دانش مقاومت مصالح در گذر زمان

رضا شاه‌سیاه
استادیار بخش مهندسی مکانیک
دانشکدهٔ فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی
rez.shahsiah@iauctb.ac.ir

پونسله[1] به‌دلیل ارائهٔ طرح‌های کاربردی، که در زمان او در مورد پل‌های معلق انجام می‌شد، آثار دینامیکی را با جزئیات بیشتری مطالعه کرد. وی با استفاده از نمودارهای حاصل از آزمایش‌هایش نشان داد که تا حد بازگشت‌پذیری، یک میلهٔ آهنی می‌تواند مقدار اندکی انرژی جنبشی را جذب کند و شرایط به‌وجود آمده با ضربه به آسانی قادر است مقدار زیادی انرژی در آن جذب کند. وی برای قسمت‌هایی از سازه که تحت ضربه قرار می‌گیرند توصیه کرد که از آهن نرم، که تغییر طولش زیاد بوده و بدون گسیختگی قادر است انرژی بالاطی جذب کند، استفاده شود. او به‌صورت تحلیلی اثبات کرد که اعمال یک بار ناگهانی، تنشی دو برابر بار تدریجی ایجاد می‌کند. او روی اثر ضربهٔ طولی و همچنین ارتعاشات طولی میله‌ها در اثر ضربه تحقیق کرد و نشان داد که اگر یک نیروی ضربانی (نیروی ضربه که در فواصل زمانی مشخصی تکرار می‌شود) روی یک میلهٔ بارگذاری‌شده عمل کند، دامنهٔ ارتعاشات اجباری تحت شرایط تشدید می‌تواند تقویت شود و به‌همین دلیل راهپیمایی گروهان سربازان روی یک پل معلق می‌تواند خطرناک باشد.

آزمایش‌های ساوار[2]، فیزیکدان شهیر فرانسوی، روی ارتعاشات طولی میله‌ها نیز در بردارندهٔ نکات جالب توجهی بود. او نشان داد که دامنه‌ها و تنش‌های بزرگ تولیدشده در اثر ارتعاشات می‌توانند با نیروهای اصطکاکی کوچکی که در امتداد سطوح داخل جسم عمل می‌کنند، به‌وجود آیند. در کتاب *مکانیک صنعتی* نوشتهٔ پونسله، مفهوم خستگی فلزات به‌صورت دوره‌هایی که تنش تکرار شده، عنوان شده است.

شکل ۱. ژان ویکتور پونسله
ریاضی‌دان، مهندس و فیزیک‌دان شهیر فرانسوی

او در این اثر بیان می‌کند که تحت اعمال کشش و فشار متناوب، اغلب فنرها با خستگی گسیخته می‌شوند. از پونسله تعدادی دست‌نوشته برآمده از سخنرانی‌هایش در دانشگاه سوربون[3] برجای مانده است که البته هیچ‌گاه چاپ نشده‌اند و بیانگر این واقعیت‌اند که او اثر نیروی برشی را در رابطهٔ خیز تیرها منظور کرده است. البته افرادی چون سن‌ونان[4]، ریاضی‌دان فرانسوی، به این سخنرانی های چاپ‌نشده در

آثارش اشاره داشتند. رابطه‌ای که او به‌دست آورده نشان‌دهندهٔ آن است که تنها برای تیرهای کوتاه اثر نیروی برشی قابل ملاحظه است. پونسله به بحث انتخاب تنش‌های ایمن برای کارکرد صحیح ماشین‌ها و سازه‌ها علاقمند بود و نظریهٔ کرنش (تغییر شکل بدون بعد) بیشینه را ارائه و بیان کرد که گسیختگی وقتی اتفاق می‌افتد که کرنش بیشینه به حد مشخصی برسد. بدین‌صورت برای گسیختگی مواد ترد مانند سنگ و چدن تحت فشار، انبساط جانبی باید زیاد شود. نظریهٔ بیشینهٔ کرنش، بعدها توسط سن‌ونان استفاده شد و در انگلستان توسعه یافت و این در حالی بود که مهندسان انگلیسی، مبنای محاسبات طراحی را تا آن زمان بیشینهٔ تنش قرار داده بودند.

تحقیقات پونسله نظریهٔ سازه‌ها را نیز دربر می‌گرفت. در شرح پایداری دیوارهای نگه‌دارنده، او روشی ترسیمی برای یافتن فشار بیشینه روی دیوار پیشنهاد کرد. در ارتباط با تنش‌ها در قوس‌نماها یا طاق‌ضربی‌ها، او نخستین کسی بود که اشاره کرد، یک تحلیل تنش منطقی با در نظر گرفتن قوس‌نما همانند میلهٔ خمیدهٔ بازگشت‌پذیر قابل انجام است.

توماس یانگ[۵]، دانشمند شهیر انگلیسی و عضو برجستهٔ[۶] انجمن سلطنتی لندن[۷]، در سیزدهم ژوئن ۱۷۷۳، در روستای میلورتن[۸]، واقع در شهرستان سامرست[۹] انگلستان، دیده به جهان گشود. از وی آثار ارزشمندی در عرصه‌هایی چون زبان‌شناسی، مصرشناسی، بینایی‌سنجی، نور، مکانیک، انرژی و فیزیولوژی برجای مانده است. ابداعاتی در زمینهٔ خط هیروگلیف مصری[۱۰]، همچون سنگ رشید[۱۱]، نیز از دیگر فعالیت‌های ارزشمند اوست.

بین سال‌های ۱۷۸۷ تا ۱۷۹۲ م، او در یک خانواده ثروتمند به‌عنوان معلم سرخانه استخدام شد و این به او فرصت کافی داد تا در فلسفه و ریاضیات سخت کار کند. در سال ۱۷۹۶ م، درجهٔ دکتری طب را از دانشگاه گوتینگن آلمان دریافت کرد. کارهای علمی اولیهٔ یانگ از سال ۱۷۹۳ م شروع شد، زمانی که مقاله‌ای دربارهٔ بینایی به انجمن سلطنتی ارائه داد. به سال ۱۷۹۸ م، در کمبریج به صوت و نور علاقمند شد. در تابستان ۱۷۹۹ م، مقاله ای در اینباره آماده کرد و آن را به انجمن سلطنتی ارائه نمود. در سال ۱۸۰۱ م، کشف مشهورش درباب تداخل نور را انجام داد.

شکل ۱. توماس یانگ

عضو برجستهٔ انجمن سلطنتی لندن

در سال ۱۸۰۲ م، وقتی به‌عنوان عضو انجمن سلطنتی انتخاب شده بود، دانش فراوانش در علوم فیزیک مورد تائید قرار گرفت. در همان سال به سمت استاد فلسفهٔ طبیعی در مؤسسهٔ سلطنتی منصوب شد. خدمات یانگ به توسعهٔ دانش مکانیک در مجموعه سخنرانی‌هایش در این مؤسسه، که در غالب دو جلد کتاب درسی چاپ شدند، وجود دارد. نام کتاب، *فلسفهٔ طبیعی و زیبایی‌های مکانیک* بود که در سال ۱۸۰۷ م در لندن چاپ شد. در فصل مربوط به استحکام منفعل و اصطکاک، انواع مهم تغییر شکل میله‌های منشوری توضیح داده شده است. با در نظر گرفتن کشش و فشار، برای نخستین مرتبه از عبارت "مدول بازگشت‌پذیر" استفاده شده است. تعریف این عبارت با آنچه امروزه در علم مقاومت مصالح نوین به نام "مدول یانگ" گفته می‌شود متفاوت است. این مفهوم بیان می‌کند که مدول بازگشت‌پذیر هر ماده‌ای، خصیصه‌ای از ستونی از همان ماده است که توانایی تحمل فشار را در راستاهای مختلف دارد. یانگ این خصوصیت را به‌شکل نسبت وزن به کاهش طول نسبی ستون در جهتی که تحت فشار قرار می‌گیرد بیان کرد. او همچنین از طول مدول که وابسته به مقطع

عرضی نیست و وزن مدول که حاصل‌ضرب مقطع عرضی در کمیتی که امروزه به نام مدول یانگ شناخته می‌شود، صحبت می‌کند. برای نیروهای برشی، وقتی یک شفت دایروی تحت پیچش قرار می‌گیرد، اشاره می‌کند که گشتاور اعمال‌شده باید با تنش‌های برشی روی سطوح بالانس شوند. این تنش‌های برشی با زاویهٔ پیچش و فاصله از محور طولی شفت متناسب‌اند. او همچنین بیان می‌کند که یک مقاومت اضافی نسبت به گشتاور، که متناسب با مکعب زاویهٔ پیچش است، به‌وجود می‌آید. این مقاومت با تنش‌های طولی ایجادشده در لایه‌های شفت که در اثر خمیدگی ناشی از پیچش حاصل می‌شوند به‌دست می‌آید. به‌همین دلیل لایه‌های بیرونی تحت کشش و لایه‌های درونی تحت فشار قرار می‌گیرند و محور در حین پیچش کوتاه می‌شود و این کوتاه‌شدگی به‌میزان ۱/۴ کشیدگی لایه‌های بیرونی است. البته دانش مقاومت مصالح نوین، میزان صحیح را ۱/۲ به‌دست می‌دهد. او با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های غیرالاستیک بیان می‌کند که برای موارد کاربردی، مانند شکست، کافی است که بار اعمالی به اندازهٔ کوچکی اضافه شود تا تنش به‌وجود آمده از حد استحکام ماده فراتر رود و شکست حادث گردد. همان‌گونه که دیده شد، ناویه همین نتیجه را گرفته بود و پیشنهاد کرد که تنش‌های کاری، پایین‌تر از حد الاستیک ماده نگاه داشته شوند. یانگ در مورد شکست اجسام الاستیک نسبت به ضربه چنین بیان می‌کند که در این وضعیت نه وزن جسم، که میزان انرژی جنبشی آن عامل مهمی است. او چنین بیان می‌کند که فرض کنید جهت ضربه افقی باشد؛ یعنی نیروی گرانش سبب افزایش آن نشود. بنابراین چنانچه فشار یک وزنهٔ ۱۰۰ پوندی که به‌صورت استاتیک بر یک جسم اعمال‌شده، بعد از شکافتن آن به اندازهٔ یک اینچ موجب شکست آن شود، همان وزنه به‌صورت دینامیکی باید در فاصلهٔ ۰/۵ اینچ ارتفاع از جسم سقوط کرده تا موجب شکست آن شود و یک وزنهٔ ۱ پوندی باید در ارتفاعی معادل ۵۰ اینچ از آن جسم رها گردد تا آن جسم شکسته شود. یانگ بیان می‌کند: وقتی یک میله منشوری تحت ضربه‌ای در راستای طولش قرار می‌گیرد، حالت الاستیک میله متناسب با طولش خواهد بود و بنابراین هرچه میله طویل‌تر باشد، تغییر طول آن بیشتر خواهد شد. در هنگام ضربه، موجی فشاری تولید می‌شود که چنانچه سرعت آن در طول میله V در نظر گرفته شود و سرعت جسم ضربه‌زننده v فرض شود، در این‌صورت یانگ نتیجه‌گیری می‌کند که فشار واحد تولیدشده در انتهای میله در زمان برخورد برابر v/V خواهد بود و مقدار حدی سرعت v در آزمایش استاتیکی شکست میله، قابل محاسبه خواهد بود. وی با در نظر گرفتن آثار ضربه در راستای عمود بر طول یک تیر مستطیلی توضیح می‌دهد که برای یک بیشینهٔ تنش خمشی تولیدشده به‌وسیلهٔ ضربه، مقدار انرژی انباشته‌شده در تیر، متناسب با حجمش می‌باشد و علت آن است که بیشینه نیروی P به‌وجود آمده در تیر به‌وسیلهٔ جسم ضربه‌زننده و خیز δ در نقطه‌ای که ضربه وارد شده از روابط ۱ و ۲ به‌دست می‌آید:

$$P = \frac{k b h^2}{l} \qquad (۱)$$

$$\delta = \frac{k_1 P l^3}{b h^3} \qquad (۲)$$

در روابط فوق، b، h و l به‌ترتیب پهنا، ضخامت و طول تیر بوده و k و k_1 ثوابتی هستند که وابسته به مدول ماده و مقدار فرض شده برای تنش بیشینه می‌باشند. با جایگذاری این مقادیر در عبارت انرژی کرنشی، گفتهٔ یانگ مبنی بر تناسب انرژی ذخیره‌شده و حجم تیر، با رابطهٔ ۳ تأیید می‌شود.

$$U = \frac{P\delta}{2} = \frac{k^2 k_1}{2} bhl$$

همانگونه که در روابط بالا دیده می‌شود، یانگ با بیان مدول در کشش و فشار، مرزهای دانش مقاومت مصالح را توسعه داد. او همچنین در روش تحلیل تنش‌های ناشی از ضربه برای اجسامی که شکست در آنها در محدودهٔ کشسان خطی؛ یعنی محدوده‌ای که قانون هوک اعتبار

دارد، به‌وقوع می‌پیوندد، پیشگام بود. در جلد دوم کتابش تحت عنوان *فلسفه طبیعی*، در فصل تعادل و مقاومت کشسان، چند مسئلهٔ جدید و مهم، به‌صورت صحیح حل شده است. برای مثال برای نخستین‌بار، مسئلهٔ کشش و فشار غیرمرکزی میله‌ها حل شده است.

ادامه دارد ...

پی‌نوشت

غربی روزتا) در شمال باختری دلتای نیل پیدا کردند و امروزه در موزهٔ بریتانیا نگه‌داری می‌شود.

1. Jean-Victor Poncelet (1788 – 1867)
2. Félix Savart (1791 – 1841)
3. Sorbonne, http://www.english.paris-sorbonne.fr (accessed September 01, 2015)
4. Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797 – 1886)
5. Thomas Young
6. Fellow member
7. The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge, known as the Royal Society, http://royalsociety.org (accessed Jul 22, 2013)
8. Milverton
9. Somerset

۱۰. نخستین‌بار مردمان مصر باستان از خط هیروگلیف برای نگارش استفاده کردند. این خط یکی از کهن‌ترین روش‌های نگارش است. قدمت برخی از سنگ‌نوشته‌های هیروگلیف به سه هزار سال پیش از میلاد بازمی‌گردد. خط هیروگلیف قریب به سه هزار سال زبان نگارش مردم مصر بوده است و حجاران و صنعتگران مصری آن را روی دیوار آرامگاه‌ها، ستون‌ها، تندیس‌ها، مهرها و جز این‌ها حک می‌کرده‌اند. این خط کهن حدود پانصد علامت تصویری دارد. طرز نگارش آن نیز به دو صورت عمودی و افقی بود. هیروگلیف به‌معنای کنده‌کاری مقدس است. این واژه یونانی است و از دو قسمت تشکیل یافته‌است: واژهٔ هیروس (hieros) به‌معنای مقدس و گلافو (glupho) به‌معنای کنده‌کاری. اما این نام، نام درستی برای نوشته‌های قدیمی مصر نیست و فقط بدین دلیل روی آن نهاده شده است که وقتی برای نخستین‌بار، یونانیان باستان آن را دیدند، پنداشتند این نوشته‌ها توسط کاهنان برای اهداف مقدس کنده‌کاری شده است.

۱۱. سنگ رشید سنگ‌نوشته‌ای از دوران مصر باستان است که در پیشرفت‌های معاصر برای درک خط هیروگلیف ابزاری سودمند بوده است. این سنگ‌نوشته بخشی از ستونی سنگی متعلق به دوران بطلمیوسی است که روی آن سه ترجمه از یک متن کنده‌کاری شده است: دو نوشته به زبان مصری باستان و یکی به زبان یونانی کلاسیک. از این‌رو این سنگ کلیدی برای رمزگشایی خط هیروگلیف باستانیبوده است. این سنگ‌نوشته را سپاهیان ناپلئون در سال ۱۷۹۹، در روستایی به نام رشید (به زبان‌های