه‌ای مهندسی خراب از کار در می‌آید، تحقیقاتی که آن چیز بدعاقبت را به زیر موشکافی‌های دقیق می‌برد معمولاً برخی دیگر موارد و خطاهای بی‌ضرر کوچك را نیز آشکار می‌سازد که اگر این حادثه اتفاق نمی‌افتاد شاید برای همیشه از نظرها پنهان می‌ماند. چنانچه طرح جزئیات میلهٔ آویز راهروهای هتل هایت تغییر پیدا نمی‌کرد، بدون تردید تا امروز استوار می‌ماند و احتمالاً تخطی آن از آیین نامه‌های ساختمانی مورد ظن واقع نمی‌شد. پس از انفجار دومین هواپیمای دهاویلند کامت، و در جستجوی علت حادثه، حدود پنجاه نقص جزئی کوچك و بزرگ کشف شد و اصلاحات لازم

---

۱ ـ عنوان این فصل اشاره دارد به پدیدهٔ آشفتگی (chaos) که با اندیشهٔ تعیین‌پذیر بودن جهان که شالودهٔ علم به حساب می‌آمده به مقابله برخاسته است. براساس مفهوم تعیین‌پذیری، با گردآوری اطلاعات کافی می‌توان وقایع آینده را پیش‌بینی کرد. اما بر اساس مفاهیم آشفتگی، پدیده‌های آشفته در عین آنکه دارای نظمی هستند، غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند. (م)

در طرح داده شد. به‌هرحال، جمیع نقایصی که در بررسی‌های حادثه آشکار می‌شوند، در سایهٔ یکی از آن‌ها که محتمل‌ترین علت حادثه بوده است قرار می‌گیرند. کارهای متعددی برای دسته‌بندی کردن این علت‌های اصلی شکست‌های سازه‌ای به عمل آمده است، ولی هیچ کدام از فهرست‌های تهیه‌شده توافقی در خصوص مقوله‌های مورد نظر ندارند.

کتاب توماس مك‌کیگ[1] به نام شکست‌های ساختمانی[2] که به سال ۱۹۶۲ چاپ شده است، شامل مجموعه‌ای از بررسی‌های موردی برای استفادهٔ مهندسان و آرشیتکت‌ها و پیمانکاران می‌باشد. گرچه مك‌کیگ به صراحت روی خطای انسانی انگشت می‌گذارد، لیکن وی اعتقاد دارد افرادی که درگیر شکست‌های ساختمانی هستند خود اولین قربانی حوادث بوده و نیازمند همدردی و دلسوزی می‌باشند. او در توضیح اینکه چرا حوادث اتفاق می‌افتند، به‌طور مجمل خاطر نشان می‌سازد که " معمولاً ساختمان‌ها به واسطهٔ سهل‌انگاری و بی‌دقتی یا طمع‌ورزی انسان‌ها دچار شکست می‌شوند. " سپس فهرستی از " علت‌های شکست " را به نقل از مجله‌ای ارائه می‌دهد که " مدت‌ها پیش دیده است و مرجع آن معلوم نیست . " ولی مك‌کیگ به وضوح بر این فهرست بی‌نام و نشان صحه می‌گذارد، و اعتقاد دارد که برای هر نوع ساختار مهندسی کاربرد دارد. علاوه بر این، به‌نظر مك‌کیگ " هر شکست یا مشکلی ـ اعم از کوچك یا بزرگ ـ که در ایـن رده‌بندی جای نگیرد، مشکل بتـوان آن را درك کرد. . . . " این رده‌بندی به‌صورت زیر می‌باشد:

۱ـ مسامحه

الف - به‌کار گماردن افراد بی‌کفایت در طراحی و ساخت و

---

1 - Thomas Mckaig
2 - *Building Failures*

نظارت.

ب - سرپرستی و نگهداری توسط کسانی که کیاست لازم را ندارند.

ج - عهده‌دار شدن مسؤولیت حساس توسط افرادی که خبرگی لازم را ندارند.

د - رقابت خارج از کنترل.

ه - کمبود تجربه.

و - کمبود اطلاعات مقدماتی مورد نیاز.

۲ـ هزینه

الف - هزینهٔ اولیه.

ب - هزینهٔ نگهداری.

۳ـ لغزش یا بی‌دقتی

الف - مهندس یا آرشیتکتی که، اگرچه آدمی دقیق و لایق باشد، دچار قصور در بعضی قسمت‌های خاص کار بشود.

ب - پیمانکار یا سرپرستی که، با علم به موضوع، به استقبال مخاطره برود.

ج - کمبود هماهنگی صحیح در تهیه طرح‌ها.

۴ـ حوادث غیرمترقبه - زلـزله و طوفان شـدید و آتش‌سوزی و امثال آن.

ضمن اینکه رده‌بندی آخر، با مستمسکی چون " و امثال آن "، بیش‌تر شبیه پاسخ " هیچ کدام از موارد بالا " در یك سؤال چند جوابی است، فهرست مورد تأیید ملك کیگ در واقع فهرستی تحمیلی است. هر حادثهٔ مشخصی را در هر کدام از این رده‌ها قرار دهیم باعث برانگیختن بحث‌های زیاد در قضاوت و عقاید و مفهوم الفاظ خواهد گردید، به

خصوص که وجه تمایز غریبی بین پیمانکاری که " به استقبال مخاطره برود " و مهندسی که " دچار قصور بشود " قائل شده است. در حقیقت، می‌توان گفت که مهندس طراح نیز ممکن است به استقبال مخاطره برود، مخصوصاً وقتی که نمونه‌ای را به‌منظور آشکار ساختن نقاط ضعف فرضیات طراحی می‌سازد. درعین‌حال می‌توان گفت که مشکل مك کیگ در درك هر شکستی که در یکی از این رده‌ها جای نگیرند به همان یگانه علت همهٔ حوادث مربوط می‌باشد. ادعای وی در بارهٔ کامل بودن این رده‌بندی علت‌های شکست، بی‌شباهت به ادعای ضمنی طراح نسبت به کامل بودن پیش‌بینی وی در مورد همهٔ راه‌های ممکن برای شکست سازه نمی‌باشد. و وقتی که طراح گمان می‌کند از همهٔ شکست‌های بالقوه‌ای که در لیست کامل وی موجود است جلوگیری کرده است، به اتمام کار طراحی خود و انجام معتبر و مسؤولانهٔ آن اطمینان پیدا می‌کند. لیکن طراح، همانند مك کیگ، به استقبال مخاطرهٔ فراست و آگاهی خود رفته است.

در مقدمهٔ کتابی که اخیراً در بارهٔ شکست مصالح در طراحی مکانیکی منتشر شده است، اذعان شده است که موضوع شکست در فرآیند طراحی مهندسی مفهومی محوری است:

> تشخیص امکان شکست و تعیین شکل‌های شکست مکانیکی که در دنیای واقعی مهندسی وجود دارد، کاری بسیار اساسی برای پیش‌بینی و جلوگیری کردن از شکست مکانیکی است که هدف اصلی هر طراح مکانیك می‌باشد. به همین سبب در همان اوایل کتاب شکل‌های شکست مکانیکی ارائه شده است. . . .

در این کتاب بیست و سه نوع اصلی از شکل های گوناگون شکست‌های مکانیکی به‌همراه بسیاریَ از انواع فرعی دسته‌بندی شده است،

و اظهار شده که این فهرست شامل کلیهٔ " انواع متعارف " است. در آگهی تبلیغاتی کتاب، که تیتر اغراق‌آمیز " چگونه طرح‌های مکانیکی خود را شکست‌ناپذیر سازید " را دارد، ادعا شده است که " تنها کتابی است که دارای فهرست جامعی از کلیهٔ شکل‌های شکست مکانیکی و مشخصات دقیق آن‌ها می‌باشد " . لیکن خواننده حیران می‌ماند که پس آن شکل‌های غیرمتعارفی که سبب شکست‌های غیرمنتظرهٔ مصالح و طرح‌های جدیدی که حتی با استفاده از این کتاب ساخته شده‌اند کدامند.

البته همهٔ کسانی هم که اقدام به تبیین شکست‌های سازه‌ای می‌کنند مدعی نیستند که قادر به تهیهٔ فهرست کاملی از علت‌ها باشند. بلاکلی[1] که در کتاب مشهور خود به نام ماهیت طراحی و ایمنی سازه‌ها[2] از زوایای گوناگونی چون جنبه‌های فلسفی و تاریخی و تحلیلی به این موضوع پرداخته است، ادعایی در باره کامل بودن فهرست رده‌بندی خود که در زیر آمده است ندارد:

برخی از علت‌های شکست سازه‌ای

حالت‌های حدی

بارگذاری اضافی : ژئوفیزیکی، مرده، باد، زلزله، غیره؛ ناشی از انسان، عوامل جوی ، غیره

مقاومت کم : سازه، ناپایداری مصالح

جابه‌جایی : نشست تکیه‌گاه، خزش، جمع شدگی، غیره

زوال : ترك، خستگی، خوردگی، فرسایش، غیره

خطرات اتفاقی

آتش

---

1 - D.I. Blockley

2 - *The Nature of Structural Design and Safety*

سیل
انفجار : غیرعمدی ، عمدی
زلزله
تصادف وسیله نقلیه

خطاهای انسانی

خطای طراحی : اشتباه، عدم درك صحیح رفتار سازه
خطای ساخت : اشتباه، کیفیت ضعیف کار، ضعف در ارتباطات

در این فهرست عامل انسانی از عوامل فیزیکی محیطی که سازه در آن قرار دارد تفکیك شده است . ضمن اینکه بایستی به‌طور ضمنی اذعان کرد که این وظیفهٔ طراح است که پیش‌بینی کند چه چیزی می‌تواند باعث بارگذاری اضافه روی سازه شود یا چه چیزی می‌تواند باعث مقاومت کم آن شود یا چه چیزی می‌تواند باعث جابه‌جایی یا زوال نامطلوب در سازه گردد، هرگونه بحثی در بارهٔ کامل بودن فهرست به کلمهٔ " غیره " نیز مربوط می‌شود که در همه جای رده‌بندی حالت‌های حدی حی و حاضر است و طراح ناچار است آن را پیش‌بینی کند. اینکه طراح تا چه حد بتواند این رده‌بندی را تکمیل کند و تا چه حد بتواند از مقاومت سازه‌ای طرح خود در برابر شکست ناشی از هرگونه مشکل یادشده در فهرست و خارج از فهرست اطمینان حاصل کند، تعیین‌کنندهٔ میزان ایمنی سازهٔ وی است.

فهرست‌های مك‌کیگ و بلاکلی از لحاظ نگرش آن‌ها به نقش افراد در علت‌های شکست بسیار متضاد است. افرادی که حضور آنان قسمت‌های مختلف رده‌بندی مك‌کیگ را کاملاً تحت الشعاع خود در آورده است، حتی به‌طور صریح هم به آن‌ها در قسمت " خطاهای انسانی " فهرست

بلاکلی، که چنین به‌نظر می‌رسد بعداً به آن فهرست ضمیمه شده است، اشاره نشده است. و انواع مختلفی از عوامل و شرایط فیزیکی که بلاکلی به‌عنوان علت‌های شکست‌ها در نظر گرفته است در هیچ کجای فهرست انسان محوری ملک‌کیگ به‌طور صریح مقصر قلمداد نشده‌اند.

لیکن حتی چنانچه بتوان بر روی فهرست مشترکی نیز توافق کرد، کسانی که حوادث سازه‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهند معمولاً در نسبت دادن حادثه‌ای خاص به یکی از این رده‌ها به توافق نمی‌رسند. حادثهٔ هایت ریجنسی را در ردهٔ " تخطی از آیین نامهٔ ساختمانی " می‌توان قرار داد یا در ردهٔ " جزئیات غلط " ؟ سقوط هواپیماهای کامت را به " مصالح مستعد خوردگی " می‌توان نسبت داد یا به " آنالیز ناکافی " ؟ یا سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰ شرکت هواپیمایی آمریکن در سال ۱۹۷۹ در شیکاگو را می‌توان به دلیل " نگهداری ناصحیح " دانست یا به دلیل " طراحی نامناسب " که امکان وجود روش‌های نگهداری ناصحیح را پیش‌بینی نکرده است؟ هر کدام از این شکست‌های بدنام را در رده سازه‌ای که تحت اثر " بارگذاری اضافی " قرار گرفته‌اند می‌توان قلمداد کرد یا در ردهٔ سازه‌ای که دارای " مقاومت کم " بوده است؟ بعضی از مهندسان معتقدند که همهٔ این‌ها به معانی الفاظ مربوط می‌شوند و با پیگیری ردپای همهٔ شکست‌های سازه‌ای می‌توان به یک علت رسید که همان خطای طراحی است، زیرا حتی مواردی هم که به‌عنوان خطاهای ساخت نامیده می‌شوند می‌بایستی توسط طراح پیش‌بینی می‌شده است. البته این درست است که همهٔ شکست‌ها را می‌توان نتیجهٔ خطاهای طراحی قلمداد کرد، زیرا هدف از طراحی جلوگیری کردن از شکست است، و شکستی که پیش‌بینی نشده باشد نشان آشکاری از طراحی ناصحیح است؛ اما به‌منظور جلوگیری کردن از شکست، طراح بایستی بتواند آن را پیش‌بینی بکند.

در سال ۱۹۸۲ یکی از کمیسیون‌های فرعی کمیسیون علوم و

تکنولوژی مجلس نمایندگان آمریکا اقدام به بررسی مسأله شکست‌های سازه‌ای در آن کشور کرد. درحالی‌که هدف کمیسیون مشخص کردن عوامل اصلی و مهم در ایجاد شکست سازه‌ای بود، گزارشی که ارائه کرد دارای فهرستی از علت‌های شکست نبود بلکه شامل چندین فهرست متعدد از عوامل مهمی بود که در جلوگیری کردن از شکست‌های سازه‌ای نقش عمده‌ای دارند. یافته‌های کمیسیون شامل شش عامل " بحرانی " در جلوگیری کردن از ایجاد حوادث سازه‌ای می‌باشد:

۱ـ سازماندهی و ارتباطات در صنعت ساختمان
۲ـ بازرسی ساخت توسط مهندس سازه
۳ـ کیفیت کلی طرح
۴ـ جزئیات طرح اتصالات سازه‌ای و نقشه‌های کارگاهی
۵ـ انتخاب آرشیتکت‌ها و مهندسان
۶ـ انتشار به‌موقع و مناسب اطلاعات فنی

در این گزارش صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت جزء عوامل " نسبتاً مهم " ، و کفایت آیین‌نامه‌های ساختمانی و اثر برنامهٔ زمانبندی طراحی و ساخت فشرده جزء عوامل " کم‌اهمیت " ذکر شده‌اند. اگرچه شاید چنین نباشد، اما " نیاز به تغییرات قانون‌گذاری " در آخرین ردهٔ فهرست عوامل کم‌اهمیت آمده است. یکی از توصیه‌های کمیسیون در رابطه با انتشار به‌موقع و مناسب اطلاعات فنی، قدرت دادن به مؤسسه ملی استاندارد برای عهده‌دار شدن و پیشقدمی در کار بررسی شکست‌های سازه‌ای بزرگ در سازه‌های عمومی و جمع‌آوری و انتشار اطلاعات مربوطه می‌باشد.

بنا بر سابقهٔ موجود، مؤسسه ملی استاندارد فقط وقتی عهده‌دار هدایت بررسی‌های شکست‌های بزرگ شده است که مقامات محلی، که کنترل

اجازهٔ دسترسی به محل حادثه تحت اختیار آنان است، از این موسسه درخواست کرده باشند. پس از فرو ریختن راهروهای معلق، افراد بررسی‌کنندهٔ حادثه برای رفتن به داخل هتل هایت با مشکلات بسیاری روبرو شدند، تا اینکه گروه بررسی مؤسسه ملی استاندارد پس از دخالت شهردار توانست سازهٔ فرو ریخته را مورد بررسی قرار دهد. آلبرت گور[1] ، نمایندهٔ ایالت تنسی و رئیس کمیسیون علوم و تکنولوژی مجلس نمایندگان از دادن اختیارات قانونی به مؤسسه ملی استاندارد برای بررسی شکست‌های سازه‌ای و انتشار اطلاعات آن حمایت می‌کرد، همان‌طور که شورای ملی ایمنی حمل و نقل در زمان حاضر قدرت و اختیارات لازم را برای بررسی حوادث هواپیمایی و دیگر حوادث مربوطه کسب کرده است.

توصیهٔ کمیسیون تا حدی از آنجا ناشی می‌شد که اطمینان حاصل کند که اطلاعات شکست‌های سازه‌ای پس از بحث و جدل‌های حقوقی طولانی، در گزارش‌های قطور دادگاه بایگانی نخواهد شد، مثل موردی که ساختمان جان هنکاك[2] در بوستن دچار مشکل بیرون پرت شدن پنجره‌هایش شده بود. بری لپتنر[3] ، وکیلی که برای بسیاری از شرکت‌های آرشیتکتی و مهندسی کار می‌کند، موضوع اهمیت افشاء اطلاعات را در برابر کمیسیون فرعی مجلس به‌خوبی بیان کرد:

> قضاوت خوب معمولاً حاصل تجربه است. و تجربه کراراً از قضاوت بد حاصل می‌شود. یادگیری و استفاده از تجربیات دیگران نیز بدون تردید مستلزم آن است که صاحبان تجربه دانسته‌های خود را در اختیار طالبان آن قرار دهند.

---

1 - Albert Gore
2 - Jhon Hancock Building
3 - Barry LePatner

به‌هرحال، انتشار اطلاعات شکست اخیراً شروع شده است، با این فرض مسلّم که هر طراحی می‌تواند از اشتباهات دیگران چیزهای بسیاری بیاموزد. برای اینکه طراح فراموش نکند که سازه‌ای مشابه با سازه‌ای که وی روی میز نقشه‌کشی یا صفحهٔ نمایش کامپیوتر دارد احتمالاً در گذشته چگونه دچار شکست شده بوده است، اخیراً یك بایگانی شکست‌های سازه‌ای به نام مرکز اطلاع رسانی معماری و مهندسی در دانشگاه مریلند[1] تأسیس گردید. این مؤسسهٔ تبادل اطلاعات، ایده‌ای را که از مدت‌ها قبل توسط انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا تبلیغ می‌شد به ثمر نشاند، که با حمایت مالی بنیاد ملی علوم[2] صورت گرفت. در این مرکز نه فقط اطلاعات خرابی‌های سازه‌ای، بلکه اطلاعاتی در بارهٔ شکست‌های جزئی‌تری چون آسیب رطوبت بر اثر طرح غلط بام و ترك یا کنده شدن نمای معماری بنا در کامپیوتر نگهداری می‌شود. مهندس یا آرشیتکتی که در صدد استفاده از طرح یا مصالحی است که با آن آشنا نمی‌باشد می‌تواند کلیهٔ تجربیات مربوط به آن را از کامپیوتر بگیرد.

اما مرکز اطلاع رسانی معماری و مهندسی نیز با همان محدودیت‌هایی مواجه است که دیگر تهیه‌کنندگان فهرست‌ها روبرو بودند، و میزان سودمندی آن تا حد بسیار زیادی به این بستگی دارد که شکست‌های سازه‌ای و رده‌بندی آن تا چه حد کامل و معتبر باشد و نگرش آن به موضوعات تا چه مقدار با استفاده‌کنندگان مختلف هماهنگی داشته باشد.

اینکه چنین کاری تا چه حد بتواند در افزایش اطمینان به طرح و جلوگیری از تکرار خطاها موفق گردد بستگی شدیدی به میزان همکاری

---

1 - Maryland University
2 - National Science Foundation

واحدهایی دارد که گزارش‌ها و تجربیات مربوط را در اختیار دارند. مك کیگ در مقدمهٔ احساس برانگیز کتاب شکست‌های ساختمانی تأثر خود را چنین بیان می‌کند:

> بسی تأسف‌بار و حسرت‌انگیز است که سیر جریان قانونی در تعیین مسؤولیت هر شکست به‌نحوی است که منجر به مدفون شدن اطلاعات بسیار ارزشمندی می‌گردد. شاید مؤسسات بیمه از حل و فصل بی‌سر و صدای موضوع در پشت درهای بسته خشنود باشند، اما من قویاً اعتقاد دارم که در چنین مواردی مسؤولیت خطیری نیز نسبت به جامعه وجود دارد.

پرونده‌های شرکت‌های بیمه به‌راستی گنجینهٔ ارزشمندی از اطلاعات می‌باشند، و در سال ۱۹۸۲ یك مؤسسهٔ بیمه‌گر با تحویل گزارش‌های چهل هزار مورد به مرکز اطلاع رسانی معماری و مهندسی، این مؤسسه نوپا را یاری داد. با وجود این، چون در هر شکست مهندسی یا معماری دعوی‌ها و دعوی‌های متقابل بسیاری می‌تواند نهفته باشد، و از آنجا که شرکت‌های مهندسی و معماری دشواری چنین مسائلی را چشیده‌اند ولزوماً شاید تمایلی به آشکار شدن این مسائل نداشته باشند، اینکه دیگر مؤسسات نیز با ارائه گنجینهٔ پرونده‌های خود چنین مرکزی را یاری دهند بایستی منتظر آینده بود. و حتی در مورد اطلاعاتی هم که جمع‌آوری شده است اینکه تا چه حد از آن‌ها استفاده بشود بستگی زیادی به توفیق مرکز در کار رده‌بندی کردن و بازیابی اطلاعات دارد.

انتشار مستمر اطلاعات شکست‌های سازه‌ای در مجله انجینیرینگ نیوز رکورد ، که به سابقهٔ ۱۱۰ سالهٔ خود در گزارش کردن و ثبت اطلاعات می‌بالد، از دیر زمان متداول بوده است. گرچه هیچ کس مدعی نیست که شماره‌های قدیمی این مجله گزارش‌هایی رسمی از شکست‌ها

است، لیکن مطمئناً دفینهٔ گرانبهایی می‌باشد، و کتابی هم که اخیراً به نام فاجعه‌های ساختمانی[1] توسط استیون راس[2] منتشر شده است تلاشی است برای دسته‌بندی کردن مقداری از ذخایر این دفینه و استخراج درس‌هایی آموزنده از آن‌ها.

هیچ فهرست انفرادی از علت‌های شکست‌ها یا موارد منتخب از حوادث یا رده‌هایی که این حوادث در آن قرار می‌گیرند یا درس‌هایی که می‌توان از آن‌ها استخراج کرد نمی‌تواند برای همه ارضاکننده باشد، و بنابراین همهٔ چنین فعالیت‌هایی خود در معرض شکست است. بااین‌حال، روش دیگری نیز، که از دیدگاه فنی غیراصولی است، برای تشریح طراحی مهندسی و شکست سازه‌ای وجود دارد که در عین غیردقیق بودن باعث برانگیختن عواطف می‌باشد. این کار همان نوشته‌های ابداعی است که موضوعات فنی را در پوششی از داستان و شعر مورد استفاده قرار می‌دهند. چنین داستان‌هایی گرچه در ظاهر سرگرم‌کننده می‌باشند اما پیام و پند نهفته در آن‌ها می‌تواند بر مفاهیم عمیقی دلالت داشته باشد. علاوه براین، چون داستان‌های تخیلی و شعر بسیار قابل تفسیر است، هر خواننده می‌تواند تجربیات خود را به میان بکشد و متناسب با فکر خود از آن بهره ببرد. و در این میان اگر مسائل تکنولوژیکی مطرح‌شده صحیح و متقن باشند، مراودهٔ فنی اجتماعی حاصل خواهد شد.

داستان معجزهٔ خادم الیور وندل هولمز، در بارهٔ عبث بودن فکر ساختن کالسکه‌ای تك اسبه که اصلاً خراب نشود، یکی از این گونه نوشته‌ها می‌باشد. کتاب *No Highway* نویل شوت، در بارهٔ خستگی فلز در طرح یك هواپیمای جدید، نمونهٔ دیگری است. و رمان اخیر رابرت

---

1 - *Construction Disasters*
2 - Steven S. Ross

برن[1] به نام آسمانخراش[2] ،که مضمون اصلی آن تکنولوژی است، مثال دیگری از کارهای مشابه آثار هولمز و شوت می‌باشد. قهرمان داستان آسمانخراش مهندسی است که متخصص بازرسی شکست است، و از وی دعوت می‌شود برای بررسی علت افتادن شیشه‌های نود کیلویی از قاب پنجره‌های ساختمان شصت و شش طبقه‌ای موهومی به نام زالیان به نیویورك برود. وی در بررسی‌های خود نقائص و علائم خطرناك متعددی در سازهٔ این ساختمان کشف می‌کند، برن از این چارچوب استفاده می‌کند تا نشان دهد که آسمانخراش‌ها چگونه ساخته می‌شوند و چگونه ممکن است دچار خرابی شوند، خصوصاً اینکه چگونه ممکن است سرنگون شوند، همان‌طور که در فصل‌های آخر این کتاب پرکشش ساختمان زالیان سرنگون می‌شود. داستان آسمانخراش گرچه همانند اغلب داستان‌های عامه‌پسند دارای چاشنی سکس و خشونت نیز می‌باشد، از لحاظ جزئیات تکنیکی و مطالب تفکر برانگیز بسیار غنی است، و برن که مهندس ساختمان بوده و دارای پانزده سال تجربه به‌عنوان سردبیر یك مجلهٔ تجارت صنایع ساختمانی است به‌خوبی از عهدهٔ این کار بر آمده است.

خواندن داستان پرجاذبهٔ آسمانخراش ضمن آنکه برای عموم مردم اطلاعاتی جنبی در بارهٔ طراحی مهندسی و بررسی شکست به‌دست می‌دهد، برای متخصصین نیز به‌عنوان یك مورد فرضی مطالعاتی از شکست سازه‌ای جالب توجه است. برن طرح داستان خود را با ترکیب گوناگونی از انواع علل شکست سازه‌ای، شامل خطای طراحی و فقدان بازرسی و نظارت صحیح در هنگام ساخت و پس از آن و محدودیت‌های بودجه و

---

1 - Robert Byrne
2 - *Skyscraper*

تخطی از آیین‌نامه‌های ساختمانی و استفاده از کامپیوتر برای طراحی سازه‌ای سبک‌تر و انعطاف‌پذیرتر نسبت به دوران قبل از کامپیوتر، آمیخته است. چنین به‌نظر می‌رسد که برن کوشش داشته است همهٔ عوامل محتملی را که بنا به تشخیص کمیسیون فرعی مجلس می‌توان انتظار داشت در شکست سازه‌ای سهیم باشند ــ و گزارش آن فقط سه ماه قبل از چاپ این کتاب منتشر شده بود ــ در داستان خود بگنجاند. این‌ها همگی نشانگر آن است که علت‌های شکست‌های سازه‌ای عموماً شناخته‌شده بوده و بر سر آن‌ها توافق نظر وجود دارد، ولی دسته‌بندی کردن آن‌ها و جلوگیری کردن از آن‌ها مسأله دیگری است، همان‌طور که برن در داستان آسمانخراش نشان داده است، عامل انسانی، نه فقط به سبب انجام اشتباهات غیرعمد، بلکه همچنین به دلیل اغماض از سرپوش گذاشتن‌ها، می‌تواند حداقل در تعدادی از شکست‌های سازه‌ای در رأس این مسأله قرار داشته باشد. منظور آن نیست که هر فردی ــ درست‌کار یا دغل ــ خواهان خراب شدن ساختمان‌ها است، بلکه غالباً چنین احساس می‌شود که باوری عمومی وجود دارد که این خرابی بالاخره بر اثر این یا آن نقص خاص اتفاق می‌افتاده است.

اهمیت داستان‌هایی چون آسمانخراش برای ایجاد مراودهٔ فنی اجتماعی، در تلاش آن در پرداختن ضمنی به عامل انسانی نهفته است. کتاب‌هایی در خصوص بررسی‌های مطالعاتی موردی و فهرست علت‌های شکست‌ها، این عامل اشتراک مساعی‌کننده را به‌درستی تلفیق نمی‌کنند، البته در هر کار واقع بینانه برای حمایت اجتماع از خطرات احتمالی شکست‌های سازه‌ای عظیم می‌بایستی انگیزه‌ها و ضعف‌های اشخاص دقیقاً مورد توجه قرار گیرند. چنین حمایتی می‌تواند در نهایت از طریق سیستم‌های کنترل و تعادل در صنعت ساختمانی، و گروه‌های تحقیق که به‌طور قانونی اختیار تفسیر علت‌های شکست‌هایی را که اتفاق می‌افتند

داشته باشند، و به کار بردن ضرایب اطمینان صحیح به‌منظور اطمینان از اینکه سلامت طرح‌ها در حد مرزی نباشد، صورت بگیرد. کتاب‌هایی چون کتاب برن، با انگشت گذاشتن بر آنچه که ممکن است مشکل - آفرین شود، نقش مثبتی در ایمنی سازه‌ها دارند، و زمینه‌ساز نیاز به انتشار هر چه بیش‌تر اطلاعات مربوط به شکست‌ها می‌باشند. اگر حتی فقط یك مهندس طراح یا یك مدیر کارگاه ساختمانی در شعری یا داستانی یك مورد مشابهی را ببیند که وی را در توجه دادن به نقصی در طرح خود یاری دهد، چنین نوشتهٔ خیالی به‌طور یقین همانند آیین‌نامه‌های ساختمانی و بایگانی اطلاعات شکست‌ها و دادرسی‌های قانونی در ایمنی سازه‌ای سهیم خواهد بود.

مهندسان همواره در تلاش هستند تا جدیدها را از قدیم‌ها بیرون بکشند، و این تقدیر آنان است که همواره در اندیشهٔ گذشت زمان باشند که امکانات محاسباتی را بیش‌تر می‌کند و آنان را وادار می‌سازد که همیشه در فکر آینده باشند تا از شکست‌های گذشته پرهیز کنند. وهم و خیال مدت‌ها پیش از کامپیوتر به محاسبات مهندسی وارد شده است، و هر مهندسی را حیران از اینکه آیا کلیهٔ راه‌های ممکن برای شکست را در نظر گرفته است هوشیار نگهداشته است. جذابیت و تشویش موجود در کارهای مهندسی، به‌طرز آشکاری در خاطرات هربرت هوور[1] در بارهٔ حرفه‌ای که قبل از وارد شدن به کارهای سیاسی به عنوان مهندس معدن به آن اشتغال داشته است مشاهده می‌شود:

> حرفهٔ شگفت‌انگیزی است. چه جذابیتی در تماشای تصوری خیالی که از طریق علم به‌صورت طرحی بر روی کاغذ در آمده است

---

۱ - Herbert Hoover ، (۱۹۶٤-۱۸۷٤م)، سی و یکمین رئیس جمهور آمریکا

وجود دارد. بعد به واقعیتی از سنگ و فلز و انرژی در می‌آید. برای انسان‌ها شغل و خانه به ارمغان می‌آورد. کیفیت و سطح زندگی را بالا می‌برد و بر آسایش زندگی می‌افزاید. این امتیاز ویژهٔ مهندسان است.

مسؤولیت بزرگ مهندس در مقایسه با افرادی در حرفه‌های دیگر، در آن است که نتایج کارهای وی در معرض دید همگان قرار دارد. اقدامات وی، قدم‌به‌قدم، قابل لمس است. او نمی‌تواند اشتباهات خود را همانند پزشکان در گور مدفون کند. یا همچون وکلا قاضی را ملامت کند. او نمی‌تواند همانند آرشیتکت‌ها نقایص خود را در پشت درختان پنهان سازد. او نمی‌تواند همانند سیاستمداران اشتباهات خود را با حمله کردن به رقبا بپوشاند و به این امید باشد که مردم فراموش خواهند کرد. مهندس نمی‌تواند آنچه را که کرده است حاشا کند. اگر کار وی عملکرد مورد نظر را به‌دست ندهد، مورد لعن و نفرین قرار خواهد گرفت. این تخیلات و اشباح شب و روز به دنبال وی هستند. وقتی در پایان روز از سر کار برمی‌گردد به این فکر است که آن را دوباره محاسبه کند. نیمه شب با فکر نگران و عرق سرد بر پیشانی از جای برمی‌خیزد و چیزی بر روی کاغذ یادداشت می‌کند که صبح آن را بیهوده می‌یابد. در تمام طول روز نگران اوهامی است که ممکن است به‌طور ناخواسته ظاهر شده و کار تمام و کمال وی را به لرزه در آورد.

۱۷

محدودیت‌های طراحی

ددالوس که بر اساس افسانه‌ها با ساخت بال‌های پرواز عنوان اولین مهندس هوانوردی را به خود اختصاص داده است، می‌بایستی با دیدن بال‌های شکستهٔ پسرش ایکاروس که روی دریا پراکنده شده بود به خود لعنت فرستاده باشد. ولی مطمئناً ایکاروس بخشی از این سرزنش را متوجه آن چیزی دانسته است که می‌توان اولین شکست سازه‌ای در تاریخ مسافرت هوایی نامید. پدرش که طراح موم و بال‌های پرواز بود، به وی هشدار داده بود که با این اختراع ِآزمایش‌نشدهٔ جدید نبایستی زیاد در نزدیکی خورشید پرواز کند.

به‌جای سرگردان ماندن در راهروهای تودرتوی زندان و به انتظار بال‌هایی کامل و خراب‌نشدنی ماندن، ددالوس خطرات احتمالی استفاده از طرحی را که ممکن بود بر اثر آب یا حرارت دچار مشکل شود پذیرفته بود. هر کس و هر چیز محدودیت‌های خاص و طاقت و توانایی خاص خود را دارد، ولی این بدان مفهوم نیست که ما و همهٔ طرح‌های ما یکسره محکوم به شکست هستیم. همان‌طور که از انسان‌ها نمی‌توان انتظار داشت که خود را تحت فشار زیاد قرار دهند یا فوق طاقت خود کار

کنند، طراحان نیز انتظار دارند که ماشین‌ها و سازه‌های آنان تحت فشار زیاد قرار نگرفته و اضافه بر ظرفیت به‌کار گرفته نشوند. ددالوس راه‌هایی را که ممکن بود باعث خرابی سازهٔ وی گردد پیش‌بینی کرده بود، همان‌طور که هر مهندسی بایستی چنین کند، زیرا فقط با تشخیص راه‌های محتمل برای ایجاد شکست است که می‌توان سازهٔ موفقی را طراحی کرد که بتواند در مقابل نیروهایی که ممکن است اجزاء آن را از هم متلاشی کند مقاومت نماید. اگر ایکاروس بال‌ها را در ارتفاع مناسب به‌کار گرفته بود، امروزه از آن به‌عنوان طرحی موفق برای اولین پرواز انسان، اگرچه که به‌طور افسانه‌ای، یاد می‌شد.

آنچه که ددالوس انجام داد احتمالاً بهترین کاری بود که می‌توانست با تکنولوژی و امکاناتی که در اختیار وی بود انجام دهد. وی مصالح محدودی، موم و پر، دراختیار داشت. او و ایکاروس وقت محدودی داشتند، زیرا مینوتار[1] گرسنه نیز در این راهروهای پیچ در پیچ بود. تراژدی افسانهٔ اولین پرواز در این است که اگر پسر ددالوس محدودیت‌هایی را که وی تعیین کرده بود مراعات می‌کرد ـ حداقل بر اساس روایت افسانه ـ پرواز موفق می‌شد.

حتی امروزه، وقتی مهندسان بال‌های فلزی برای هواپیماهایی می‌سازند، که علاوه بر افراد غریبه پسران خود آن‌ها را نیز حمل می‌کنند، طراحان باز هم بایستی به خلبان‌ها و خدمهٔ فنی نسبت به استفادهٔ صحیح از بال‌ها هشدار بدهند. این کار به‌کمک دستورالعمل‌های راه‌اندازی و نگهداری صورت می‌گیرد، که محدودیت‌ها و روش‌های صحیح را مشخص می‌سازد، اما به شهادت حوادثی که به اشتباه خلبان یا

---

۱ - Minotaur ، جانوری افسانه‌ای که نیمی از بدنش انسان و نیمی دیگر گاو بوده و خوراکش گوشت انسان بوده است.

روش‌های نادرست نگهداری نسبت داده می‌شود، هنوز هم بعضی ایکاروس‌هایی در صنعت هواپیمایی وجود دارند.

هدف طراحی مهندسی جلوگیری کردن از شکست است، ولی درعین‌حال طرحی هم که واقعاً ضد شکست باشد خیالی واهی بیش نیست. هر سازه یا ماشین به راه‌های بسیار متعددی ممکن است دچار شکست شود، و نتیجهٔ چنین شکست‌هایی می‌تواند از آسیب جزئی تا فاجعهٔ مصیبت‌بار باشد. طراحی به نام دیوید پای[1] سازشی را که در کارهای طراحی نهفته است چنین بیان می‌کند:

> الزامات و مشخصات ضروری هر طرح با یکدیگر سر ناسازگاری داشته و تلفیق بین آن‌ها ممکن نیست. کلیهٔ طرح‌های ممکن برای هر دستگاهی فی‌نفسه دارای پایه‌ای از شکست هستند، یا به‌دلیل کم‌توجهی و عدم رعایت یك یا چند تا از این الزامات و یا به‌دلیل سازش و مصالحه‌ای که در هر طرح بین این الزامات صورت گرفته است، و سازش نیز به مفهوم وجود پایه‌ای از شکست است.
>
> شکست جزء ذاتی کلیه طرح‌های مورد استفاده می‌باشد، نه فقط به دلیل آنکه همهٔ الزامات اقتصادی ناشی از آرزوهای اقناع‌نشدنی هستند، بلکه بیش‌تر به‌خاطر آنکه هرگاه الزامات اقتصادی را پذیرفته باشیم وجود تضادهای خاصی اجتناب‌ناپذیر خواهد شد، و حتی تضاد بین الزامات کاربردی طرح وضعیت چندان ناآشنایی نیست.
>
> این موضوع بدانجا کشیده می‌شود که هر طرحی که برای استفادهٔ خاصی داده می‌شود دارای جنبه‌ای اختیاری و نظری است. طراح یا

---

1 - David Pye

کارفرمای وی بایستی انتخاب کنند که شکست در چه درجه‌ای و چه محلی قرار داشته باشد. بنابراین سرشت همهٔ چیزهایی که طراحی شده‌اند نتیجهٔ انتخابی نظری است. اگر شما عوامل دخیل در مصالحه و سازش خودتان را تغییر دهید ـ مثلاً، سرعت بیش‌تر شود، حرارت بیش‌تر شود، ایمنی کم‌تر شود، ناراحتی بیش‌تر شود، هزینه‌های اولیه کم‌تر شود ـ باعث تغییر در سرشت چیزی که طراحی می‌شود خواهید شد. به کلی غیرممکن است که هر طرحی " نتیجهٔ منطقی الزامات تعیین‌شده " باشد، صرفاً به این دلیل که الزامات تعیین‌شده در تضاد و ناسازگاری هستند و توقع نتیجه‌ای منطقی از آن‌ها عبث است.

این‌ها همگی بدین مفهوم است که جمع اضداد برای مهندسان نیز غیرممکن است، گرچه که ممکن است اینان هم، به دلیل انسان بودن، گاهی چنین هوس‌هایی به سرشان بزنند و شانس خود را امتحان کنند. جمع‌آوری اتوبوس‌های گرومان فلکسیبل از ناوگان اتوبوس‌رانی نیویورك به‌دلیل ایجاد ترك‌هایی در شاسی آن‌ها فصل جدیدی به داستان قدیمی عصر آهن و مصنوعات انسان در کتاب دانشجویان تاریخ تکنولوژی اضافه کرد. از زمانی که اولین آهنگر ـ مثلاً به نام جیمی آهنگر ـ تلاش کرد مواد خام آهن را از میان انبوه درهم برهم لایه‌های کرهٔ خاکی ما بیرون بکشد و آن را به اسباب و ادوات تبدیل کند، سلامت مصنوعات وی همواره دستخوش کیفیت‌های متنوع و متلون فلز بوده است.

شمشیر از اولین مصنوعات فلزی بود که به طرق گوناگون ساخته و پرداخته می‌شد تا تیغه‌ای تیز و سخت داشته باشد و باعث شکست جنگجو در طی نبرد نشود. ولی چه بسا شمشیرهایی که در حین جنگ‌های قدیم و

در موقعیتی بحرانی شکسته شده است و برای دوستان این جنگجوی. در خون غلطیده این سؤال را پیش آورده است که چرا چنین شد و آیا دفعهٔ بعد چنین بلایی بر سر شمشیر آن‌ها نیز نخواهد آمد. بدون تردید اطمینان بخشیدن به آن‌ها ساده‌تر از عملی کردن وعده‌ها است، و می‌توان تصور کرد که چگونه تعداد قلیلی شمشیرهای بی‌عیب توانسته باشند معدود جنگاوران ظاهراً شکست‌ناپذیر را به دلاوران افسانه‌ای بدل کنند. شاید بتوان گفت که اطمینان وسیعی که به اسلحه‌های مدرن وجود دارد بیش‌تر مدیون دانسته‌های جیمی آهنگر در بارهٔ علت ترك یا شکستن شمشیرهای معمولی است تا اتکاء به ساخت شمشیری افسانه‌ای.

در مورد کاربرد صلح‌آمیز آهن و فولاد نیز چنین است، و ترك‌های اتوبوس‌های نیویورك بیانگر ضعف طراحی است که گرچه شاید باعث ناراحتی مسافران آن شده اما مطمئناً در طرح‌های بعدی اصلاح خواهد شد و شاسی‌های قوی‌تری ساخته خواهد شد که از پس چاله‌های خیابان‌های هر شهری برآید. با این وجود، سؤالی قابل طرح است، آیا این روش تکرار طراحی بر مبنای شکست پایانی دارد؟ آیا روزی خواهد رسید که طراحان بتوانند با تضمین و قاطعیت بگویند این طرحی بدون عیب است؟ بلی، چنین روشی منجر به طرحی می‌شود که تا حد معقولی قابل اطمینان خواهد بود، اما هرگز نمی‌توان تضمین داد که محصولی کاملاً بدون عیب ساخته شود. طراحی شامل فرضیاتی راجع به آیندهٔ چیزی است که طراحی می‌شود، و هرچه که این آینده بیش‌تر شبیه به گذشته باشد، احتمال دقیق‌تر بودن آن فرضیات بیش‌تر خواهد بود. لیکن چیزهایی که طراحی می‌شوند خودشان هم، باعث تغییر آینده‌ای می‌شوند که در آن به سر خواهند برد.

بدین ترتیب انحراف از طرح‌های قدیمی ما را بیش‌تر در معرض غافلگیر شدن قرار می‌دهد. طراحی خوب، به وسیلهٔ پیش‌بینی کردن

جزئیات مشکل‌آفرین و انجام طراحی دست‌بالا به‌منظور ایمنی بیش‌تر، اثرات چنین غافلگیر شدن‌هایی را به حداقل می‌رساند. حتی اگر جیمی آهنگر بر حسب تصادف توانسته باشد شمشیر افسانه‌ای را بسازد، اما این تجربهٔ وی، از شکست‌هایی که توانسته آن‌ها را به آیندگان خود منتقل کند، بوده است که آنان را در نهایت قادر کرده است شمشیری عملاً بی‌عیب را در دستان هر دلاور آشپزخانه قرار دهند. چنین کاری به سبب گذر از دوره‌ای طولانی که طی آن شمشیر و چاقو تکامل پیدا کرده است امکان‌پذیر شده است. جیمی‌های آهنگر در طی قرون متمادی و با تغییر اندك در شکل یا کار آن‌ها توانسته‌اند جمیع مسائل مهم متالورژیکی تیغهٔ چاقو و شمشیر را هماهنگ نمایند.

در برابر، دو قرن هم نمی‌شود که اولین پل فلزی در آغاز انقلاب صنعتی در کولبروکدیل برپا شده است. و بین ابداع قطار راه‌آهن در انگلستان و اتوبوس گرومان فلکسیبل در نیویورك کم‌تر از پنج نسل فاصله است. متأسفانه، صرف دانستن تاریخچهٔ تکنولوژی مانع از تکرار مشکلات نمی‌شود. گرچه بین واگن راه‌آهن قرن نوزدهمی و اتوبوس قرن بیستمی شباهت‌هایی وجود دارد، اما موارد عدم تجانس آن‌ها غلبه دارد. طراحی نسل جدیدی از اتوبوس حمل و نقل شهری که از عهدهٔ ترافیك شهرهای بزرگ برآید و در عین حال شاخص‌هایی چون صرفه‌جویی سوخت و قابلیت استفاده برای معلولین را برآورده سازد و با انبوهی از دیگر الزامات و قوانین ایالتی تطابق داشته باشد کار دشواری است. هیچ سازنده‌ای سودای شکست طرح خود یا به مخاطره انداختن جان انسان‌ها را ندارد. چنین چیزی نه تنها از لحاظ اخلاقی ناروا می‌باشد، بلکه برای کار تجارت نیز زیان‌آور است.

مسافرت موفقیت‌آمیز انسان به کرهٔ ماه نشان‌دهندهٔ آن است که هیچ طرحی صرفاً به‌دلیل فقدان تجربه لزوماً محکوم به شکست نیست.

بلکه ترکیبی از بی‌تجربگی و مشکلات ناشی از محذورات الزامات ضروری، به‌همراه محدودیت زمانی برای انجام کار و ملاحظات مالی است که باعث متلاشی شدن شاسی‌های اتوبوس و پریشانی ذهن طراحان آن می‌گردد. علاوه بر این، جیمی آهنگر به تنهایی کار نمی‌کند. او چند وقت به چند وقت باید چکش خود را زمین بگذارد و به‌همراه جیمی حسابگر که سرمایه‌گذار کار است به سراغ حساب و کتاب‌های مالی برود، و از آخرین مقرراتی که توسط جیمی حقوقدان صادرکنندهٔ مجوز کار وضع شده است آگاه شود.

فقط در مورد تجارت ساخت اتوبوس‌های حمل و نقل شهری نیست که سیستم شتابان اقتصاد اجتماعی ما دچار درهم شکستگی می‌شود. در حال حاضر برای توجیه تصمیمات اقتصادی مهم اتکاء فزاینده‌ای به مدل‌های کامپیوتری که اثرات اقتصادی را پیش‌بینی می‌کنند وجود دارد، در حالی که این مدل‌ها بیش‌تر از آن مدل‌هایی که عمر خستگی شاسی اتوبوس را پیش‌بینی می‌کنند از خطا و لغزش مصون نیستند. بدین ترتیب همان ابزارهایی که ظاهراً ما را از انجام آنالیز طاقت‌فرسا و ملالت‌بار رها کرده‌اند ما را محکوم به ابداع مجدد آن کرده‌اند. ما به جامعه‌ای بدل شده‌ایم که خواهان آنچنان تغییرات سریعی است که باعث گم شدن و از دست رفتن منافع یکی از عظیم‌ترین ابزارهای بشری ـ تجربه ـ گردیده است. همان‌طور که مرتباً ساختارهای اصلی اقتصاد را تغییر می‌دهیم، جا افتاده‌ترین چیزهای وسایط نقلیه را مجدداً طراحی می‌کنیم. تغییرات چنان بنیادین و شتاب‌آلود است که تشخیص مناسبت‌ها و ارتباط آن‌ها با درس‌های آموخته‌شده از نسل‌های قبلی امکان‌پذیر نمی‌باشد. چنان می‌نماید که با شمشیرهای آخته و با عصبانیت و بی‌دقتی هرچه تمام‌تر به تیغه‌های خیش ضربه وارد می‌سازیم تا در برخورد با اولین سنگریزه‌ها دچار گسیختگی شود.

آلفرد پاگسلی، از پیشگامان بررسی خستگی فلز در هواپیماهای نظامی و سخنوری ماهر برای طرفداران ایمنی سازمهـــا، چنین می‌نویسد: " حرفه‌ای که هرگز دچار حوادث نشده باشد بعید است که بتواند خدمات ارزنده‌ای به کشور ارائه دهد. " وی با این عبارت به همان چیزی اشاره دارد که هدف ثابت و مشخص طراحی مهندسی سازه در جامعه‌ای است که شتابان دستخوش تحول می‌باشد: ساختن هرچه اقتصادی‌تر سازه‌های ایمن. محدودیت‌های سازه‌ها همیشه همانند سقوط بال‌های ایکاروس به‌طور قطعی در اولین پرواز مشخص نمی‌شود. وقتی هواپیمایی هزاران ساعت پرواز را بدون حادثه پشت سر می‌گذارد، بدون تردید دلیل بر آن نیست که این موفقیت بر اثر وجود قدرت اضافی در آن بوده است تا بتوان نتیجه گرفت هنوز ظرفیت بار بیش‌تری دارد و متعاقباً نیز به‌طور همیشگی بار بیش‌تری به آن زد. با این همه، مهندسان همواره با علم به اینکه به‌خاطر پوشش دادن به عدم اطمینان‌ها در بارهٔ مقاومت مصالح و عدم اطمینان‌ها نسبت به بارهای وارده به بال‌ها و عدم‌اطمینان‌ها در بارهٔ محاسبات تنش است که از ضریب اطمینان استفاده کرده‌اند، طبیعتاً باز هم با این سؤال سرگیجه‌آور روبرو هستند که چه مقدار وزن غیرضروری در سازهٔ هواپیما به‌کار برده شده است. بنابراین هنگامی که هواپیمای جدیدی طراحی می‌شود، مهندسان شدیداً تحت فشار قرار می‌گیرند تا به سؤال‌هایی از قبیل چرا چنین ضریب اطمینان بالایی بایستی به‌کار برده شود پاسخ دهند. هرچه باشد، آن‌ها طی این فاصله مصالح را بیش‌تر شناخته‌اند، بارهای وارده را طی پروازهای آزمایشی، موفقیت‌آمیز هواپیما اندازه‌گیری کرده‌اند، و کامپیوترهایی در اختیارشان قرار گرفته است که آن‌ها را قادر می‌سازد محاسبات تنش، بیش‌تر و دقیق‌تر و احتمالاً بهتری نسبت به سابق انجام دهند. اگر اینان به ساخت هواپیمای جدید سبک‌تر و اقتصادی‌تری دست نزنند رقبای آن‌ها این کار

را خواهند کرد، و اولین طراحانی که بدان اقدام کنند پشتوانهٔ تجربی آن را نخواهند داشت.

این بی‌شباهت به همان مسیری نیست که ساختمان کلیساهای جامع و پل‌ها و اتوبوس‌ها و هر سازهٔ مهندسی دیگری آن را می‌پیماید. به‌دنبال هر موفقیتی سؤال‌هایی از میان جامعه و مالیات دهندگان و حکومت و هیأت مدیره شرکت‌ها و از میان خود مهندسان مطرح می‌شود که سازهٔ بعدی را چقدر بزرگ‌تر و چقدر سبک‌تر و چقدر اقتصادی‌تر می‌توان ساخت. و فقط این ضریب ایمنی سازه نیست که کم‌رنگ می‌شود، بلکه مهارت ساخت و سبک نیز به‌دنبال مقاومت مصالح قربانی می‌شوند. البته این پدیده‌ای جدید و خاص عصر کامپیوتر نیست. هنری آدامز، که انحطاط جوامع را امری محتوم می‌انگارد، در کتاب مون سن میشل و شارت[1] چنین می‌نویسد: " کلیساهای جامع عظیم قرن دوازدهم به‌بعد جلوه‌ای از اقتصاد، و گاهی هم از آن پست‌تر، هستند. چه روزگار بی‌مقداری بوده است، همان‌طور که همهٔ روزگاران چنین‌اند. "

آنچه که البته در نهایت اتفاق می‌افتد تبدیل موفقیت به شکست است: شکست زیبایی‌ها و شکست کاربردی و شکست سازه‌ای. اولین این‌ها جلوهٔ زندگی را از بین می‌برد و دومی کیفیت زندگی را و سومی خود زندگی را. شکست سازه‌ای معمولاً باعث معکوس شدن جهت رو به بدتر بودن ایمنی سازهٔ آن نوع از سازه‌ها می‌گردد، که این عمل به طریق از رده خارج کردن آن سازه‌ها یا تقویت کردن آن‌ها یا استفادهٔ محتاطانه‌تر از آن‌ها صورت می‌گیرد. پس از هر شکستی، همواره تمایل عمومی به سمت محافظه‌کارانه‌تر شدن آیین‌نامه‌های ساختمانی و ضرایب اطمینان و روش‌های مهندسی مربوط کشانده می‌شود، و بدین ترتیب شکست‌ها به

---

1 - *Mont-Saint-Michel and Chartres*

موفقیت‌های جدیدی منجر می‌شوند. چنین به‌نظر می‌رسد که این روندی متناوب باشد.

درس‌های تاریخ برای مهندسان سازه کاملاً گویا است. نوآوری لزوماً محکوم به شکست نیست، زیرا که پل آهنی و پل ایدز و پل بروکلین همگی به‌عنوان یادبودهایی از بهره‌گیری‌های هوشیارانه از مصالح جدید استوار مانده‌اند. وجود یادگار کریستال پالاس و وجود ساختمان امپایر استیت به ما گوشزد می‌کند که ابداع و ابتکار و سرعت ساخت می‌تواند زیانبار نباشد. و پرچمی که بر روی کرهٔ ماه به اهتزاز در آمد به ما خاطرنشان می‌کند که با استفاده از کامپیوتر می‌توان کارهایی انجام داد که قبلاً هرگز شدنی نبوده است. درعین‌حال همین تاریخ به ما می‌گوید که مصالح در تحت شرایط جدید ممکن است منجر به نیروگاه‌های هسته‌ای شکننده و ترک‌دار بشوند. و به ما می‌گوید که روش نوین طراحی و ساخت فشرده ممکن است انجمن‌های سنت‌گرا را بدون مرکز اجتماعات بگذارد. و به ما می‌گوید که کامپیوتر ضرورتاً باعث ساخت اتوبوس بهتری نمی‌شود. آیا درس‌های تاریخ برای مهندسان سازه کاملاً گویا نیست؟

بلی، حداقل یك درس آن کاملاً گویا است، که نوآوری مستلزم خطرپذیری است. تعدادی از نوآوری‌ها موفقیت‌بار هستند و مهندسان آن‌ها قهرمان. تعدادی از نوآوری‌ها شکست‌آفرین هستند و مهندسان آن‌ها قربانی. در حالی که شکست در نوآوری برای مهندسانی که نهایت سعی و تلاش خود را برای ساختن پلی بزرگ‌تر به‌کار برده‌اند می‌بایستی همانند ورزشکار پرش با نیزه‌ای که پس از تمرینات بسیار و استفادهٔ حداکثر از ظرفیت نیزه در رکوردشکنی شکست می‌خورد خفت‌بار تلقی نگردد. بلکه آن مهندسی که اقدام به انجام کاری کرده باشد که آمادگی آن را نداشته است، یا آن مهندسی که دچار همان اشتباهی شود

که قبلاً منجر به شکست شده بوده است، کسانی هستند که غیرمسؤولانه عمل کرده‌اند. اینان با این کار باعث شرمساری حرفهٔ خود می‌شوند، درست همان‌گونه که ورزشکار پرش با نیزه‌ای که از تمرین امتناع کرده باشد یا از همان نوع نیزه‌ای استفاده کرده باشد که در پرش مشابه قبلی شکسته شده بوده است باعث شرمساری تیم خود می‌گردد. مهندس با داشتن آمادگی کامل می‌تواند اقدام به ساختن چیزهایی ماورای تجربهٔ قبلی بکند، همان‌طور که ورزشکار پرش با نیزه با داشتن تمرینات کامل می‌تواند به رکورد جدیدی حمله برد.

گرچه ممکن است بعضی‌ها خواستار آن باشند که نقطه ضعف‌ها و موارد شرمساری کارهای مهندسی عیان نشود، اما این کار به حیثیت و اعتبار حرفهٔ مهندسی لطمه وارد می‌کند. با انتشار آن‌ها، مهندسانی که احتمالاً در رابطه با برنامه‌های کامپیوتری یا مسائل طراحی یا آنالیز شکست مشابهی فعالیت می‌کنند می‌توانند از آن‌ها بهره بگیرند. و اگر چنین مواردی به‌طور گسترده نه تنها در نشریات تخصصی بلکه حتی در داستان‌های روزنامه‌ها مورد بحث قرار گیرند احتمال غفلت از آن‌ها کم‌تر خواهد شد. مهندسان گزارش‌های شکست‌ها را نبایستی به‌عنوان لکه‌هایی کثیف بلکه به‌عنوان اقرارهایی به انسان بودن بنگرند. نشریات و کتاب‌های انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا و انجمن مهندسان راه و ساختمان انگلستان و انجمن‌های مهندسان سازهٔ آن‌ها از منابع اصلی گزارش‌های جامع فنی و بررسی‌های شکست‌های سازه‌ای محسوب می‌شوند، زیرا تشکیلات آن‌ها به ارزش درس‌هایی که می‌توان از شکست‌ها آموخت به‌خوبی واقف هستند. بر اساس این سنت دیرینهٔ آن‌ها است که رابرت استونسن مهندس ساختمان و سازندهٔ پل در سال ۱۸۵۶ به مؤلفین توصیهٔ بی‌پرده‌گویی کامل می‌کند. وی از زبان شخص ثالث که

متن دست‌نویس مقاله‌ای را بازبینی کرده است چنین می‌نویسد:

> . . . وی آرزو داشت که همهٔ حوادث و فجایعی که طی پیشرفت آن دوران اتفاق افتاده‌اند در هنگام بازنگری مقاله مورد توجه قرار گیرند، زیرا برای کارکنان حرفهٔ مهندسی هیچ چیزی به اندازهٔ گزارش‌های حوادث در کارهای بزرگ و روش‌هایی که برای تعمیر این صدمات و اشکالات به‌کار برده شده است نمی‌تواند سازنده باشد. بیان صادقانهٔ علت‌های این حوادث، و روش‌هایی که در پی آن اعمال شده است، عملاً ارزشی بیش از توصیف همهٔ کارهای موفق را دارد. مهندسان قدیمی ذخایر ارزشمند تجربی خود را از مشاهدهٔ مشکلاتی که بر سر کارهای خودشان و دیگران می‌آمده است کسب کرده‌اند، و چقدر مهم است که چنین اطلاعاتی با امانت کامل در بایگانی انجمن حفظ گردد.

امروزه نیز رابرت استونسن همان آرزو را، با اضافه کردن موارد مربوط به شکست‌های برنامه‌های کامپیوتری و اقداماتی که برای اصلاح آن‌ها به‌کار گرفته شده است، خواهد داشت. وی بدون تردید آرزو می‌داشت که هر جا شرایط بالقوه خطرناکی در استفاده از کامپیوتر برای طراحی وجود داشته باشد اخطارهای لازم انتشار داده شوند، درعین‌حال که ممکن بود خود وی نیز ورای تجربهٔ خویش برای طراحی پل‌ها از کامپیوتر استفاده کند. لیکن احتمال هم داشت که وی با دیدن گزارش اولین کنفرانس بین‌المللی محاسبات در مهندسی ساختمان[1] که یك اجلاس اختصاصی با عنوان " کالبد شکافی فاجعه‌های کامپیوتری " داشت

---

1 - *Proceedings of* the *First International Conference on Computing in Civil Engineering*

و در بخش " خلاصه " اجلاس متن زیر آمده بود هیچ نگرانی به‌خود راه نمی‌داد:

> هیچ کدام از مقالات این اجلاس منتشر نخواهد شد. هدف آن است که سخنرانان بتوانند بدون واهمه و با صراحت در بارهٔ فاجعه‌های کامپیوتری مورد نظر صحبت کنند. همچنین، از ذکر اسامی افراد و سازمان‌ها و دیگر جزئیات به لحاظ رعایت حقوق آنان خودداری خواهد شد.

گرچه شاید عدم اشاره به اسامی در جامعه‌ای که طرح دعاوی قانونی در آن اشاعه دارد خوش‌آیند باشد، لیکن برای حرفهٔ مهندسی مطلوب نیست. و در چنین مواقعی اختفاکاری پیش از آنکه صفتی عالی شمرده شود، کسانی را که در کنفرانس ۱۹۸۱ نیویورک حضور نداشته‌اند از آن همه تجربیاتی که چنین اجلاسی می‌توانسته از آن انباشته باشد محروم کرده است.

شکست‌های سازه‌های بزرگ ـ چون پل تاکوما یا سد تتان ـ مصیبت‌هایی هستند که هیچ کس نمی‌خواهد شاهد تکرار آن‌ها باشد. بی‌مناسبت نخواهد بود اگر به‌عنوان حسن ختام و در رابطه با نقش شکست در کارها، به عبارت مشهوری از جورج سانتایانا[1] در بارهٔ آنانی که گذشته را به‌خاطر نمی‌آورند یا از گذشته خبر ندارند محکوم به تکرار آن هستند، اشاره شود. وقتی در مقاله‌ای به سال ۱۹۸۲ در مجلهٔ تکنولوژی ریویو به این عبارت اشاره کرده بودم، هرگز انتظار دریافت نامه‌ای از یك خواننده نداشتم که طی آن در بارهٔ صاحب این عبارت که

---

۱ - George Santayana ، (۱۹۵۲-۱۸۶۳م)، شاعر و فیلسوف آمریکایی (متولد اسپانیا)

تا آن زمان به سانتایانا نسبت داده می‌شد تشکیك کند، و توجه مرا بدین نکته جلب کند که این عبارت معروف در کتاب نقل قول‌های شنیدنی بارتلت[1] وجود ندارد. این خواننده مدعی شده بود که این جملهٔ عمیق و پرمغز را یکی از نیاکان وی گفته است. این واقعه مرا به ماجرایی کشاند که به من گوشزد کند ادیبان نیز، همانند مهندسان، انسان هستند.

ابتدا برای اطمینان یافتن از نبودن این نقل قول معروف در کتاب بارتلت به نسخهٔ خودم که چاپ سیزدهم (۱۹۵۵) بود مراجعه کردم، و چنین عبارتی را نیافتم. چون اطمینان داشتم که این عبارت متعلق به سانتایانا است به چندین کتاب نقل قول دیگر که در کتابخانه بود نگاه کردم، تا اینکه آن را به همراه نقل قول دلنشین دیگری از سانتایانا در بارهٔ استقبال از آینده در کتاب گنجینهٔ نقل قول‌های جدید ریدرز دایجست[2] یافتم. ولی راجع به منبع آن فقط به این عبارت اکتفا شده بود که " جورج سانتایانا، به نقل از ریدرز دایجست. " چنین اطلاعی از لحاظ کار بررسی موضوع ارزش چندانی نداشت، بنابراین شمارهٔ مجله‌ای را که به آن اشاره کرده بود یادداشت کردم و برای یافتن اطلاعات بیش‌تر به زیرزمین کتابخانه رفتم. اما وقتی در میان شماره‌های مجلد شدهٔ مجلهٔ ریدرز دایجست[3] مشاهده کردم که‌قسمت " نقل قول‌های معروف" آن به تمیزی بریده شده است حس کردم توطئه‌ای اورولی[4] وجود دارد: نکند که بزودی این صفحات با صفحات دیگری و با نسبت دادن نقل قول به فرد مورد نظر جایگزین بشود؟

بلافاصله برگشتم و همهٔ کتاب‌های نقل قول را به‌دقت بررسی کردم.

---

1 - *Bartlett's Familiar Quotations*
2 - *Reader's Digest Treasury of Modern Quotations*
3 - *Reader's Digest*
٤ - Orwellian ، منسوب به جورج اورول نویسنده کتاب معروف مزرعه حیوانات

در آخرین ردیف این کتاب‌ها به کتاب فرهنگ نقل قول‌های آکسفورد[1] برخوردم و این عبارت را در آن یافتم: " آنان که نتوانند گذشته را به‌خاطر آورند محکوم به تکمیل کردن آن هستند. " تکمیل ؟ عجب ! به‌نظر می‌آمد کشف خارق‌العاده‌ای باشد، مثل یافتن یادداشت‌های فهرست‌نشده‌ای از شکسپیر. مصمم شدم به مرجع آن که کتاب حیات عقل[2] سانتایانا بود مراجعه کنم و این عبارت را که سال‌ها به غلط نقل قول شده بود آشکار سازم. و با خودم فکر می‌کردم کسانی که این مطلب را به‌خاطر نداشته‌اند محکوم به بازخوانی آن خواهند بود.

کتابخانه‌ای که به آن مراجعه کرده بودم چاپ اول (۱۹۰۵) حیات عقل را نداشت ولی چاپ دوم (۱۹۲۴) آن موجود بود. و در این چاپ کلمهٔ " تکمیل " نبود بلکه از همان کلمهٔ قبلی " تکرار " استفاده شده بود. حالا بیش‌تر تهیج شده بودم. شاید سانتایانا این کلمه را پس از چاپ اول اصلاح کرده بوده است، و من می‌توانستم تفسیر مفصلی بنویسم که وی با از دست دادن دل و جرأت خود در طول جنگ جهانی اول اقدام به این اصلاح کرده است. و می‌توانستم نکاتی را به آن اضافه کنم که چگونه چنین تغییر کلمه‌ای در کتاب وی از نظر ادبا به دور مانده است همان‌طور که تغییر یکی از جزئیات تکیه‌گاه راهروهای هتل هایت از نظر مهندسان به دور مانده بوده است.

درحالی‌که مترصد نتایج بعدی کار بودم، در روز شنبه‌ای مه‌آلود، به کتابخانهٔ دیگری رفتم تا چاپ اول حیات عقل را پیدا کنم، و در کمال تعجب چیزی یافتم که می‌شد آن را در تصورات خود به‌عنوان آخرین نسخه‌ای که از دست چپاول توطئه‌گر تیغ به‌دست در امان مانده است

---

1 - *Oxford Dictionary of Quotations*
2 - *The Life of Reason*

بپندارم. به سرعت صفحهٔ ۲۸۴ جلد اول آن را باز کردم و چنین خواندم: " پیشرفت، فراتر از آنکه ذاتی تغییرات باشد، متکی به قدرت حافظهٔ تاریخی است. . . . آنان که نتوانند گذشته را به‌خاطر آورند محکوم به تکرار کردن آن هستند. " تکرار ؟ از اینکه فرهنگ نقل قول‌های آکسفورد مرا به اشتباه انداخته بود به آن لعنت فرستادم، ضمن اینکه چون باعث این تفحصات شده بود از آن سپاسگزار بودم. جزئیات! امان از این جزئیات! چرا ما آن‌ها را دقیق‌تر بررسی نمی‌کنیم؟ مگر نه این است که آن‌ها می‌توانند خوانندگان بی‌تقصیر را در دالان‌های کتابخانه‌ها سرگردان کنند، جایی که جوانك‌های نادانی به کتاب‌ها دست برده باشند، و می‌توانند شهروندان بی‌گناه را در هواپیماهای ترك‌دار و راهروهای متزلزل به کشتن بدهند. مگر نه این است که، در دفتر طراحی مهندسی یا در محل عملیات ساختمانی، فقط یك عددی که اشتباه نوشته شده باشد یا یك ترك که در قسمتی از اجزاء به‌وجود آمده باشد می‌تواند تمام سازه و جان‌هایی را که به ایمنی آن متکی هستند به مخاطره اندازد و عواقبی به بار آورد که قابل مقایسه با روانه ساختن یك پژوهشگر ادبی مبتدی به میان انبوهی از قفسه‌های کتابخانه‌ها نیست.

لغزش‌ها همه جا وجود دارد، در دفاتر طراحی مهندسی و در دفاتر ویراستاری و در چاپخانه‌ها. اینکه چه لغزشی باعث چه شرارتی می‌تواند بشود شاید هرگز قبل از وقوع قابل تشخیص نباشد، اما با انتشار این خطاها می‌توانیم بخت خود را در یافتن لغزش ناشناس بعدی، قبل از اینکه بتواند صدمه‌ای وارد سازد، افزایش دهیم. با این هدف، تجربهٔ خودم در بارهٔ نقل قول معروف سانتایانا را طی مقالهٔ کوتاهی در واشینگتن پست[1] به چاپ رساندم. یکی از خوانندگان روزنامه، که ظاهراً همچون من

---

1 - *Washington Post*

شکاك بوده است، به کتاب بارتلت خودش (چاپ پانزدهم) رجوع کرده بود و دیده بود که این عبارت سانتایانا بدون اشتباهی در آن چاپ شده است. حال اگر من چاپ جدیدتر آن کتاب را می‌داشتم هرگز متوجه اشتباه کتاب آکسفورد نمی‌شدم که مرا به این طرف و آن طرف کشاند و درس دیگری در بارهٔ جزئیات به من داد. بدین گونه است که در یافتن برخی اشتباه‌ها، چه در کتاب‌ها و چه در نقشه‌های فنی، بخت و اقبال نیز سهیم است.

گرچه نقل قول معروفی را که از قلم افتاده باشد می‌توان در چاپ بعدی بارتلت اضافه کرد یا کلمهٔ اشتباهی را می‌توان در چاپ بعدی آکسفورد اصلاح کرد، اما هیچ چیز نمی‌تواند فاجعه‌ای مهندسی را محو کند. درعین‌حال امکان جلوگیری کردن از تکرار فاجعه نیز وجود دارد، با صحبت کردن و نوشتن در بارهٔ اشتباهاتی که از دست ما در رفته‌اند می‌توانیم چیزهایی یاد بگیریم، و با یاد گرفتن از این اشتباهات می‌توانیم از وقوع مجدد آن‌ها پرهیز کنیم. همان‌طور که سانتایانا گفته است، " باید به استقبال آینده برویم و به‌خاطر داشته باشیم که آن هم بزودی گذشته خواهد بود، باید گذشته را تکریم کنیم و بدانیم که آن نیز روزگاری جزئی از مقدورات دور دست انسان‌ها بوده است. "

کتابنامه

Adams, Henry. *Mont-Saint-Michel and Chartres.* Boston: Houghton Mifflin Company, 1933.

Addis, W. "A New Approach to the History of Structural Engineering, " *History of Technology : Eighth annual Volume, 1983,* pp. 1-13.

Alger, John R.M., and Hays, Carl V. *Creative Synthesis in Design.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice - Hall, 1964.

Asimow, Morris. *Introduction to Design.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice - Hall, 1962.

Barlay, Stephen. *The Search for Air Safety: An International Documentary Report on the Investigation of Commercial Aviation Accidents.* New York: William Morrow & Company, 1970.

Beaver, Patrick. *The Crystal Palace, 1851-1936: A Portrait of Victorian Enterprise.* London: Hugh Evelyn, Ltd., 1970.

Bettelheim, Bruno. *The Uses of Enchantment: The Meaning*

and Importance of fairy Tales. New York: Alfred A. Knopf, 1977.

Bill, Max. *Robert Maillart: Bridges and Constructions.* New York: Frederick A. Praeger, 1969.

Billington, David P. *Robert Maillart's Bridges: The Art of Engineering.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1979.

---. *Structures and the Urban Environment.* Princeton, N.j.: Princeton University Department of Civil Engineering, 1983.

---. *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering.* New York: Basic Books, 1983.

Bishop, R. E. D. *Vibration.* Cambridge: The University Press, 1965.

Blockley, D. I. *The Nature of Structural Design and Safety.* Chichester, West Sussex: Ellis Horwood Limited, 1980.

Bradley, Sculley; Beatty, Richmond Croom; and Long, E. Hudson; eds. *The American Tradition in Literature.* Revised, Shorter Edition. New York: W. W. Norton & Company, 1962.

Brown, J. Crozier. " Anatomies of Computer Disasters, " *Proceedings of the first International Conference on Computers in Civil engineering.* New York: American Society of Civil Engineers, 1981, p. 250.

Bryant, Mark. *Riddles: Ancient and Modern.* New York: Peter Bedrick Books, 1983.

Byrne, Robert. *Skyscraper.* New York: Atheneum, 1984.

Briggs, Asa. *Iron Bridge to Crystal Palace: Impact and Images of the Industrial Revolution.* London: Thames and Hudson, 1979.

Burke, John G. "Bursting Boilers and the Federal Power," *Technology and Culture,* 7 (1966), pp. 1-23.

Choate, Pat, and Walter, Susan. *America in Ruins: The Decaying Infrastructure.* Durham, N. C.: Duke University Press, 1983.

Clegg, Gordon L. *The Design of Design.* Cambridge: The University Press, 1969.

Coleman, S. N. *Bells: Their History, Legends, Making, and Uses.* Chicago: Rand McNally, 1928.

Collins, A. R., ed. *Structural Engineering -- Two Centuries of British Achievement.* Chislehurst, Kent: Tarot Print Limited, 1983.

Collins, J. A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention.* New York: John Wiley & Sons, 1981.

Condit, Carl W. *American Building Art: the Nineteenth Century.* New York: Oxford University Press, 1960.

Cowan, Henry J. *The Master Builders: A History of Structural and Environmental Design from Ancient Egypt to the Nineteenth Century.* New York: John Wiley & Sons, 1977.

--- . *Science and Building: Structural and Environmental Design in the Nineteenth and Twentieth Centuries.* New York: John Wiley & Sons, 1978.

Cowper, Charles. *The Building Erected in Hyde Park For the Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations, 1851.* facsimile Edition. London: Her Majesty's Stationery Office, 1971.

Cross, Hardy. *engineers and Ivory Towers.* Edited by Robert C. Goodpasture. New York: McGraw - Hill Book Company, 1952.

Davenport, William H. and Rosenthal, Daniel, eds. *Engineering: Its Role and Function in Human Society.* New York: Pergamon Press, 1967.

Davidson, Frank P. *Macro: A Clear Vision of How Science and Technology Will Shape Our Future.* New York: William Morrow and Company, 1983.

de Havilland, Sir Geoffrey. *Sky Fever: The Autobiography.*

London: Hamish Hamilton, 1961.

de Mare, Eric. *London 1851: The Year of the Great Exhibition.* London: Folio Society, 1972.

Dempster, Derek D. *The Tale of the Comet.* New York: David McKay Company, 1958.

Dixon, Roger, and Muthesius, Stefan. *Victorian Architecture.* New York: Oxford University Press, 1978.

Duga, J. J., et al. *The Economic Effects of Fracture in the United States. Part 2 -- A Report to NBS by Battelle Columbus Laboratories.* Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, 1983.

Dyson, Freeman. *Disturbing the Universe.* New York: Harper & Row, 1979.

Edwards, LIewellyn Nathaniel. *A Record of History and Evolution of Early American Bridges.* Orono, Maine: The University Press, 1959.

Emerson, Ralph Waldo. *Essays.* First and Second Series. Boston: Houghton Mifflin Company, 1925.

Evans, Ifor. *Literature and Science.* London: George Allen & Unwin, 1954.

Fairbairn, William. *On the Application of Cast and Wrought Iron to Building Purposes.* New York: John Wiley, 1854.

Feld, Jacob. *Lessons From Failures of Concrete Structures.* Detroit: American Concrete Institute, 1964.

--- . *Construction Failure.* New York: John Wiley & Sons, 1968.

Ffrench, Yvonne. *The Great Exhibition: 1851.* London: Harvill Press. 1950.

Flint, A. R. "Risks and Their Control in Civil Engineering," *Proceedings of the Royal society (London) A,* 376 (1981), pp. 167-179.

Florman, Samuel C. *The Existential Pleasures of Engineering.* New York: St. Martin's Press, 1976.

--- . *Blaming Technology: The Irrational Search for Scapegoats.* New York: St. martin's Press, 1981.

Galilei, Galileo. *Dialogues Concerning Two New Sciences.* Translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio. New York: Dover Publications. Republication of 1914 edition.

Gibbs - Smith, C. H. *The Great Exhibition of 1851.* London: Her Majesty's Stationery Office, 1950.

Giedion, Sigried. *Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition.* Third Edition. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1954.

Gillispie, Charles Coulston. *The montgolfier Brothers and the Invention of Aviation, 1783-1784: With a Word on the Importance of Ballooning for the Science of Heat and the Art of Building Railroads.* Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1983.

Godfrey, Edward. *Engineering Failures and Their Lessons.* Privately Printed, 1924.

Gordon, J. E. *The New science of Strong Materials: Or Why You don't Fall Through the Floor.* Second Edition. Harmondsworh, Middlesex: Penguin Books, 1976.

--- . *Structures: Or Why Things Don't Fall Down.* New York: Da Capo Press, 1981.

Great Britain Navy Department Advisory Committee on Structural Steels. *Brittle Fracture in Steel Struc- tures.* London: Butterworths, 1970.

Guerber, H. A. *Myths of Greece and Rome: Narrated with Special Reference to Literature and Art.* New York American book Company, 1893.

Hall, Peter. *Great Planning Disasters.* Berkeley: University of

California Press, 1982.

Hammond, Rolt. *Engineering structural Failures: The Causes and Results of Failure in Modern Structures of Various Types.* New York: Philosophical Library, 1956.

Harper, Robert Francis. *The Code of Hammurabi, King of Babylon About 2250 B. C.* Second Edition. Chicago: The University of Chicago Press, 1904.

Hawthorne, Nathaniel. *The Celestial Railroad and Other Stories.* New York: New American Library, 1963.

Heins, C. P., and Firmage, D. A. *Design of Modern Steel Highway bridges.* New York: John Wiley & Sons, 1979.

Hertzberg, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.* New York: John wiley & sons, 1976.

Hitchcock, H. R. *The Crystal Palace: The Structure, Its Antecedents and Its Immediate Progeny.* Northampton, Mass.: Smith College Museum of Art and Massachusetts Institute of Technology, 1951.

Hobhouse, Christopher. *1851 and the Crystal Palace.* London: J. Murray, 1937.

Hopkins, H. J. *A Span of Bridges: an Illustrated History.* New York: Praeger Publishers, 1970.

Janney, Jack R. *Guide to Investigation of Structural Failures.* New York: American Society of Civil Engineers, 1979.

Kemp, Emory L. "Samuel Brown: Britain's Pioneer Suspension Bridge Builder," *History of Technology: Second Annual Volume, 1977* , pp. 1-37.

Kranzberg, Melvin, and Pursell, Carroll W., Jr. *Technology in Western Civilization.* Two Volumes. New York: Oxford University Press, 1967.

Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions.* Chicago: The University of Chicago Press, 1962.

Lathem, Edward Connery, ed. *The Poetry of Robert Frost.* New York: Holt, Rinehart and Winston, 1969.

LePatner, Barry B., and Johnson, Sidney M. *Structural and Foundation Failures: A Casebook for Architects, Engineers, and Lawyers.* New York: McGraw - Hill Book Company, 1982.

Luckhurst, Kenneth W. *The Story of Exhibitions.* London: Studio Publications, 1951.

MacGregor, J. G. "The Structural design Process," *Introductory Report of the Twelfth Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering,* Vancouver, September 1984, pp. 1-12.

McKaig, Thomas K. *Building Failures: Case Studies in Construction and Design.* New York: McGraw - Hill Book Company, 1962.

Mainstone, Rowland. *Developments in Structural Form.* Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1975.

Mark, Robert. *Experiments in Gothic Structure.* Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1982.

Marshall, R. D., et al. *Investigation of the Kansas City Hyatt Regency walkways Collapse.* (NBS Building Science Series 143.) Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982.

McCullough, David. *The Great Bridge.* New York: Simon and Schuster, 1972.

Mock, Elizabeth B. *The Architecture of Bridges.* New York: The Museum of Modern Art, 1949.

Morse, Samuel French, ed. *Poems of Wallace Stevens.* New York: Vintage Books, 1959.

Nervi, Pier Luigi. *Structures.* Translated By Giuseppina and Mario salvadori. New York: F. Dodge Corporation, 1956.

Orenstein, Glenn S. "Instant Expertise: A Danger of Small Computers," *Civil Engineering,* 54 (June 1984) pp. 50-51.

Osgood, Carl C. *Fatigue Design.* Second edition. Oxford: Pergamon Press, 1982.

Owen, N. B., Turner, C. E., and Irving, P. E. "The Failure of the Quarter Bells Chiming Mechanism of the Great Clock, Palace of Westminster," *Big Ben – Its Engineering Past and Future.* London: The Institution of Mechanical Engineers, 1981, pp. B1-B28.

Perrow, Charles. *Normal Accidents: Living with High - Risk Technologies.* New York: Basic books, 1984.

Petroski, Henry. "Reflections on a Slide Rule, " *Technology Review,* 84 (February/March 1981), pp. 34-35.

--- . "When Cracks Become Breakthroughs," *Technology Review, 85 (August/September 1982), pp. 18-30.*

--- . "On 19th Century Perceptions of Iron Bridge Failures," *Technology and Culture,* 24 (1983), pp. 655-659.

--- . "The Details, Oh, the Details, " *The Washington Post,* November 10, 1982, Sect. A, p. 31.

--- . "The Amazing Crystal Palace," *Technoloy Review,* 86 (July 1983), pp. 18-28.

--- . "Offshore Engineering: Oil from Troubled Waters," *Technology Review,* 87 (July 1984), pp. 52-61, 76.

Plowden, David. *Bridges: The Spans of North America.* New York: The Viking Press, 1974.

Provenzo, Eugene F., Jr., and Brett, Arlene. *The Complete Block Book.* Syracuse, N. Y.: Syracuse University Press, 1983.

Pugsley, Sir Alfred. *The Safety of Structures.* London: Edward Arnold, 1966.

Pye, David. *The Nature and Aesthetics of Design.* New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1978.

Rosenfield, A. R. "The Crack in the Liberty Bell," *International Journal of Fracture,* 12 (1976), pp. 791-797.

Ross, Steven S. *Construction Disasters: Design Failures, Causes, and Prevention.* New York: McGraw - Hill Book Company, 1984.

Salvadori, Mario. *Why Buildings Stand Up: The Strength of Architecture.* New York: McGraw - Hill Book Company, 1982.

Salvadori, Mario, and Tempel, Michael. *Architecture and Engineering: an Illustrated Teacher's Manual on Why Buildings Stand Up.* New York : The New York Academy of Sciences, 1983.

Sandstrom, Gosta E. *Man the Builder.* New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

Schmid, Herman, and Busch, David S. "An Electronic Digital Slide Rule," *The Electronic Engineer,* 27 (July 1968), pp. 54-64.

Scott, Quinta, and Miller, Howard S. *The Eads Bridge.* Columbia: University of Missouri Press, 1979.

Selected Papers from the First National Conference on Civil Engineering: History, Heritage, and the Humanities. Two Volumes. Princeton, N. J.: Princeton University, 1970.

Shute, Nevil. *No Highway.* New York: William Morrow & Co., 1948.

Silby, P. G., and Walker, A. C. "Structural Accidents and Their Caues," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers,* Part 1, 62 (May 1977), pp. 191-208.

Smith, Cyril Stanley. A *History of Metallography: The Development of Ideas on Structure of Metals before 1890.* Chicago: The University of Chicago Press, 1960.

Smith, Denis. "The Use of Models in Nineteenth Century British Suspension Bridge Design," *History of Technology: Second Annual Volume, 1977,* pp. 169-214.

Smith, H. Shirley. *The World's Great Bridges.* New York: Harper & Brothers, 1953.

Smith, Julian. *Nevil Shute (Nevil Shute Norway).* Boston:

Twayne Publishers, 1976.

Sporn, Philip. *Foundations of Engineering.* New York: The Macmillan Company, 1964.

Steinman, D.B. *The Builders of the Bridge: The Story of John Roebling and His Son.* Second Edition. New York: Harcourt, Brace and Company, 1950.

--- . *A Practical Treatise on Suspension Bridges: Their Design, Construction and Erection.* Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1929.

Straub, Hans. *A History of Civil Engineering: An Outline From Ancient to Modern Times.* Translated by E. Rockwell. London: Leonard Hill Limited, 1952.

Talese, Gay. *The Bridge.* New York: Harper & Row, 1964.

Tedesko, Anton. "How Have Concrete Shell Structures Performed? An Engineer Looks Back at Years of Experience With Shells," *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures,* 21 (August 1980), PP. 3-13.

Tedesko, A., and Billington, D. P. "The Engineer's Personality and the Influence It Has on His Work -- A Historical Perspective," *Concrete International: Design and Construction,* 4 (December 1982), pp. 20-26.

Thompson, D'Arcy Wentworth. *On Growth and Form.* New Edition. Cambridge: The University Press, 1944.

Timoshenko, Stephen P. *History of Strength of Materials: With a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures.* New York: McGraw - Hill Book Company, 1953.

Torroja, Eduardo. *Philosophy of Structures.* Translated by J. J. Polivka and Milos Polivka. Berkeley: University of California Press, 1962.

--- . *The Structures of Eduardo Torroja: An Autobiography of Engineering Accomplishment.* New York: F. W. Dodge Corporation, 1958.

Trachtenberg, Alan. *Brooklyn Bridge: Fact and Symbol.* New York: Oxford University Press, 1965.

U. S. House of Representatives Committee on Science and Technology. *Structural Failures: Hearings Before the Sub-committee on Investigations and Oversight.* Washington, D. C.: Government Printing Office, 1983.

--- . *Structural Failures in Public Facilities.* Washington, D. C.: Government Printing Office, 1984.

Vannoy, Donald W. "20/20 Hindsight with the Aid of a Computer," *Professional Engineer,* 53 (Winter 1983), pp.

21-25.

Vose, George L. *Bridge Disasters in America: The Cause and the Remedy.* Boston: Lee and Shepard, 1887.

Watson, Wilbur J., and Watson, Sara Ruth. *Bridges in History and Legend.* Cleveland, Ohio: J. H. Jansen, 1937.

Werner, Ernst. *Der Kristallpalast zu London 1851.* Dusseldorf: Werner - Verlag, 1970.

Whipple, S. *An Elementary and Practical Treatise on Bridge Building.* Fourth Edition. New York: D. Van Nostrand, 1883.

Whyte, R. R., ed. *Engineering Progress through Trouble.* London: The Institution of Mechanical Engineers, 1975.

Zetlin, Lev, Associates. *Report of the Engineering Investigation Concerning the Causes of the Collapse of the Hartford Coliseum Space Truss Roof on January 18, 1978.* New York: Lev Zetlin Associates, 1978.

Zuk, William. *Concepts of Structure.* New York: Reinhold Publishing Corporation, 1963.

فهرست راهنما

آبارههای رومی، ۱۰۱
آدامز، هنری، ۸۶ ، ۳۱۷
آدیسون، جوزف، ۱۰۹-۱۰۷
آیین‌نامه‌های ساختمانی ۱۳۲-۱۳۱
آزمایش با اشعه ایکس، ۱۶۷
آزمایش با امواج فراصوتی، ۱۶۷
آزمایش با ذرات مغناطیسی، ۱۶۷
آزمایشگاه بتل کلمبوس، ۲۲
آزمایشگاه هوانوردی دانیل گوگنهایم، ۲۳۷
آسمانخراش (برن)، ۳۰۶-۳۰۵
آلبرت، شاهزاده انگلستان، ۲۰۳ ، ۲۰۸
آموزش طب (هاکسلی)، ۱۲۷
آهن، در پل‌ها، ۸۸ ، ۱۰۹-۱۰۲
آی بی ام، ساختمان، ۲۲۱
اتوبوس گرومان فلکسیبل، ۱۸۶-۱۸۲، ۱۹۶ ، ۳۱۲ ، ۳۱۳
ادیسون، توماس، ۴۹
ارقام با معنی، ۲۷۲
ازگود، کارل، ۱۶۲
استراکچرال انجینیر، ۶۵
استونسن، رابرت، ۱۵۲ ، ۲۰۵، ۲۳۳-۲۳۲ ، ۳۱۹
استیونز، والس، ۱۲۳
اسپکتیتور، ۱۰۷
اشتیولا، اوهایو، خرابی پل در، ۱۰۶
اشتینمن، دیوید، ۲۴۲-۲۴۱
الکترونیک انجینیر، ۲۷۴
الکساندر کیلند، ۲۵۳-۲۴۷ ، ۲۶۸
دلایل خرابی، ۲۵۱-۲۴۹
طراحی و کاربرد، ۲۴۹-۲۴۷
امّان، اتمار، ۱۱۵ ، ۲۳۵-۲۳۴
امپایر استیت، ساختمان، ۲۲۱
امرسون، رالف والدو، ۹۰
انجمن تاریخ تکنولوژی، ۱۰۵
انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا، ۱۰۶، ۲۹۱-۲۹۰ ، ۳۰۲ ، ۳۱۹
انجمن مهندسان راه و ساختمان انگلستان، ۲۱۸ ، ۳۱۹
انجمن مهندسان سازه آمریکا، ۳۱۹

انجمن مهندسان سازه انگلستان، ۶۵ ، ۳۱۹
انجمن هنر، انگلستان، ۲۰۲
انجینیرینگ نیوز رکورد، ۱۳۵-۱۳۴ ، ۲۳۸ ، ۳۰۳
اندام انسانی، به منزله شاهکار مهندسی، ۴۰-۲۹
انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا، ۲۳۸
اوتیس، الیشا، ۲۱۶
اولیس (جویس)، ۱۱۸-۱۱۷
اوهیر، فرودگاه، ۱۴۳
اوید، ۲۶۷-۲۶۶
ایدز، پل، ۲۲۹-۲۲۷ ، ۳۱۸
ایدز، جیمز، ۲۲۸
ایراسپید، شرکت هواپیمایی، ۲۶۰
ایکاروس، ۲۶۷-۲۶۵ ، ۳۱۰-۳۰۹
ایلاستریتد لندن نیوز، ۹۳ ، ۲۰۳ ، ۲۰۵ ، ۲۱۰
ایمنی، ۲۰، ۶۷-۶۶
هم رک ضریب اطمینان
ایمهوتپ، ۸۵
اینشتین، آلبرت، ۶۹
اینفومارت، ۲۲۲-۲۲۱

بارلو، پیتر، ۲۰۵
بارلی، استیون، ۲۶۷-۲۶۴
باری، چارلز، ۲۱۳
بانیان، جان، ۹۲
بتل کلمبوس، آزمایشگاه، ۲۲
بتلهام، برونو، ۳۸
برانکس واتیستون، پل، ۲۳۴ ، ۲۳۶
برج ایفل، ۲۲۸ ، ۲۴۴
برن، رابرت، ۳۰۵
برنامه آنالیز سازه‌ای (SAP) ، ۲۸۰
بروکلین، پل، ۱۱۵
هم رک پل بروکلین
برونل، ایزامبارد کینگدام، ۱۵۲
بریتانیا، پل، ۱۵۲ ، ۲۰۵ ، ۲۳۲
بلاکلی، د. ای، ۲۹۸-۲۹۷
بنای یادبود واشینگتن، ۱۵۳-۱۵۲
بنیاد ملی علوم، آمریکا، ۳۰۲
بووی، کلیسای جامع، ۸۷
بوئینگ، شرکت، ۲۵۹
بیداری فینگان (جویس)، ۱۱۸-۱۱۷
بیگ بن، ۱۶۱
بیلینگتن، دیوید، ۱۲۴ ، ۱۵۲

پاگسلی، آلفرد، ۲۶۳ ، ۳۱۶
پانچ ، ۹۳ ، ۱۰۹-۱۰۷ ، ۲۰۹ ، ۲۱۱
پای، دیوید، ۳۱۲-۳۱۱
پرنت، ۷۹
پکستون، جوزف، ۲۰۱-۲۰۰ ، ۲۰۸-۲۰۴ ، ۲۱۴ ، ۲۲۰-۲۱۶
پل :
تاریخچه، ۱۰۹-۱۰۱
شکستهای اولیه، ۸۸ ، ۸۹ ، ۹۱
شکستهای جدید، ۱۴۲-۱۳۹
هم رک پلهای راه‌آهن، پلهای معلق

پل آهنی (کول بروکدیل)، ۱۰۲ ، ۳۱۸
پل ایدز، ۲۲۹-۲۲۷ ، ۳۱۸
پل برانکس وایتستون، ۲۳۴ ، ۲۳۶
پل بروکلین، ۱۱۵
اهمیت سمبلیک، ۲۲۷ ، ۲۳۰ ، ۲۳۲
۲۴۴ ، ۳۱۸
سلامت سازه‌ای، ۷۲ ، ۲۳۲ ، ۲۴۲
طراحی و ساخت، ۲۳۳-۲۲۷
پل بریتانیا، ۱۵۲ ، ۲۰۵ ، ۲۳۲
پل تاکوما نروز، ۱۳ ، ۱۶ ، ۷۱ ، ۱۰۵
۱۲۱ ، ۱۸۵ ، ۳۲۱
دلایل شکست، ۲۴۱-۲۳۵
طراحی، ۲۳۵
پل تی، ۱۰۵
پل جورج واشینگتن، ۲۳۴
پل رودخانه ماین، ۲۳۰
پل سورن، ۲۴۳-۲۴۲
پل سین‌سیناتی، ۲۳۲ ، ۲۳۳
پل کبک، ۱۰۵
پل معلق تنگه منای، ۲۴۱
پل معلق ویلینگ، ۲۳۹
پل مکیناک، ۲۴۲
پل میانوس، ۱۴۱-۱۳۹ ، ۱۴۲
پل نقره‌ای، ۱۴۲-۱۴۱
پل نیاگارا، ۲۳۳-۲۳۲
پل ورازانو نروز، ۱۱۵ ، ۱۸۱
پل‌های راه‌آهن :
خرابی، ۹۱-۸۸ ، ۱۰۰-۱۰۲ ، ۲۰۲
کاربرد آهن، ۸۸ ، ۱۰۹-۱۰۲
واکنش اجتماع، ۹۴-۹۰ ،
۱۰۹-۱۰۶
پل‌های معلق :
تاریخچه، ۲۳۴-۲۲۷
خرابی، ۲۴۱-۲۳۵
ناپایداری آیرودینامیکی، ۲۳۹-۲۳۵
تاکوما، پل،
رک پل تاکوما
تایمز ، ۲۰۳
تتان، سد، ۷۱ ، ۳۲۱
تدسکو، آنتون، ۱۲۶-۱۲۵
ترک خستگی، ۱۹۷-۱۵۹
آزمایش، ۱۶۸-۱۶۴
آنالیز، ۱۹۷-۱۸۶
جلوگیری، ۱۷۰-۱۶۴
در نیروگاههای هسته‌ای، ۱۷۵-۱۷۰
مکانیزم، ۱۶۴-۱۶۱
نمونه‌ها، ۱۶۱ ، ۱۸۳ ، ۱۸۶
ترک خوردگی تنشی، ۱۹۵
در نیروگاههای هسته‌ای، ۱۷۶-۱۷۵
تشدید سازه‌ای، ۲۳۱
تری مایل آیلند، حادثه در، ۱۳
تکزاس اینسترومنتز، ۴۳ ، ۲۷۶-۲۷۵
تکنولوژی اند کالچر ، ۱۰۵
تکنولوژی ریویو ۴۴ ، ۱۳۵ ، ۳۲۱
تنیل، جان، ۱۰۶ ، ۱۰۹ ، ۲۱۱
تی، پل، ۱۰۵
تیر :

تعریف، ۷۳-۷۲
خمش، ۷۳ ، ۸۰
طرحهای، ۸۰-۷۹
کمانش، ۷٤
مقاومت، ۸۰-۷۹

جان هنکاک، ساختمان، ۳۰۱
جایزه مید، ۲۹۱-۲۹۰
جورج واشینگتن، پل، ۲۳٤
جونز، اوئن، ۲۱۳-۲۱۲ ، ۲۱۹
جویس، جیمز، ۱۱۸-۱۱۷

حادثه تری مایل آیلند، ۱۳
حمورابی، قانون، ۱۷-۱٦
حوادث اتومبیل، ۱۸
حیات عقل (سانتایانا)، ۳۲۳

خستگی :
احتمال، ٤٦-٤۱ ، ۵۰ ، ۵۳
در پلهای راه‌آهن، ۱۰٤
طراحی، ٤۷-٤۵
خطای انسانی، در شکستهای مهندسی، ۲۹۵-۲۹۳ ، ۳۰۰-۲۹۸ ، ۳۰٦-۳۰۵
خطای طراحی، در شکستهای ساختمانی، ۳۰۰-۲۹۸
خط کش محاسبه، ۲۷۷-۲۷۱

داشور، هرم، ۸٦-۸۵
دالاس، مرکز تجاری، ۲۲۲
دام دام، فرودگاه، ۲۵۳
دانشگاه تکزاس، ۲۷۵
دانشگاه دوک، ۱۲٦
دانشگاه پرینستون، ۱۵۲ ، ۲۳۷
دانشگاه مریلند، ۳۰۲
دانشگاه واشینگتن، ۲۳۷
ددالوس، ۲٦۷-۲٦۵ ، ۳۱۰-۳۰۹
دکلهای دریایی، ۲۵۳-۲٤۷
در ساحل (شوت)، ۲٦۰
دمای مبنا، ۱۷۱ ، ۱۷٤-۱۷۳
دنور، پوسته سهموی در، ۱۲٦
دهاویلند، جفری، ۲۱۷ ، ۲۵۸
دهاویلند، شرکت هواپیمایی، ۲۵۹
دهاویلند کامت، ۲٦٤-۲۵۳ ، ۲٦۹ ، ۲۹۳ ، ۲۹۹
دلایل شکست، ۲۵۸-۲۵۵
سقوط، ۲۵٤-۲۵۳
موفقیت نهایی، ۲۵۹-۲۵۸
دیکسن، ایلینویز، خرابی پل در، ۱۰٦
دیکنز، چارلز، ۲۱۹

راس، استیون، ۳۰٤
راسکین، جان، ۲۰۲
« راه‌آهن آسمانی » (هاثرن)، ۹۵-۹۲
راه‌آهن بزرگ غرب، ۱۵۲
ردیابی حوادث هوایی (بارلی)، ۲٦٤
روبرتز-آستین، ویلیام چندلر، ۱۹۱
روبلینگ، امیلی، ۲٤۱

روبلینگ، جان، ۲۲۸ ، ۲۳۳-۲۳۲ ، ۲۴۱
روبلینگ، واشینگتن، ۱۱۵ ، ۲۲۸ ، ۲۳۱ ، ۲۴۱
رود وین، پل بر روی، ۱۲۴
روش علمی، ۶۷ ، ۹۵
" رویای میرزا " (آدیسون)، ۱۰۹-۱۰۷
ریچ، فرانک، ۱۱۵
ریدرز دایجست، ۳۲۲

زوسر، ۸۵
زنون، ۲۱
زووس، پل در، ۱۲۴

ژرژ پمپیدو، مرکز فرهنگی هنری، ۲۲۱

ساختمان امپایر استیت، ۲۲۶ ، ۳۱۸
ساختمان آی بی ام، ۲۲۱
ساختمان جان هنکاک، ۳۰۱
ساختمان سیگرام، ۲۲۱
ساختمان لیور، ۲۲۱
سازمان هوانوردی آمریکا، ۱۹
سالازار، آلبرتو، ۱۸۲-۱۸۱
سانتایانا، جورج، ۳۲۵-۳۲۱
ساوالاس، تلی، ۱۸۴
سد تتان، ۷۱ ، ۳۲۱
سفر زائران (بانیان)، ۹۲
سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰ (شیکاگو)، ۱۳ ، ۱۹ ، ۴۸ ، ۱۵۶
تأثیرات، ۱۰۹ ، ۱۴۵-۱۴۴
دلایل، ۱۴۴-۱۴۳ ، ۱۶۶ ، ۲۶۸ ، ۲۹۹
سن پاول، کلیسای جامع، ۲۰۳
سن لوئیز، فرودگاه در، ۱۲۶-۱۲۵
سوانح هوایی، ۱۹ ، ۲۶۴-۲۵۳
هم رك سقوط هواپیمای دی‌سی- ۱۰
سورن، پل، ۲۴۳-۲۴۲
سیتورپ، چارلز، ۲۰۴ ، ۲۱۵
سیگرام، ساختمان، ۲۲۱
سین‌سیناتی، پل، ۲۳۲ ، ۲۳۳

شاهکارهای نمایش، ۲۶۰
شرکت هواپیمایی آمریکن، ۱۳
شرکت هواپیمایی ایراسپید، ۲۶۰
شرکت بوئینگ، ۲۵۹
شرکت هواپیمایی دهاویلند، ۲۵۹
شکست‌های ساختمانی (مک‌کیگ)، ۲۹۶-۲۹۴ ، ۳۰۳
شکست‌های مهندسی :
اجتناب ناپذیری، ۲۷-۲۵ ، ۵۴-۵۱ ، ۲۷۰-۲۶۸
احتمال، ۱۸ ، ۵۳ ، ۷۱-۷۰ ، ۷۲ ، ۱۱۰
انتشار اطلاعات، ۳۰۴-۳۰۰ ، ۳۰۷-۳۰۶ ، ۳۲۰-۳۱۹ ، ۳۲۵-۳۲۴
بررسی، ۲۷۰-۲۵۰
پیش‌بینی، ۴۹ ، ۲۶۸ ، ۲۹۶ ، ۲۹۸

۳۱٤
جلوگیری، ۲۹٦ ، ۳۰۰
خستگی، ۵۳-٤۱
خطاهای طراحی، ۲۹۹-۲۹۸
خطای انسانی، ۲۹۵-۲۹۳ ،
۳۰۰-۲۹۸ ، ۳۰٦-۳۰۵
درس‌آموزی، ۹۲-۸۳ ، ۹٦-۹٤ ،
۱۱۵ ، ۱۱۹ ، ۱۲۷-۱۲۳ ،
۱٤۵-۱٤٤ ، ۱۵۸-۱۵۷ ، ۱۷۹ ،
۲۵۸ ، ۳۲۰-۳۱۸ ، ۳۲۵-۳۲٤
دلایل، ۲۹۵-۲۹۳ ، ۳۰۰-۲۹۷
ضریب اطمینان، ۱۵۰ ، ۱۵۵-۱۵٤
طبیعت تناوبی، ۱۵۱ ، ۳۱۸-۳۱۷
فرضیه‌های مردود، ۷۲-۷۰
مسیرهای جایگزین انتقال نیرو، ۱۳۸
مقایسه در تولید انبوه و موارد
انفرادی، ٤۸
هزینه، ۲۳-۲۱
شوت، نویل، ۲٦٤-۲۵۹ ، ۳۰٤
شهر ویران (شوت)، ۲٦۰
شهری به نام آلیس (شوت)، ۲٦۰

ضریب اطمینان، ۱۷۰
در هتل هایت ریجنسی، ۱۵۳
کاهش، ۲۸۷
محاسبه، ۱۵۳-۱٤۸
هدف، ۱٤۸-۱٤۷

طراحی :
انتخاب‌ها، ۱۰۰ ، ۱۱۲-۱۱۰ ، ۱۲۱
تجدیدنظر، ۱۱۳ ، ۱۱۸ ، ۱۲۷-۱۲۵
تجربه، ۱۰۲-۱۰۰ ، ۱۵۵ ، ۱۵۷ ،
۳۱۵-۳۱٤
خستگی، ٤۸-٤۵
خطرپذیری، ۱۵۹ ، ۳۱۸-۳۱۷
سازش نهفته، ۳۱۳-۳۰۹
سعی و خطا، ۹۱-۸۳ ، ۹٦-۹۵
ضریب اطمینان، ۱٤۸-۱٤۷
عمر سازه، ۵۵-۵۳
فرضیه‌های علمی، ۷۲-٦۹ ، ۹۵
نقش شکست، ۹٦-۹۵، ۱۱۹ ،
۱۲۷-۱۲٤ ، ۱٤۵-۱٤٤ ، ۱۵۷ ،
۱۷۹ ، ۲۵۸ ، ۲۹٦ ، ۳۱۳ ،
۳۲۵
نیروهای مقاوم، ٦۷-٦٦
طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)،
۲۸۰
طراحی خستگی (ازگود)، ۱٦۲
طراحی دستبالا، ۱۱۱ ، ۱۵۱ ، ۱٦۵ ،
۲۷۹

علم، مهندسی به منزله، ٦٦-٦۵ ، ۷۸ ،
۹۵ ، ۱۲۰

فاجعه‌های ساختمانی (راس)، ۳۰٤
فاکس، چارلز، ۱۵۲
فراست، رابرت، ۱۱۱
فربرن، ویلیام، ۲۳۳

فرضیهٔ نسبیت، ۶۹
فرضیه‌های علمی :
آزمایش، ۷۲-۶۷ ، ۷۶-۷۵ ،
۸۱-۸۰ ، ۱۲۱ ، ۱۵۶
خلق، ۶۸-۶۷
طراحی و، ۷۲-۶۹ ، ۹۵
فرودگاه اوهیر (شیکاگو)، ۱۴۳
فرودگاه دام دام (کلکته)، ۲۵۳
فرودگاه سن لوئیز، ۱۲۶-۱۲۵
فرهنگ انگلیسی آکسفورد، ۹۴
فرهنگ نقل قول‌های آکسفورد،
۳۲۵-۳۲۳
فولاد ضدزنگ، ۱۹۲-۱۹۱ ، ۱۹۵
فیوچرز گروپ، ۲۷۶

قانون حمورابی، ۱۷-۱۶
قانون مورفی، ۵۰ ، ۲۲۸

کارمن، تئودور فون، ۲۳۷
کامپیوتر :
آزمایش، ۲۸۷-۲۸۶
استفاده اشتباه، ۲۷۷ ، ۲۸۰ ،
۲۹۱-۲۸۴
تأثیر در مهندسی، ۲۷۹-۲۷۸
نقایص، ۲۸۳-۲۸۱
کانزاس سیتی استار، ۱۳۰
کبک، پل، ۱۰۵
کریستال پالاس، ۱۵۲ ، ۲۲۶-۱۹۹ ،
۲۳۰ ، ۳۱۸
تأثیر در معماری مدرن، ۲۱۵ ،
۲۲۶-۲۱۹
تخریب، ۱۲۷
تزیین، ۲۱۳-۲۱۲
الهام، ۲۰۱-۲۰۰
ساخت، ۲۰۸-۲۰۶
ساخت در سیدنهام، ۲۱۷-۲۱۶
طراحی، ۲۰۵-۲۰۴ ، ۲۰۸-۲۰۷
ملاحظات ایمنی، ۲۱۲-۲۰۹
کریستال پالاس سیدنهام، ۲۱۷-۲۱۶
کشتی‌های بخار، پل‌ها و راه‌آهن
(وردزورث)، ۹۱
کشتی‌های لیبرتی، ۱۷۲-۱۷۱
کلیسای جامع سن پاول، ۲۰۳
کمودور، ۲۷۵
کمیته آیین‌نامه بتن کانادا، ۲۸۹
کمیته انرژی اتمی، ۱۷۰
کمیته مشورتی حفاظت هسته‌ای، ۱۷۰
کوفل و اسر (کی ای)، ۲۷۷-۲۷۱
کول، هنری، ۲۰۲
کول بروکدیل، پل آهنی در، ۱۰۲ ، ۳۱۴

گالیله، ۸۲-۷۸
گرومان فلکسیبل، اتوبوس، ۱۸۶-۱۸۲ ،
۱۹۶ ، ۳۱۲ ، ۳۱۳
گروواله، مارتین، ۲۲۳-۲۲۱
گریلی، هوریس، ۲۱۳
گسیختگی ترد، ۱۶۲ ، ۱۷۲-۱۷۱
گلیسون، جکی، ۱۸۴

گنجینه نقل قول‌های جدید ریدرز دایجست، ۳۲۲
گور، آلبرت، ۳۰۱

لپتنر، بری، ۳۰۱
لیبرتی، کشتی، ۱۷۲-۱۷۱
لیور، ساختمان، ۲۲۱

مارشال، جان، ۱۶۰
مارک، رابرت، ۸۷
ماشین حساب، ۲۷۸-۲۷٤
ماهیت طراحی و ایمنی سازه‌ها (بلاکلی)، ۲۹۷
مایز وان در روهه، لودویک، ۲۲۱
مایز، پل، ۲۳۰
محاوراتی در باب دو علم جدید (گالیله)، ۷۸
مدرسه طبی هاروارد، ۵۱
مدرسه مهندسی کریستال پالاس، ۲۱۷
مردی که از آینده خبر داشت (واگنر)، ۱۱٤
مرکز اجتماعات هارتفورد، ۲۸۵-۲۸٤، ۲۸۷
مرکز اطلاع رسانی معماری و مهندسی، ۳۰۳-۳۰۲
مرکز تجاری دالاس، ۲۲۲
مرکز فرهنگی هنری ژرژ پمپیدو، ۲۲۱
مرکز گردهمایی نیویورک، ۲۲۵-۲۲۳
مسابقه دو مارتن نیویورک، ۱۸۲-۱۸۱
" مسری بودن تب زایمان " (هولمز)، ۵۱
مصطبه، ۸۵
" معجزه خادم " (هولمز)، ۵۲، ٦٤-۵۹
۳۰٤
مک دانل داگلاس، ۱۸۵، ۲۵۲
مک کیگ، توماس، ۲۹٦-۲۹٤، ۲۹۸، ۳۰۳
مک گرگور، جیمز، ۲۹۰-۲۸۹
مکیناک، پل، ۲٤۲
منای، پل، ۲٤۱
مورفی، قانون، ۵۰، ۲۲۸
مؤسسه آهن و فولاد آمریکا، ۱۹۱
مؤسسه ملی استاندارد آمریکا، ۲۲، ۱۳۱، ۱۳۳، ۱۵۳، ۳۰۱-۳۰۰
مؤسسه هواپیمایی سلطنتی فارنبرو، ۲۵٦-۲۵٤، ۲٦۳
مون سن میشل و شارت (آدامز)، ۳۱۷
مهندسان :
به منزله شاعران، ۱۲۵-۱۲۲
تعریف، ۹٤
جایزالخطا بودن، ۸۲
خلاقیت، ۱۲۰-۱۱۹
مسئولیت‌ها، ۸۲
مهندسی :
به منزله علم، ٦٦-٦۵، ۷۸، ۹٤، ۱۲۰
به منزله هنر، ٦٦-٦۵، ۱۲۰
در طبیعت انسانی، ٤۰-۲۹
قانونی، ۲۷۰-۲۵۳

هدف، ۲٤
میانوس، پل، ۱٤۱-۱۳۹ ، ۱٤۲
میلارت، رابرت، ۱۱۲ ، ۱۲٤-۱۲۲

ناقوس آزادی، ۱٦۱-۱۵۹ ، ۱٦٤
نقره‌ای، پل، ۱٤۲-۱٤۱
نقل قول‌های شنیدنی بارتلت، ۳۲۲ ، ۳۲۵
No Highwary (شوت)، ۲٦٤-۲٦۱ ، ۳۰٤
نیاگارا، پل، ۲۳۳-۲۳۲
نیروگاه‌های برق هسته‌ای :
ترک‌های خستگی، ۱۷٤-۱۷۰
ترک خوردگی تنشی، ۱۷۵-۱۷٤
ضرایب اطمینان، ۱۷۷-۱۷٦
نیوتن، ایساک، ٦۹
نیویورک، شکست لوله اصلی آب (۱۹۸۳)، ۲۳-۲۲
نیویورک تایمز، ۱۱۵ ، ۱۸۵
نیویورک، مرکز گردهمایی، ۲۲۵-۲۲۲
واشینگتن پست ، ۳۲٤
واشینگتن، جورج، ۱٦۱
واگنر، تری، ۱۱٤
ورازانو، پل، ۱۱۵ ، ۱۸۱
وردزورث، ویلیام، ۹۱-۹۰ ، ۹۳
ویکتوریا، ملکه انگلستان، ۱۰۳ ، ۱۱۰ ، ۲۱۰ ، ۲۱٤
ویلینگ اینتلیجنسر، ۲۳۹
ویلینگ، پل، ۲۳۹
هاثرن، ناتانیل، ۹۵-۹۲ ، ۱۰۹
هارپرز ، ۹۳ ، ۱۰٦
هارتفورد، مرکز اجتماعات، ۲۸۵-۲۸٤ ۲۸۷
هاکسلی، توماس هنری، ۱۲۷
هاوس هولد ووردز ، ۲۱۸
هتل هایت ریجنسی (شیکاگو)، ۱۳۸
هتل هایت ریجنسی (کانزاس)، ۱۳ ، ٤۸ ، ۷۱ ، ۱۰۹ ، ۱۳۹-۱۲۹، ۱۸۵ ، ۲۳۱ ، ۲٦۸ ، ۲۹۳ ، ۲۹۹
اقدامات حقوقی، ۱۷ ، ۱۳۷
تخطی از آیین نامه ساختمانی، ۱۷ ، ۱۳۱-۱۳۰
تلفات، ۱۲۹
ضریب اطمینان، ۱۵۳
طراحی راهروهای معلق، ۱۳۸-۱۳۰ ، ۱٤۲ ، ۱۵۵-۱۵۳
هرم داشور، ۸٦-۸۵
هرم شکسته، ۸٦
هرم میدوم، ۸۵
هنبیک، فرانسوا، ۱۲٤
هنر، مهندسی به منزلهٔ، ٦٦-٦۵ ، ۱۲۰
هولمز، اولیور وندل، ۵۳-۵۱ ، ٦٤-۵۹ ، ۳۰٤
هوور، هربرت، ۳۰۸-۳۰۷

انتشار سمور

ISBN 964-6208-28-2 شابک ۲-۲۸-۶۲۰۸-۹۶۴

قیمت : ۱۲۰۰ تومان