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

در آن زمان، دولت فرانسه به پیشرفت در عرصهٔ ساخت انواع پل بسیار علاقه‌مند شده بود، به‌همین دلیل ناویه[1]، در سال‌های ۱۸۲۱ و ۱۸۲۳ م، به انگلستان رفت تا در مورد فن ساخت پل‌های معلق به تحقیق و تتبع بپردازد. نتیجهٔ مطالعات او شامل گزارشی مفصل از تاریخچهٔ این حوزه از دانش فنی، مهمترین پل‌های ساخته‌شده تا آن زمان و روش‌های محاسباتی برای طراحی چنین سازه‌هایی بود. این گزارش، که بعدها به‌صورت یک مجلد چاپ و منتشر شد، برای پنجاه سال، از مهم‌ترین کتاب‌ها در زمینهٔ طراحی پل‌های معلق بود؛ اثری که تا به امروز همچنان از ارزش و اعتباری خاص برخوردار است.

در سال ۱۸۲۴ م، ناویه، عضو فرهنگستان علوم فرانسه[2] شد. شش سال بعد نیز توانست کرسی استادی درس حساب و مکانیک تحلیلی در مدرسهٔ اکول پلی‌تکنیک[3] را از آن خود کند.

در سال ۱۸۲۶م، کتاب ناویه در مورد دانش مقاومت مصالح به چاپ رسید. در این اثر، در مقایسه با آثاری که تا قرن هجدهم چاپ شده بودند، پیشرفت‌های شگرفی به‌چشم می‌خورد. در آن دوران، مهندسان و متخصصان برای محاسبهٔ بارهای نهایی از روش‌های تجربی و نظری استفاده می‌کردند و این در حالی بود که ناویه از همان صفحات نخستین کتاب خود توضیح می‌داد که باید حدی را که سازه به شکل کشسان[4] عمل می‌کند شناخت و در این‌صورت، در این محدوده، تغییر شکل‌ها با نیروها متناسب خواهد بود و می‌توان ارتباط این دو را با رابطه‌ای خطی بیان کرد. او بیان کرد که در خارج از این حد، ارتباط بین تغییر شکل و نیرو پیچیده است، بنابراین لازم است از روابط موجود در منطقهٔ کشسان، سازه را به شکلی ایمن طراحی کرد. اهم فعالیت‌های ناویه در این کتاب شامل انجام آزمایش کشش و فشار ساده روی میله‌های ساده با هدف محاسبهٔ مدول کشسانی[5] و تحلیل خمش میله‌های منشوری می‌باشد.

در زمان لئونهارت ائولر[6] (لئونارد اویلر[7])، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان برجستهٔ سوئیسی، معادلهٔ دیفرانسیل خیز تیر برای تیرهای یک‌سر درگیر و تیرهایی که روی تکیه‌گاه‌های ساده قرار داشتند و به‌صورت متقارن تحت بارگذاری قرار می‌گرفتند، به‌کار گرفته شد؛ این در حالی بود که ناویه این معادله را برای هر نوع بارگذاری عرضی استفاده کرد. ناویه برای نخستین‌بار روشی کلی برای تحلیل مسائل نامعین استاتیکی در این کتاب ارائه کرد. وی چنین بیان نمود که در مسائل نامعین استاتیکی، جسم به‌طور مطلق صلب[8] فرض می‌شود و این در حالی است که در حقیقت هیچ جسمی صلب نیست و می‌توان با افزودن معادلاتی - که تغییر شکل کشسانی را بیان می‌کنند - به معادلات ایستایی، کمیت‌های مجهول را به‌دست آورد. ناویه در کتابش خمش میله‌های منشوری تحت بارهای محوری و عرضی[9] را بررسی کرد و برای کمانش تحت بارهای

محوری خارج از مرکز، روابطی ارائه داد که بعدها کاربردهای فراوانی پیدا کرد. او همچنین کار ائولر در ارتباط با خمش تیرهای خمیده را تکمیل و چنین بیان کرد که گشتاور مساوی با تغییر انحناء در صلابت خمشی است. کتاب ناویه، شامل فصولی دربارهٔ ورق‌ها، پوسته‌ها، خرپاها و جز این‌ها نیز بود و در مجموع، در آن زمان اثری کامل در زمینهٔ طراحی سازه‌ها محسوب می‌شد.

در قرن هجدهم، مهندسان به انجام آزمایش و محاسبهٔ استحکام نهایی علاقه‌مند بودند. درپی انجام چنین آزمایش‌هایی بود که اطلاعاتی نه‌چندان کامل از این ویژگی برای تعداد کمی از مواد مهندسی ارائه شد و کمتر کسی درپی خواص کشسانی نمونه‌های مورد آزمایش بود. در اوائل قرن نوزدهم، مهندسانی که از اکول پلی‌تکنیک فارغ‌التحصیل شدند، به‌دلیل تسلط بر مباحثی چون دانش ریاضیات، فیزیک و مکانیک، کارهای عملی بهتری ارائه کردند.

پیر شارل دوپین[10]، ریاضی‌دان کاتولیک فرانسوی، از جمله دانشجویان برجسته‌ای بود که در سال ۱۸۰۳ م، از اکول پلی‌تکنیک فارغ‌التحصیل شد. وی در دورهٔ دانشجویی، توانمندی‌های فوق‌العاده‌اش را در عرصهٔ ریاضیات نشان داد و نخستین مقالهٔ خود را در زمینهٔ هندسه به رشتهٔ تحریر درآورد. چندی بعد، به‌عنوان مهندس کشتی به جزایر یونان سفر کرد و در آنجا تحقیقات مهمی در مورد خمش تیرهای چوبی انجام داد. دوپین، با آزمایش تیرهایی که هر دو انتهایشان روی تکیه‌گاه ساده قرار می‌گرفت، دریافت که در محدودهٔ خاصی از اعمال بار، خیزها متناسب با بارگذاری‌اند و می‌توان تغییرات آنها را با منحنی سهموی نشان داد. در خارج از محدودهٔ خاص (که در دانش مقاومت مصالح نوین حد تناسب نامیده می‌شود)، خیزها با نرخ بیشتری افزایش پیدا می‌کنند. او با آزمایش روی چوب دریافت که مقاومت در برابر خمش با افزایش وزن مخصوص افزایش می‌یابد. وی با مقایسهٔ خیز به‌وجودآمده توسط یک بار متمرکز که در میانهٔ تیر اعمال می‌شود با بار گسترده‌ای که با همان اندازه به‌شکل یکنواخت روی تیر توزیع می‌شود به این نتیجه رسید که خیز بیشینه در میانهٔ تیر، در حالت توزیع گسترده، در حدود ۰/۶۳۳ حالت متمرکز است. مقدار به‌دست آمده با آزمایش نیز در حدود ۰/۶۲۵ می‌باشد؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود با مقدار نظری به‌دست آمده توسط دوپین تفاوت اندکی دارد. دوپین با آزمایش روی تیرهایی با مقطع مستطیل دریافت که خیز با پهنا و مکعب ضخامت نسبت عکس دارد. همچنین متوجه شد که خیز با مکعب دهانهٔ تیر متناسب است. او با در نظر گرفتن تیرهایی که از نظر شکل و جنس یکسان‌اند چنین نتیجه گرفت که انحنای به‌وجود آمده در مرکز تیر در اثر وزن، مقدار ثابتی دارد و خیز با مربع ابعاد خطی متناسب است. وی با بررسی شکل منحنی خیز، که در اثر بار اعمال‌شده در میانهٔ تیر به‌وجود آمده، دریافت که این منحنی با دقت خوبی با یک سهمی قابل نمایش است. با انجام این آزمایشات، دوپین درمورد مقاومت و خیز چوب‌های به‌کار رفته در بدنهٔ کشتی، چند نتیجه‌گیری ارائه کرد. همه این نتایج قبل از چاپ کتاب ناویه در مورد مقاومت مصالح به‌دست آمدند.

شکل ۱. پیر شارل دوپین
ریاضی‌دان کاتولیک فرانسوی

در سال ۱۸۲۰ م، آلفونس دولیو[11]، از فارغ‌التحصیلان اکول پلی‌تکنیک، تعداد قابل توجهی آزمایش بر روی آهن و سازه‌های آهنی انجام داد. او در بخش نخست از مقاله‌اش روابط لازم برای خمش و کمانش میله‌های منشوری را در

جهت خمش میله‌های به‌کار رفته در طاق ضربی‌ها و پیچش محورها به‌دست آورد. وی برای پیداکردن موقعیت محور خنثی، با پیش‌فرضی اشتباه، مبنی بر اینکه گشتاورهای نیروهای کششی و فشاری حول محور خنثی برابرند، عمل کرد. اغلب کارهای او با تیرهای مستطیلی و دایروی انجام شد، بنابراین اشتباه او در مورد موقعیت محور خنثی، تأثیر چندانی در اعتبار نتیجه‌گیری‌هایش نداشت. در شروع، او برای کشش و فشار، مدول کشسانی را تعریف و فرض کرد که در خمش، مقطع عرضی تیر مسطح باقی می‌ماند. بدین شکل، او معادلهٔ دیفرانسیل منحنی خیز[12] را به‌دست آورد. او این معادله را برای تیرهای یک‌سر درگیر و آنهایی که روی تکیه‌گاه ساده قرار می‌گیرند، به‌کار برد و نتیجه‌گیری کرد که اگر هر دو انتها گیردار باشند، مقدار خیز در میانهٔ تیر به اندازهٔ ۰/۲۵ مقدار خیز در تیری است که دارای همان دهانه بوده و روی تکیه‌گاه ساده قرار گرفته است. نتایجی که او از آزمایش تیرهای مستطیلی کسب کرد با نظریه‌اش توافق خوبی داشت، اما نظریه‌اش برای مقاطع عرضی مثلثی، صلبیت بیشتری از آنچه در واقعیت وجود داشت را پیش‌بینی می‌کرد. این خطا بیشتر بدین دلیل بود که دولیو در مکان‌یابی صفحهٔ خنثی ایده‌ای اشتباه داشت. وی در آزمایش‌های بعدی‌اش، فشار محوری میله‌های آهنی بلند و باریک را با اعمال بار بر مرکز مقطع عرضی بررسی کرد و نتایجی به‌دست آورد که با نظریهٔ ائولر توافق خوبی داشت. از دیگر آزمایش‌های او خمش دو تیر موازی بود که در فواصل یکسانی به یکدیگر متصل بودند. وی مشاهده کرد که با افزایش فاصلهٔ بین تیرها صلبیت خمشی کاهش و با کم‌کردن این فاصله صلبیت افزایش پیدا می‌کند و در هر حال به‌کار بردن دو تیر به‌صورت موازی (که در دانش مقاومت مصالح نوین فلنج نامیده شده و قسمتی از تیرها محسوب می‌شوند) به‌جای یک تیر، که با تیر ثالثی (که در دانش مقاومت مصالح نوین به آن جان گفته می‌شود) به‌صورت عمودی با هم اتصال دارند، سبب افزایش صلبیت و مقاومت خواهد شد. در اینجا بود که پیشنهاد استفاده از تیرهای I شکل را، که امروزه به آنها تیر اطلاق می‌شود را داد. پس تولد تیر آهن با شخص دولیو آغاز شد. همچنین او توصیه کرد که می‌توان از مقاطع حلقوی مربوط به تیرهای لوله‌ای نیز که در سال ۱۸۰۵ م، گائودی آن را توصیه کرده بود برای افزایش بازدهی استفاده کند که امروزه در ساخت طاق ضربی‌های پل‌های چدنی، از آنها استفاده می‌شود.

دولیو آزمایش‌های بعدی خود را با تیرهای قوسی‌شکل، که دارای دو تکیه‌گاه مفصلی در دو انتها بودند، انجام داد و مشاهده کرد که با بارگذاری قوس در میانه، هیچ‌گونه تغییری در انحنای برخی از نقاط روی نمی‌دهد. با فرض اینکه در آن نقاط مفصل‌هایی وجود دارد، یک حل تقریبی ارائه داد که نتیجهٔ آزمایش‌هایش به‌نحو قانع‌کننده‌ای با آن تطابق داشت. ناویه نیز در مورد قوس‌ها نظریهٔ قابل قبولی ارائه داده بود. آخرین آزمایش‌های دولیو در ارتباط با پیچش میله‌های منشوری آهنی بود. او کارش را با محورهای دایروی شروع و فرض کرد که مقاطع عرضی مسطح باقی مانده، شعاع دوایر به‌صورت مستقیم خواهند بود. او توانست به رابطه‌ای برای زاویهٔ پیچش مقطع دست یابد که با کار کولمب[13] تطابق داشت. او از همین فرضیه‌ها در محاسبهٔ زاویهٔ پیچش لوله‌های دایروی استفاده کرد و مزایای استفاده از لوله‌ها در پیچش را متذکر شد. پس از انجام آزمایش روی میله‌های مستطیلی، به این نتیجه رسید که فرضیه‌هایی که برای محورهای دایروی استفاده کرده است، برای مقاطع عرضی مستطیلی قابل استفاده نیستند. در آن زمان این مسئله مورد پذیرش بود که تنش‌های پیچشی با فاصله از محور میله متناسب‌اند، اما آزمایش‌های دولیو خلاف آن را نشان دادند. بعدها کوشی[14] این نظریه را کامل‌تر کرد و در نهایت سنت ونان[15] آن را به شکل موشکافانه‌ای حل کرد. آزمایش‌های دولیو همیشه در حد کشسانی مواد، آنجایی که قانون هوک اعتبار دارد، صورت می‌گرفتند و هدف پیداکردن بار نهایی بود. در این زمان نتایج جالب و مهمی نیز توسط مهندسان و ریاضی‌دانان مشهوری از جمله مارک سگین[16]، گابریل لامه[17] و لوئیس ویکات[18] ارائه شد.

ادامه دارد ...

پی‌نوشت

1. Claude-Louis Navier (1785 – 1836)

۲. فرهنگستان علوم فرانسه انجمنی علمی است که در سال ۱۶۶۶ توسط لوئی چهاردهم و به پیشنهاد ژان باتیست کولبر بنیان نهاده شد تا به تشویق و پشتیبانی جامعهٔ علمی و پژوهشی فرانسه بپردازد. این انجمن پیشروترین نهاد علمی در اروپا در قرن‌های ۱۷ و ۱۸ میلادی بود و از نخستین فرهنگستان‌های علوم در جهان به‌شمار می‌رود [ویراستار].

۳. اکول پلی‌تکنیک، به‌معنای مدرسهٔ پلی‌تکنیک یا پلی‌تکنیک پاریس، معتبرترین و قدیمی‌ترین دانشگاه فنی و مهندسی فرانسه است. امروزه این دانشگاه در میان دانشگاه‌های جهان نیز رتبهٔ بالایی دارد؛ به‌طوری‌که بر پایهٔ رده‌بندی ضمیمهٔ آموزش عالی تایمز یکی از چهل دانشگاه برتر جهان است. اکول پلی‌تکنیک یکی از مدارس بزرگ یا اصطلاحاً گراند اکول کشور فرانسه است که در سال ۱۷۹۴ م پایه‌گذاری شد. این مجموعه تا سال ۱۹۷۶ م در محلهٔ لاتین شهر پاریس قرار داشت و از آن سال به پالزو منتقل شد [ویراستار].

۴. در دانش مقاومت مصالح امروزی به آن حد تسلیم می‌گویند.

5. Elastic modulus

6. Leonhard Euler

۷. گاهی در برخی از آثار فارسی دیده می‌شود که نام این دانشمند سوئیسی به اشتباه لئونارد اویلر تلفظ شده است. حال آنکه ثبت و ضبط نام این دانشمند به‌صورت لئونهارت ائولر صحیح می‌باشد [ویراستار].

8. Rigid

۹. که در دانش مقاومت مصالح نوین، به آن تیر - ستون گفته می‌شود.

10. Pierre Charles François Dupin (1784 – 1873)

11. D'alfonso Duilio

۱۲. که در دانش مقاومت مصالح نوین، منحنی الاستیک نامیده می‌شود.

13. Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806)

14. Augustin-Louis Cauchy (1789 – 1857)

15. Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797 – 1886)

16. Marc Seguin (1786 – 1875)

17. Gabriel Léon Jean Baptiste Lamé (1795 – 1870)

18. Louis Vicat (1786 – 1861)