سازه، فرم و معماری *

بابک عالمی **
شهرام پوردیهیمی ***
سعید مشایخ فریدنی ****

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۵

چکیده

شکل‌گیری فرم در معماری، حاصل عوامل مختلف عملکردی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، اقلیمی و محیطی و همچنین شرایط ساخت و ایستایی است. ایستایی در این میان، نقش اساسی در شکل‌گیری فرم و پایداری در مقابل عوامل محیطی دارد، زیرا نقش ایستایی متضمن پایداری کل ساختار فرم معماری است؛ بنابراین، جایگاه سازه و اهمیت آن در طراحی و نقشی که در شکل دادن به فرم دارد، موضوعی است که به‌سبب اهمیت آن باید مورد مطالعه قرار گیرد. از سوی دیگر، آگاهی از چگونگی پیدایش و به‌وجود آمدن دانش سازه، رابطهٔ این دانش با معماری را در طول تاریخ روشن می‌سازد. اگرچه فرم به‌منزلهٔ تجلی معماری در نظر گرفته می‌شود، شکل‌گیری فرم به سازه وابسته و پیوسته است؛ بنابراین، سازه و مفاهیم و شیوهٔ عمل آن، نقش اصلی را در پدید آوردن فرم ایفا می‌کنند. ابتدایی‌ترین تعریف سازه، آگاهی از نظام پخشایش بارها، همچنین توجه به شیوهٔ عمل نیروها و روش‌های انتقال آن‌ها به زمین است؛ بنابراین می‌توان پرسید که آیا نیروها بر شکل‌گیری فرم تأثیر دارند؟ در این مقاله، از میان وجوه گوناگون فرم، وجه سازه‌ای آن مورد تأمل قرار می‌گیرد. در این بین، نیرو به‌عنوان سیستم عامل و تأثیرگذار بر هر دو وجه معماری و سازه‌ای فرم مطرح است. به همین دلیل این مقاله، ضمن توجه به جایگاه و نقش سازه در معماری، به بررسی رابطهٔ سازه و نیروها با فرم می‌پردازد. روش تحقیق مقاله، توصیفی و تحلیلی است و مقاله می‌کوشد با استفاده از منابع موجود و به روش استدلالی، نگاهی نو به ارتباط سازه و معماری به‌منظور افزایش درک سازه‌ای مهندس معمار فراهم آورد. بدین منظور ضمن جست‌وجوی ریشه‌های دانش سازه در تاریخ ساختمان و در پیوند با معماری، سعی می‌شود تا مفاهیم کنونی این دانش در قالبی مشترک با معماری تعریف شود؛ بنابراین ضمن تحلیل فرم‌های طبیعی، جریانات نیرویی در مصالح و فرم‌های مصنوع بررسی می‌شود که حاصل آن رسیدن به فرایند منطقی و ایدئال طراحی فرم در بستر معماری با توجه به مفاهیمِ پیچیدهٔ سازه‌ای است.

کلیدواژه‌ها

فرم معماری، مقاومت مصالح، فرم‌های طبیعی، جریان نیرو، شکل‌گیری فرم، خمش.

* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دکتری معماری نویسندهٔ مسئول است که به راهنمایی دکتر شهرام پوردیهیمی و مشاورهٔ مهندس سعید مشایخ فریدنی در دانشگاه شهید بهشتی در حال تدوین است.

** دانشجوی دکتری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، نویسنده مسئول، b_alemi@sbu.ac.ir
*** استاد دانشکده معماری وشهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
**** استادیار دانشکده معماری وشهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

پرسش‌های پژوهش

۱. تعامل و پخشایش نیروها در مصالح و فرم‌های طبیعی و مصنوع چگونه است؟
۲. جریان نیرویی چگونه ساختار سازه‌ای را در فرم معماری شکل می‌دهد؟

مقدمه

هدف این مقاله، تأمل بر ارتباط سازه با معماری در بستر طراحی است. این نکته، موضوع مطالعهٔ بسیاری از معماران و مهندسان سازه طی شش دههٔ اخیر بوده و مشکل، غالباً در عدم تسلط معماران به دانش پایهٔ سازه‌ای مؤثر در طراحی ساختمان است. به این منظور، مطالعهٔ راهکارهای مفید برای ارتقای دانش سازه‌ای مهندس معمار، امری واجب و ضروری است؛ اما آنچه این مقاله به آن می‌پردازد، نگاهی نو به ارتباط سازه و معماری به‌منظور افزایش درک معماران است. با این نگاه، مقاله می‌کوشد با بازگو کردن فرایند تاریخی این ارتباط و همچنین طرح نیرو به‌عنوان سیستم عاملی برای برای حل رابطهٔ سازه و معماری، سعی در تبیین مفاهیم سازه‌ای در جهت درک بهتر آن‌ها بنماید. منابع موجود در این زمینه ثابت می‌کند که معماران، همواره با مشکل عدم درک مفاهیم سازه‌ای روبه‌رو بوده‌اند، زیرا مفاهیمی که بتوان از طریق آن‌ها سازه را در بستر معماری کاربردی کرد، وجود ندارند یا به‌صورت پراکنده‌اند. به همین دلیل تاکنون منبع مشخص و واحد و کاملی برای تدریس دروس سازه در معماری وجود ندارد و این نکته، ضرورت موضوع مقاله را کفایت می‌کند. مقاله به‌دلیل زبان روشن و واضح برای معماران، دارای بیانی ساده است و بیان محتوایی و مفهومی دارد. مفاهیم پایه در مقاله با هدف درک رفتار سازه نگاشته شده‌اند و مقاله می‌کوشد با یاری گرفتن از الگوهای طبیعی، ارتباط مناسبی با ذهن مهندس معمار برقرار نماید. به همین سبب از به‌کارگیری انواع منحنی‌های نیرویی و تحلیل‌های حاصل کار نرم‌افزارها یا مثال‌هایی که ذهن را با معادلات و روابط پیچیده ریاضی درگیر می‌کند، اجتناب شده است.

ساختمان‌ها از سرپناه‌ها تا ساخته‌های پیچیدهٔ امروزی، در سراسر دوران تکامل فناوری، با حضور مداوم نوعی سیستم سازه‌ای برای پایداری در برابر نیروهای[1] وزنی، باد، زمین‌لرزه و... همراه بوده‌اند (چینگ ۱۹۹۵).

انسان در طول تاریخ همواره ناگزیر به ساخت بناهای مقاوم و ایمن بوده است. او مجبور بوده مواد و مصالح مختلف را به‌گونه‌ای شکل دهد تا بتواند آن را در مقابل عوامل و نیروهای مخرب حفظ کرده و نیروهای وارد بر ساختار معماری‌اش را به‌گونه‌ای مطمئن شناسایی و کنترل کند. از طرفی، زمین تأمین‌کنندهٔ همهٔ مواد و مصالح ساختمانی بوده و به‌دلیل جاذبه، باعث به‌وجود آمدن نیروهای وزنی می‌گردد و از سوی دیگر به‌سبب تأثیرات آب‌وهوایی و ساختار زمین‌شناسی، نیروهای جانبیِ باد و زلزله و انقباض و انبساط را موجب می‌شود؛ این در حالی است که بشر در ساخت‌وسازهای خود علاوه بر عملکرد و استحکام، باید عواملی چون مسائل اقتصادی، محیطی، زمان و... را نیز به‌عنوان عوامل مؤثر بر معماری در نظر داشته باشد (سالوادوری ۱۹۸۶، ۷)؛ بنابراین فرم[2] و معماری تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل و متغیرها قرار دارند که سازه[3] یا اسکلت بنا ازجمله این عوامل‌اند.

باید توجه داشت که بارها و نیروها در یک ساختمان، شکل سازه را مشخص کرده و به‌اصطلاح تراش می‌دهند. به همین دلیل مطالعهٔ بارها، یعنی شناخت و نحوهٔ عمل آن‌ها در شکل‌گیری فرم معماری اهمیت دارد. در واقع به همان ترتیبی که اسکلت انسان به بدن او شکل می‌دهد و تکیه‌گاه اندام‌ها و بافت‌ها را ایجاد می‌کند، سازه نیز ضامن پایداری، عمر و ماندگاری ساختمان و عامل وحدت اجزا و شکل‌گیری فرم‌های ساختمانی است؛ ازاین‌رو باید آن را بخش جدایی‌ناپذیر از فرایند کلی طراحی معماری دانست و ضروری است که معماران قواعد این علم را فراگیرند تا توانایی لازم برای استفاده از آن را در طراحی فضاهای معماری به‌دست آورند (Gartshore and Mayfield 1990). بسیاری سازه را محدودکنندهٔ توان طراحی معمار می‌دانند، درصورتی‌که برعکس، تنوع پاسخ‌های سازه‌ای

نشان‌دهندهٔ تقویت توان طراحی مهندس معمار است (Whitehead 2013; Anaor 1998). امروزه علاوه بر وجود راه‌حل‌ها و پاسخ‌های گوناگون سازه‌ای، پیشرفت‌های فناوری (شکل‌گیری سیستم‌های ساختمانی) و امکانات تجزیه و تحلیل سازه‌ای نیز باعث شده است که شناخت مهندسان معمار از سازه تقویت شود و درنتیجه این، دانش بتواند کمک بیشتری به آن‌ها نماید.

۱. بررسی تاریخچه و چگونگی شکل‌گیری سازه

تاریخ ساخت‌وساز و تحولات آن، فرایندی تجربی داشته است. تجارب قبلی به‌تدریج باعث شد توجه مردم به موضوع استحکام، مقاومت و پایداری جلب شود. درحقیقت، عنصر تجربه مانند سایر علوم چون پزشکی و نجوم و... نقش عمده‌ای در رشد و توسعهٔ علم ساختمان و درک بشر از آن داشته است. به این ترتیب گسترهٔ ساخت‌وساز، وسیع‌تر و جدی‌تر دنبال شده، و به‌مرور زمان شاخه‌ای از دانش که جدای از ریاضیات و مکانیک بود، به‌عنوان رشتهٔ مستقلِ سازه شکل گرفت (Timoshenko 1953, 1).

خروج بشر از سرپناه‌های طبیعی و نیاز به سرپناه جدید، مشکلات دوام و بقا را به دنبال داشت. بناهای اولیه، ساده بودند و با توجه به درک ابتدایی دانش بشر از مفاهیم ایستایی و پایداری، سازه‌ای ابتدایی نیز داشتند. اولین بناهای دارای سازهٔ قابل توجه، زیگورات‌ها و اهرام (۱۴۰۰ سال پیش از میلاد) بودند (Salvadori 1980) که ابداع سازه‌ای چندانی در آن‌ها وجود نداشت و برای مقاصد خاصی (سیاسی، مذهبی و...) شکل‌گرفته بود. این بناها گرچه ارتفاع زیادی داشتند که چالش‌های جدی باربری را به دنبال داشت، راه‌حل ارائه‌شده برای آن‌ها ابتدایی بود. (استفاده از مصالح سازه‌ای حجیم و سنگین و صرف انرژی زیادی برای ساخت آن) الگوهای ساخت‌وساز اولیه، برداشت ظاهری از طبیعت بودند و به هیچ وجه قابل گسترش، دخل و تصرف و تعمیم نبودند، ولی به مرور زمان این روال تغییر کرد. قانون اهرم‌ها توسط ارشمیدوس[۴] (۲۸۷ـ۲۱۲ پیش از میلاد) ابداع شد و قوانین هندسه توسط دانشمندانی چون اقلیدوس[۵] (حدود ۳۶۵ـ۲۷۵ پیش از میلاد) ارائه گردید و به‌تدریج با پیشرفت این قوانین، از آن‌ها در ساخت بناها استفاده شد. با شکل‌گیری جبر و به‌وجود آمدن فرمول‌های ریاضی، پیشرفت تکنولوژی و پیدایش مصالح نوین و نیازهای جدید انسان، سیستم‌ها و نظام‌های باربری که در آن از مصالح مختلف استفاده می‌شد، دگرگون شده، توسعه یافت و ابداعات مختلفی در این زمینه صورت گرفت و این سرآغاز شکل‌گیری قوانین در شکل‌گیری سازه‌ها بود (Adiss 2008).

تا اواخر قرن شانزده میلادی، بشر تنها از برخی ویژگی‌های مصالح آگاه بود و مقیاس و اندازهٔ دقیق و قابل‌تعمیمی دراین‌باره وجود نداشت. تلاش‌های صورت‌گرفتهٔ بعدی، منجر به تعیین دقیق خصوصیات مصالح مختلف و افزایش توانایی بشر در کاربرد آن‌ها گردید. به‌تدریج سؤالات متعددی دربارهٔ ظرفیت باربری مصالح و مکانیزم باربری در آن‌ها مطرح شد که حاصل آن طرح موضوع مکانیک مصالح (مقاومت مصالح) بود؛ این موضوع، آغاز علمی شدن موضوع انتقال بار و جریان باربری است. اولین نتایج کسب‌شده از مقاومت مصالح به کمک تجربه و آزمایش را لئوناردو داوینچی[۶] (۱۴۵۲ـ۱۵۱۹) ثبت کرد. در اواخر قرن شانزده میلادی، این موضوع توسط گالیله (۱۵۶۴ـ۱۶۴۲) به‌صورت جدی مورد مطالعه قرار گرفت، ولی روابط آن همچنان تکمیل‌نشده باقی بود تا اینکه بعدها، ریاضی‌دانان و فیزیک‌دانانی همچون رابرت هوک[۷] (۱۶۳۵ـ۱۷۰۳)، ایزاک نیوتن[۸] (۱۶۴۲ـ۱۷۲۷)، توماس یانگ[۹] (۱۷۷۳ـ۱۸۲۹) و سیمون دنی پواسان[۱۰] (۱۷۸۱ـ۱۸۴۰)، به شکل‌گیری این روابط و فرمول‌ها کمک کردند[۱۱] (Timoshenko 1953, 8) به این ترتیب دانشی که با تجربه آغاز شده بود، به کمک آزمایش‌ها، جبر و تحلیل منجر به شکل‌گیری علم سازه شد.

امروزه با شناخت نیروها و تحلیل آن‌ها، نظام‌ها یا سیستم‌های انتقال بار به‌وجود آمده است و رفتار مصالح و اجزای سازه‌ای، از طریق روابط نظری، قابل تعیین است. همچنین توسعه و پیشرفت امکانات کامپیوتری، امکان تجزیه و تحلیل رفتار سازه‌ها را قبل از ساخت، میسر کرده است. نحوهٔ به‌وجودآمدن، توزیع و پخشایش نیروها و همین‌طور بررسی و مطالعهٔ رفتار مصالح و توان تحمل و باربری آن‌ها و دسته‌بندی رفتاری و سیستم باربری متنوع سازه‌ای،

مباحث علم سازه را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین اکنون سازه به‌عنوان یک تخصص در خدمت دنیای علم است و در عرصهٔ معماری نیز معماران را قادر می‌سازد که بتوانند کیفیت و مقیاس ساخت و سازهای خود را بهبود بخشیده و گسترش دهند و تحولات معماری را امکان‌پذیر کنند. اما این سؤال مطرح است که معمار چگونه می‌تواند از دانش سازه بهره گیرد و آن را به‌کار بندد؟ و تأثیر سازه بر فرم معماری چیست؟ برای پاسخ به این پرسش‌ها، ارتباط سازه با معماری و رابطهٔ این دو تخصص از میان منابع و اسناد موجود در این زمینه بررسی می‌شود.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

منابع متعددی درخصوص رابطهٔ سازه و معماری وجود دارد که توسط متخصصانی از هر دو رشته نوشته شده است که در حرفه یا مدارس معماری و سازه مشغول به کارند و این موضوع را در یکی از حوزه‌های آموزش سازه[۱۲]، یکپارچگی سازه و معماری[۱۳]، مشارکت معمار با مهندس سازه[۱۴]، درک رفتار سازه[۱۵] و تاریخچهٔ ساختمان[۱۶] بررسی کرده‌اند. چون برای استفاده از دانش سازه ابتدا باید ادراک لازم به‌وجود آمده باشد. از میان این منابع، باید ابتدا رفتار، شکل و شیوهٔ عمل نیروها مورد بررسی قرار گرفته، سپس مهم‌ترین آن‌ها که نقش اصلی را در پایداری سازه‌ای ایفا می‌کند، مورد تحلیل و بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

مهدی فرشاد در کتاب *فرم‌های ساختمانی*، ضمن بحث دربارهٔ فرم و انواع آن، به مفاهیم و تعاریف کلی فرم‌های ساختمانی و ضوابطی برای ارزیابی آن‌ها پرداخته، سیر تکاملی فرم‌های ساختمانی و چگونگی دست یافتن به فرم‌های کامل یا بهینه[۱۷] را مورد اشاره قرار می‌دهد. فرشاد به ابعاد مختلف سازه و طراحی آن و گونه‌ای از طبقه‌بندی فرم‌های سازه‌ای براساس هندسه و فیزیک، پرداخته و با بیانی ساده، مفاهیم اولیهٔ سازه‌ای و انواع نیروها را تعریف می‌کند (فرشاد ۱۳۵۳).

ادوارد آلن در کتاب *فرم و نیروها*[۱۸]، همان‌گونه که از نام کتاب برمی‌آید، سعی دارد ضمن ساده‌سازی فرم‌های پیچیدهٔ معماری، تأثیر نیرو بر سازه و پخشایش نیروها در فرم را مطرح کند و در خلال آن، آشنایی مختصری با ضوابط اجرایی و استانداردهای مهندسی ایجاد نموده، نقش مواد و مصالح بر ایجاد فرم را بیان کند. تأکید وی در این کتاب بر محاسبهٔ نیروها، با بهره‌گیری از روش‌های ترسیمی[۱۹] است. وی می‌کوشد با طرح گفت‌وگوهایی بین دو متخصص سازه و معماری، زمینهٔ تعامل آن‌ها را در شکل‌گیری فرم از میان راه‌حل‌های سازه‌ای روشن سازد (Allen, and Boston Structures Group 2010).

محمود راش و فرای اتو در کتاب *پیدایش فرم*[۲۰] فرم‌هایی را که تحت تأثیر نیروهای طبیعی شکل‌گرفته‌اند، مورد بررسی قرار می‌دهند. هدف آن‌ها یافتن فرم‌هایی است که در محیط شکل می‌گیرند[۲۱] و براساس نیروهای طبیعی بهینه می‌شوند.[۲۲] آن‌ها فرم‌های طبیعی (جاندار و بی‌جان) را مطالعه می‌کنند و با آزمایش‌های مختلف، براساس روند طبیعی شکل‌گیری فرم، سعی در ایجاد فرم‌های قابل استفاده برای انسان دارند (Otto and Rasch 2001).

ماریو سالوادوری در کتاب *سازه در معماری* سعی دارد بدون استفاده از فرمول‌ها، به ساده‌سازی مفاهیم و تبیین نقش و جایگاه سازه در معماری بپردازد و تأثیر مفاهیم پایه را در تصمیم‌گیری‌های سازه‌ای نشان دهد (سالوادوری ۱۹۸۶). اشارهٔ این منابع به شکل‌گیری فرم از طریق نیروهاست. آن‌ها با استفاده از روابط و قواعد علم سازه یا از طریق تجربه و آزمایش[۲۳] سعی در توضیح و کنترل فرایند ایجاد فرم در معماری دارند. به‌نظر می‌رسد مسئله‌ای که معمار با آن روبه‌روست، سازهٔ صرف نیست، بلکه درکی کلی از سازه است که باعث بهبود طراحی می‌شود.

۳. شرح ارتباط سازه با معمار

نگارش منابع مرتبط با ارتباط سازه و معماری توسط متخصصان هر دو رشته نشان می‌دهد که این موضوع، مسئلهٔ مشترک هر دو شاخهٔ علمی است؛ بنابراین، تحقق مطلوب اهداف طراحی، نیازمند مشارکت هر دو تخصص است. درحقیقت، مشارکت، نیازمند همفکری متخصصان خبره‌ای است که دانش و مهارت مناسب طراحی، شخصیت و روحیهٔ مشارکتی دارند (Charleston and Pirie 2009). راه‌حل‌های طراحی معماری و سازه، با یکدیگر ارتباطی

تنگاتنگ دارند و از هم جدایی‌ناپذیرند، زیرا هریک بر عملکرد دیگری تأثیر می‌گذارد و این همان گفتهٔ ویتروویوس[۲۴] است که معماری باید سازه، عملکرد و زیبایی داشته باشد (Fahmi et al. 2012).

از طرف دیگر، موضوع جدایی مهندسی معماری و سازه نتیجهٔ فرایندی سیصدساله است. در گذشته، معماری حاصل کار صنعتگرانی بود که به صناعات و حِرَف مختلف تسلط داشتند و تجارب مختلف ساخت و ساز به‌تدریج، در آن‌ها به روش‌های حسی کاربرد و تأثیر نیرو در ایجاد فرم تبدیل شده بود، ولی طی تحولات اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در سه قرن اخیر (انقلاب صنعتی[۲۵]، پیدایش نحله‌های فکری، رشد شهرها و بسط حوزه‌های مختلف دانش)، تخصص‌های مختلف ساختمانی از یکدیگر منفک شدند (Adiss 2008). بااین‌حال، امروزه معمار هماهنگ‌کنندهٔ تخصص‌های مختلف ساختمانی است؛ بنابراین باید آگاهی کلی از هریک از این تخصص‌ها داشته باشد. او در طراحی، با مسائل مختلف کمی و کیفی روبه‌روست که باید به آن‌ها پاسخ گوید، ولی تبحرش در همهٔ این مسائل به یک اندازه نیست. در واقع در بیشتر پروژه‌ها، اطلاعات به قدری وسیع است که معمار توانایی کنترل همهٔ جزئیات امور تخصصی را ندارد. ازجملهٔ این موضوعات، ایمنی و امنیت ساختمان است که معمار نمی‌تواند آن را تضمین کند و این کار بر عهدهٔ مهندس سازه است. معماران تنها به موضوعات کلی سازه می‌پردازند؛ موضوعاتی که ارتباط بین فرم و سازه را تعیین می‌کند، درحالی‌که آن‌ها باید تسلط نسبی بر مفاهیم اساسی سازه‌ای، پخشایش بارها و تأثیری که بر فرم کلی بنا می‌گذارند نیز داشته باشند؛ به بیان دیگر، معماران باید آگاهی نسبی از الفبای سازه و قوانین و دستور زبان آن داشته باشند تا بتوانند به همراه یک روش حسی، با مسائل مربوط به نیرو برخورد نمایند (Moore 1999).

۴. سازه و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن (الزامات سازه‌ای)

محمد معین در تعریف واژهٔ سازه، آن را ساختار و ساختمان مطرح می‌کند (معین ۱۳۶۴). *واژه‌نامهٔ آکسفورد* آن را ارتباط بین عناصر یک شیء، کیفیتی سازماندهی‌شده، ساختمان یا هر شیء ساخته‌شده از چندین قسمت یا الگو یا روابط بین اجزای یک گروه که بر اثر مشاهده قابل تشخیص است، تعریف کرده است (لغت‌نامهٔ آکسفورد).

در واقع سازه در ساختمان، به انتظام نیرویی اطلاق می‌شود که پایداری و مقاومت ساختمان را برآورده می‌کند؛ بنابراین، سازه، تعامل منظم نیروهای عمل (نیروهای خارجی) و عکس‌العمل (تکیه‌گاه‌ها و نیروهای داخلی) است و عملکرد آن، تجزیه و متوازن‌سازی نیروهاست (چینگ ۱۹۹۵). ضمناً سازه دانشی توأم با مهارت است؛ مهارتی که متکی بر قضاوت و بر پایهٔ دانش گستردهٔ قواعد سازه‌ای، مصالح، جزئیات ساخت، فرایند ساخت و نصب و فنون تحلیلی است (Allen, Zalewski, and Boston Structures Group 2010,XIV). سالوادوری اظهار می‌دارد که سازه دارای الزاماتی شامل تعادل، پایداری، مقاومت، عملکرد، اقتصاد و فرم است (سالوادوری ۱۹۸۶، ۴۱).

تعادل[۲۶] که مهم‌ترین اتفاق در ایستایی (استاتیک[۲۷]) است، به معنی وضعیت عدم حرکت و سکون در کل و اجزای ساختمان است. چنان‌چه نیروهایی که بر جسم وارد می‌شوند در توازن با یکدیگر باشند، جسم در آن جهت حرکت نخواهد کرد و این وضعیت را تعادل می‌نامند. در واقع، نیروهای مساوی و در خلاف جهت یکدیگر، سبب تعادل در جهت مورد نظر می‌شوند. در این شرایط نیروهای واردهٔ بیرونی و عکس‌العمل‌های درونی و بیرونی جسم با هم در حالت توازن قرار می‌گیرد.[۲۸]

مقاومت[۲۹] در یک عنصر سازه‌ای (که در ارتباط با نیروهای داخلی است)، به معنی بی‌عیب بودن اجزای سازه و توانایی تحمل بارهای وارده به این اجزاست. این مفهوم که مستقیماً با جنس مصالح سازه‌ای مربوط است، به معنی میزان تحمل یک عنصر سازه‌ای، تحت نیروهای وارده است.

پایداری[۳۰] به معنی مقاومت ساختمان در مقابل واژگونی است (در مقابل نیروهای خارجی)، بدون آنکه اجزای آن منفصل شوند که این نوع پایداری را پایداری هندسی می‌نامند. پایداری هندسی در ارتباط با تعداد و انواع اتصالات و چگونگی کاربرد آن‌ها (اتصالات ساده یا غلتک و اتصالات پیچیده مانند مفصل) است. از طرف دیگر، پایداری مقاومتی (پایداری درونی) نیز وجود دارد که به مفهوم تحمل باربری ذرات مادی جسم تحت تأثیر نیروهاست.

عملکردِ[۳۱] یک سازه به معنی باربری مناسب آن است؛ یعنی در سازه بیشی و کمی در آن وجود ندارد و مصالح به‌لحاظ اقتصادی به درستی مورد استفاده قرارگرفته‌اند و این همان تراش نیرویی است که فرم سازه‌ای را شکل می‌دهد.؛ برای مثال قوس برای بارهای فشاری[۳۲] و یک خط صاف، برای تحمل بارهای کششی[۳۳] مناسب است.

اقتصاد یکی از لازمه‌های سازه است و سازه‌ای مناسب است که نیروها به‌سادگی در آن جریان یابند و بیشی و کمی طرح در آن وجود نداشته باشد. گرچه کارایی سازه‌ای، مسئله‌ای عمده است، در انتخاب نظام سازه‌ای باید به عوامل دیگری نیز چون تولید، کنترل و ساخت توجه شود. اقتصاد ساختمان تحت تأثیر فناوری موجود و سرعت ساخت نیز قرار می‌گیرد. در واقع، علت پیدایش و شکل‌گیری نظام‌های سازه‌ای، سهولت حمل نیروها، استفادهٔ بهینه از مصالح و توجه به مسائل اقتصادی و وجوه معماری است.

فرم: سازه به‌عنوان یکی از اجزای طراحی، نقش اصلی را در پدید آوردن فرم دارد؛ بنابراین فرم سازه خود یکی از اجزای سازه‌ای محسوب می‌شود. فرم سازه‌ای، خلق زیبایی از طریق تراش و اندازهٔ مناسب، به‌منظور تسهیل جریان نیرو در یک نظام سازه‌ای است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این گونه فرم‌ها از نظر بصری، زیبا و تأثیرگذارند. نمونه‌های این تراش فرمی به‌وفور در طبیعت دیده می‌شود و به همین دلیل طراحان از طبیعت الگو می‌گیرند؛ بنابراین طراحان، برای دستیابی به ترکیبی مناسب و زیبا در فرم، باید تراش نیرویی را نیز مد نظر قرار دهند.

نکتهٔ مهم و قابل توجه این است که برای فهم و شناخت سازه، دستور زبانی وجود دارد که به نیرو وابسته است. نیرو رکن اساسی سازه و مهم‌ترین بخش آن است. در واقع، سازه نظمی هندسی برای انتقال و جریان نیروهاست. این نیروها هستند که به مواد و مصالح مختلف شکل، ابعاد و ویژگی‌های خاصی می‌بخشند؛ بنابراین برای درک سازه، مطالعه و درک نیروها و نحوهٔ پخشایش و توزیع و تحمل آن‌ها در مصالح مختلف لازم است. انتظام بخشی آگاهانه به جریان مطمئن و روان نیروها در یک جزء و همچنین در مجموعهٔ اجزا (کل ساختمان) جزو عوامل بنیادین شکل‌گیری و پیدایشِ فرم ساختمان است؛ بنابراین شناخت نیرو و مؤلفه‌های آن از ضروریات است.

۵. نیرو و مؤلفه‌های آن

نیرو کمیتی برداری است که باعث شتاب گرفتن اجسام می‌شود. در واقع هر اثری که سبب تغییر جهت یا جنبش در یک شیء می‌گردد، نیرو نامیده می‌شود. چنانچه تأثیر نیرو در شیء، آن را در حالت تعادل قرار دهد، شیء مقاومت لازم برای حمل نیروهای وارده را دارد (تعادل یا شرایط استاتیکی).

نیروها را می‌توان به دو دستهٔ داخلی و خارجی تقسیم کرد. نیروهای مابین ذرات سازندهٔ اجسام را داخلی یا درونی می‌گویند و به نیروهایی که از محیط به اجسام وارد می‌گردد، نیروهای خارجی یا بیرونی گفته می‌شود (جاذبه، نیروهای جانبی، عکس‌العمل‌ها و...). تحت تأثیر نیروهای بیرونی و تمایل به حرکت و جابه‌جایی ذرات در جسم، نیروهای درونی به‌وجود می‌آیند که رفتارهای متفاوتی را در مصالح مختلف و به اشکال گوناگون پدید می‌آورند. علمی را که به مطالعه و تعیین رفتار ذرات مختلف ماده و ارتباط آن‌ها بر اثر نیروهای خارجی می‌پردازد، مکانیک یا مقاومت مصالح می‌نامند. طبیعی است که در شرایط تعادل و سکون، ذرات نمی‌توانند نسبت به یکدیگر جابه‌جایی داشته باشند، اما در آن‌ها تمایل به حرکت وجود دارد و به این ترتیب، در آن‌ها نیروهای داخلی ایجاد می‌شود.

تمایل به حرکت و جابه‌جایی یا تغییر شکل ذرات می‌تواند به‌صورت تغییر شکل‌های مماسی (در صفحه) یا تغییر شکل‌های عمودی (عمود بر صفحه) پدید آید. تمایل به تغییر شکل‌های مماسی به همراه خود نیروهای بین ذره‌ای یا تنش‌های[۳۴] مماسی را موجب می‌گردند که به آن‌ها تنش‌های برشی[۳۵] نیز گفته می‌شود. مجموع یا برآیند تنش‌های برشی در هر مقطع، نیروی برشی یا پیچشی را به‌وجود می‌آورد. از سوی دیگر، تغییر شکل‌های عمودی به تنش‌های عمودی منجر می‌گردد که برآیند این دسته تنش‌ها، نیروهای محوری (کششی و فشاری) و خمشی[۳۶] مقطع را موجب می‌شوند.

در واقع، نیروهای درونی بین ذرات، هنگامی‌که ترکیب می‌شوند، جریان‌هایی را پدید می‌آورند که درون جسم، تحمل خمشی، پیچشی[۳۷] یا برشی ایجاد می‌کند. به بیان دیگر، ترکیب پیچیدهٔ تحمل درونی است که ظرفیت برشی،

خمشی یا پیچشی نام می‌گیرد. اما نیروهای درونی و باربری مصالح، به‌سبب تغییر شکل رخ می‌دهد که باید مفهوم آن روشن گردد.

تغییر شکل[۳۸] وضعیتی است که در اجسام با مصالح مختلف، بر اثر بارهای خارجی رخ می‌دهد (Zuk 1963). در این شرایط، فاصلهٔ بین پیوندهای اتمی تغییر می‌کند و نیروهای داخلی بین ذرات با نیروهای خارجی مقابله می‌کنند؛ درنتیجه، عکس‌العمل‌های داخلی ایجاد می‌شود تا از تغییر شکل بیشتر جلوگیری گردد. اگر نیروی وارده در حد توان مصالح باشد، نیروهای داخلی ایجاد شده، برای مقاومت در برابر نیروهای خارجی کافی‌اند و جسم در یک وضعیت سکون و تعادل قرار می‌گیرد ولی چنانچه نیروی وارده بیش از توان مصالح باشد، آنگاه به تغییر شکل دائمی و درنهایت به ناپایداری، گسیختگی و شکست ساختاری جسم منجر می‌شود. تغییر شکل مصالح بر اثر نیروها را می‌توان با دقت و توسط آزمایش اندازه گرفت. اگر نسبت نیرویی که بر واحد سطح جسم وارد می‌شود (تنش) بر تغییر شکل جسم (کرنش[۳۹]) اندازه‌گیری کرده و در جدولی ثبت گردد، این جدول نشان‌دهندهٔ مقاومت آن مصالح خواهد بود. اگر پس از حذف بار، جسم به شکل اولیهٔ خود باز گردد، این وضعیت، حالتی خاص در مصالح است که کشسانی یا الاستیسیته[۴۰] نام دارد، ولی اگر جسم دچار تغییر شکل برگشت‌ناپذیر گردد و دیگر به شکل اولیهٔ خود باز نگردد، این وضعیت را پلاستیسیته[۴۱] می‌نامند.

اگر به موضوع تغییر شکل دقت شود، مشاهده می‌گردد هر چقدر که پیوندهای مولکولی بین اتم‌های جسم متراکم‌تر و محکم‌تر بوده و آرایش و هندسه اتم‌ها مستحکم‌تر باشد (مانند فولاد، الماس، گرانیت) تغییر شکل‌ها به‌دشواری اتفاق افتاده و در نتیجه ظرفیت باربری مصالح افزایش می‌یابد. بنابراین تغییر شکل یک مصالح با مقاومت و ساختار درونی آن مرتبط است.

برای درک بهتر نیروها و تأثیرات آن‌ها بر شکل‌گیری فرم، نگاه به طبیعت می‌تواند راهگشا باشد، زیرا طبیعت، مهد شکل‌گیری نیروها و پیدایش فرم‌های متنوع است که با میلیون‌ها سال آزمایش و تجربه شکل گرفته است. بنابراین در ادامهٔ بحث به بررسی مختصری از رابطهٔ نیرو و فرم در طبیعت پرداخته می‌شود.

۶. نیرو، ساختار و فرم‌های طبیعی

فرم‌ها و اشکال طبیعی، همواره الهام‌بخش معماران بوده و در الگوبرداری از فرم‌های طبیعی موضوعاتی چون عملکرد، مسائل اقتصادی، زیبایی و دوام همیشه مورد توجه قرار گرفته است. فرم‌هایی که طی میلیون‌ها سال فرایند تکامل، تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و به‌منظور برآوردن نیازهای مختلف شکل گرفته و به‌وجود آمده‌اند. تداوم حیات، دوام و تحمل نیروهایی چون جاذبه، باد، زلزله و انقباض و انبساط، از مهم‌ترین این عوامل بوده است (Benjamin 1990). به‌عبارتی طی قرن‌ها نیروها، فرم‌های طبیعی را تراش داده‌اند و ضعف‌ها و زوائد شکلی آن‌ها را از بین برده و با شرایط زمانی و مکانی سازگاری داده‌اند؛ این در حالی است که عملکرد، شرایط اقتصادی و دیگر نیازهای طبیعی موجودات نیز همزمان تحقق یافته است. این فرایند تا پایان عمر زمین، همچنان ادامه خواهد یافت. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مصالح تحت تأثیر نیروهای وارده، تمایل به تغییر شکل دارند اما میزان این تغییر شکل در مصالح مختلف یکسان نیست؛ برای مثال، تحت تأثیر یک بار ثابت، تغییر شکل چوب به مراتب بیشتر از فولاد است و به همین دلیل نسبت به آن ظرفیت باربری کمتری دارد. اصولاً مصالح طبیعی زنده تفاوت عمده‌ای با مصالح مصنوعی دارند. در مصالح طبیعی زنده، نیروهای محیطی بر آرایش ذرات درونی مصالح تأثیر گذارده و به آن‌ها شکل می‌دهد؛ برای مثال ظرفیت باربری آن‌ها را با توجه به شرایط زمانی و مکانی تغییر می‌دهد. استخوان و اندام ظریف کودکانه به‌مرور، بر اثر رشد و تعامل با محیط تکامل می‌یابد و قدرت جوانی در آن ایجاد می‌شود و در شرایط حاد نیز که اندام‌ها آسیب می‌بینند یا استخوان‌ها می‌شکنند، ظرفیت ترمیم و تقویت مجدد وجود دارد. این ویژگی، عمده‌ترین وجه تمایز فرم‌های شکل‌گرفته از مصالح طبیعی زنده در مقایسه با فرم‌های از جنس مصالح بی‌جان یا مصنوع است؛ یعنی در موجودات زنده، فرم‌ها و ظرفیت‌های باربری، مدام در تعامل با محیط و نیروهای محیطی در حال تغییر است، درحالی‌که در طبیعت بی‌جان و فرم‌های مصنوع، ظرفیت باربری ثابت و قابل پیش‌بینی است. تفاوت دیگر مصالح

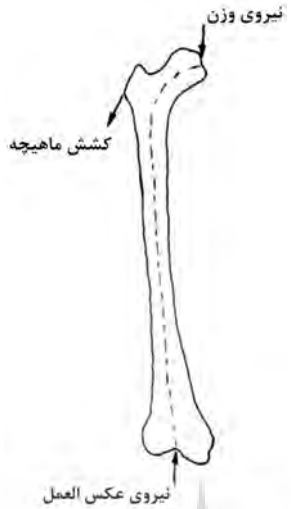
طبیعی با مصالح مصنوع، در نحوهٔ باربری و جریان نیروها در درون آن‌هاست. آنچه براساس انباشته شدن مصالح و فشار به‌وجود آمده، عمدتاً ظرفیت باربری فشاری و آنچه تحت تأثیر کشش شکل گرفته، عمدتاً ظرفیت باربری کششی دارد؛ بنابراین طبیعت ابتدا دو نیروی مستقل کشش و فشار (نیروهای محوری) را می‌شناسد که در ترکیب توأمان این نیروها، ظرفیت باربری برشی، خمشی و پیچشی به‌وجود می‌آیند.

از یکدستی و همگونی بافت و آرایش ذرات (هموژنیته[۴۲]) و خواص مکانیکی یکسان در جهات مختلف ماده (ایزوتروپیک[۴۳]) که از ویژگی مصالح صنعتی مانند فولاد است، در مصالح طبیعی خبری نیست. اساساً طبیعت از مواد پروتئینی، قندی، کلسیمی و ترکیبات آلی و فاسدشدنی تشکیل شده است که در مقایسه با مواد و مصالح مصنوع مانند فلزات که ساختار اتمی متراکم و هندسی و محکمی دارند، مقاومت بسیار کمتری دارد؛ البته این به معنی ضعف باربری فرم‌های طبیعی نیست. باربری شگفت‌انگیز فرم‌های طبیعی طی فرایند شکل‌گیری و ظرف میلیون‌ها سال، در تعامل با نیروهای محیطی به‌وجود آمده است. در موجودات زنده که امکان رشد همزمان با نیروهای خارجی را دارند، ترازهای نیرویی درون فرم، تبدیل به آرایش لایه‌ای درون آن‌ها می‌شود به این معنی که جریان باربری لایه‌ای بر ساختار فرم تأثیر می‌گذارد و ذرات فرم به تدریج و در حین رشد تحت تأثیر آن شکل می‌گیرد و براساس این لایه‌ها، ترازهای نیرویی به‌وجود می‌آیند. این ترازها جمع برداری نیروهاست و فرم حاصل، نتیجهٔ آرایش جریان نیروهای درونی فرم است؛ بنابراین، اگر نیروها بتوانند به شکل طبیعی در درون فرم جریان یابند، آن‌گاه فرم‌هایی حاصل می‌شود که به‌صورت طبیعی بارها را تحمل می‌کنند؛ یعنی مقدار مصالح و ضخامت در هر نقطه از فرم، متناسب با نیرویی که باید حمل گردد انباشته می‌گردد و فرم ایدئال و بهینه از نظر باربری به‌وجود می‌آید.

برای مثال، اسکلت استخوانی بدن انسان که حدوداً نیمی از آن از مواد پروتئینی و نیمی از مواد کانی تشکیل شده، علاوه بر حمل بار بدن، محافظت از اندام‌های داخلی مانند قلب، شش‌ها را ممکن ساخته و انسان را قادر به حرکت می‌سازد؛ این در حالی است که در حدود ۱۵ درصد وزن بدن را تشکیل می‌دهد. ظرفیت باربری فشاری استخوان برابر چدن است با این تفاوت که بسیار سبک‌تر از آن است. وزن مخصوص استخوان تقریباً ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است و ظرفیت نهایی فشاری آن در حدود ۲۰۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و ظرفیت نهایی کششی آن در حدود ۱۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است، درحالی‌که وزن مخصوص آهن ریخته‌شده ۷/۸۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب و مقاومت نهایی کشش و فشار آن برابر دوهزار کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. سبکی استخوان به نسبت مقاومت قابل ملاحظهٔ آن، به جهت تخلخل آن است. بافت متخلخل استخوان، متشکل از ذرات صفحه‌ای بسیار کوچک است که در سراسر ماده، با آرایش سه‌بعدی و تحت تأثیر نیروها پخش شده‌اند. آرایش منظم ذرات بافت استخوان، تحت تأثیر بارهای فشاری وارده بر آن را می‌توان در تصویر زیر که از استخوان ران پای انسان تهیه شده، به‌خوبی مشاهده کرد.

خطوط مشخص‌شده، آرایش ذرات داخلی استخوان را تحت فشار و کشش نشان می‌دهد، به این معنی که ذرات واقع در این راستاها کاملاً کشیده یا فشرده می‌شوند (ترازهای کششی و فشاری یا خطوط ایزواستاتیک[۴۴]). در واقع، این ذرات همزمان با رشد و برای تحمل و مقاومت در برابر نیروهای وارده شکل می‌گیرند، ولی این جریان نیرو و شکل‌گیری طبیعی فرم‌ها، زمانی که از مصالح مصنوع استفاده می‌شود امکان‌پذیر نیست؛ یعنی خطوط ایزواستاتیک (نیروهای کششی و فشاری) وجود دارند اما آرایش ذرات مادهٔ مصنوعی، ثابت و از قبل شکل گرفته است، بنابراین ضروری است که جریان نیروها در این مصالح نیز بررسی شود.

تصویر ۱: تجسم فضایی خطوط نیرو در سر استخوان ران پا (فرشاد ۱۳۵۳)



تصویر ۲: جسم آزاد استخوان ران پا (فرشاد ۱۳۵۳)

۷. نیرو، سازه و فرم‌های مصنوع (فرم معماری)

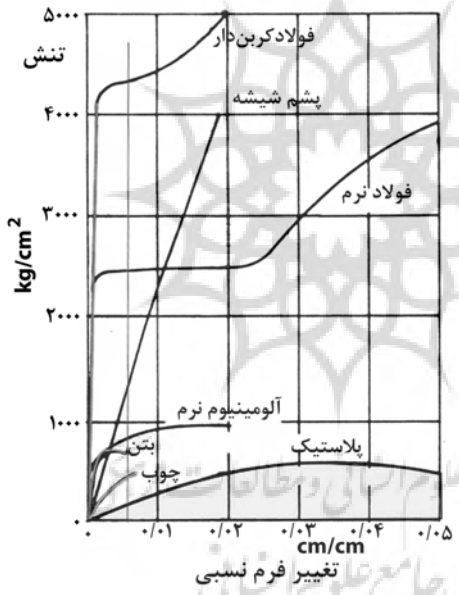
به‌طور کلی، فرم اصطلاحی است که در حوزه‌های مختلف علوم و دانش بشری، معانی کاربردی ویژه دارد، اما در زبان فارسی نمی‌توان به‌طور کاملاً دقیق، کلمهٔ معادلی برای فرم در نظر گرفت. فرم به معنی شکل، صورت، رسم (دهخدا ۱۳۷۷) ریخت، شکل، وضع، هیئت، حالت (عمید ۱۳۸۱) ترکیب عناصری که مجموعه‌ای واحد را به‌وجود آورده‌اند (معین ۱۳۶۴) و شخصیت، سرشت و ساختار است (ظفرمند ۱۳۸۶، ۱۵) اما آنچه در این تحقیق مد نظر است، آن معنی از فرم است که به گفتهٔ هربرت رید، شکل و آرایش اجزا و جنبهٔ دیدنی اثر است (رید ۱۳۷۴، ۲۱). بنابراین فرم، شخصیت و هویت قابل درک یک شیء است که به‌واسطهٔ آن اشیاء شناخته شده و از هم تمیز داده می‌شوند. اما فرم معماری، تصویری قابل رؤیت از ماده است که آن را شکل می‌دهد؛ بنابراین دارای اجزا، تناسبات و اندازه است (هوشیار و باروق ۲۰۱۳) و دربرگیرنده و انتقال‌دهندهٔ مفهوم است و به شناسایی انسان از ویژگی‌های محیط زیستش ارتباط دارد و تابع نحوهٔ درک انسان از جهان است (گیدئون ۱۹۴۸). فرم اصلی‌ترین عامل معماری است و باید با عوامل مختلف مؤثر بر معماری ازجمله نظام ارزشی، فرهنگ‌ها، شرایط محیطی، عملکردی و همچنین پایداری هماهنگ باشد. در طول تاریخ، بسیاری از معماران آن را به‌عنوان مهم‌ترین عامل در طراحی در نظر گرفته و موضوعات دیگر را تحت‌الشعاع آن قرار داده‌اند، ولی با توجه به موضوعات مهم مؤثر بر معماری، ازجمله اقتصاد که از مهم‌ترین موضوعات در جوامع بشری است، هر فرمی نمی‌تواند قابل پذیرش باشد، زیرا فرم باید شرایط مناسبی را برای زندگی انسان ایجاد کند که به همراه آن، همهٔ عوامل مؤثر بر معماری ازجمله شرایط اقتصادی بهبود خواهد یافت.

از طرف دیگر، همان‌گونه که ذکر شد، فرم‌های طبیعی، همواره برای بشر الهام‌بخش بوده و وی در احداث سازه‌های اولیه، از آن‌ها الگوبرداری می‌کرده است. پایه‌های ضخیم همراه با سقف و طاق‌های قوسی‌شکل و سنگین از جنس گل و آجر و سنگ، قرن‌ها مصالح و فرم‌های ساختمانی بشر را تشکیل می‌داد. جریان باربری در این بناها با توجه به مصالح طبیعی‌شان مانند الگوهای طبیعی بود (فشاری و کششی)؛ یعنی عناصر ساختمانی، ضخیم و سنگین بودند و می‌توانستند نیروهای ثقلی و رانشی قابل ملاحظه‌ای را بدون خرابی و واژگونی تحمل کنند.

با پیشرفت صنعت و افزایش تولید مواد و مصالح ساختمانی مانند آهن، همین‌طور با پیدایش فولاد و بتن و پیشرفت

در صنعت چوب، فرم‌های ساختمانی متحول و دگرگون شد. بناهای بلند، سطوح افقی و تخت، پایه‌های ظریف و فرم‌های بدیع و امکانات نوین ساختمانی، در دسترس طراحان و سازندگان ساختمان قرار گرفت. رفتار مواد و مصالح دگرگون شد؛ یعنی قوانین باربری طبیعی (لایه‌ای) و انتقال نیروی محوری (کشش و فشار) که بر مصالح طبیعی حاکم بود، پیچیده شد و ظرفیت تحمل نیروهای برشی، خمشی و پیچشی نیز در این دسته فرم‌ها و مصالح مطرح گردید. این تغییر در بافت مصالح که در اثر فرایند ساخت به‌وجود آمده بود، گرچه قابلیت‌های باربری مصالح مصنوع را افزایش داده، منجر به افزایش دهانه و ارتفاع‌ها گردید و معماری را دگرگون کرد، باعث شد که جریان باربری نیز پیچیده‌تر شود.

مصالح نوین دارای ساختاری خاص و متراکم‌اند و عمدتاً در اثر حرارت و با ترکیب با عناصر دیگر تولید می‌شوند (صناعت) و درنتیجه، تحت تأثیر نیروهای وارده، رفتاری پیچیده دارند، ولی این رفتار و ظرفیت باربری آن‌ها قابل ثبت و اندازه‌گیری است.[۴۵] منحنی‌های مقاومتی برخی از این ویژگی‌ها، ازجمله میزان تغییر شکل این مصالح را تحت تأثیر نیروی وارده نشان می‌دهند؛ برای مثال، منحنی مقاومتی فولاد که از مهم‌ترین مصالح مصنوع است[۴۶]، نشان‌دهندهٔ رفتاری قابل کنترل در جمیع جهات، (ایزوتروپیک) و ظرفیت باربری قابل توجه است.



تصویر ۳: منحنی مقاومتی مصالح مختلف (فرشاد ۱۳۵۳)

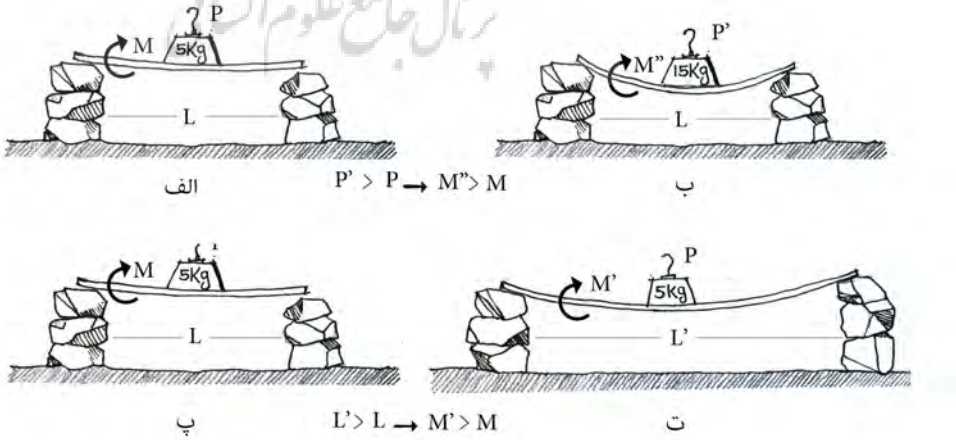
تصویر (۳) منحنی مقاومتی چند گونه از مصالح را در مقایسه با یکدیگر نمایش می‌دهد که نمایانگر رفتار و مقاومت نسبی آن‌ها تحت تأثیر نیروی کشش یا فشار است. میزان باربری هریک از این مصالح، سبب ایجاد ضخامت‌های مختلف در عضو باربر می‌شود. به این ترتیب مصالحی که در مقابل اعمال نیروها، مقاومت بیشتری دارند، ضخامت و سطح کمتری را نسبت به سایر مصالح، به خود اختصاص می‌دهند؛ برای مثال، هنگامی‌که ترکیبات آلیاژی آهن افزایش می‌یابد، در مقدار معینی از ماده، ظرفیت باربری آن بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که هریک از مصالح، بارها را براساس ویژگی‌های خود حمل می‌کنند؛ یعنی ممکن است مصالح در کشش قوی باشند یا در فشار یا ظرفیت کششی و فشاری برابری داشته باشد. مقاومت فشاری و کششی برابر در مصالح به خاصیتی مهم منجر می‌شود که به آن می‌پردازیم.

۸. خمش

موضوع خمش را با نگاه به سه فرم نشان‌داده شده، تحت تأثیر بارِ یکسان آغاز می‌کنیم (تصویر ۴). این فرم‌ها همگی در وضعیتِ ثابت و پایدار قرار دارند و ذرات درونی هر سه فرم، تحت تأثیر بارها وارده قرار گرفته‌اند. فرم آویخته (شکل الف)، تحت تأثیر بار وارده (مثلاً ثقل) در حال کشیده شدن است و همهٔ ذرات آن نیروی کششی را تجربه می‌کند، درحالی‌که فرم «ب» که یک قوس است، عمدتاً در حال فشرده شدن بوده و ذراتش عمدتاً تحت تأثیر نیروی فشاری قرار دارند. اما جریان بار در فرم صاف (شکل پ)، به‌سادگی قابل تشخیص نیست و صرفاً تحت تأثیر کشش یا عمدتاً فشار قرار نمی‌گیرد، بلکه بارهای وارده به‌صورت کشش و فشار توأم حمل می‌شود. یکپارچگی مقطع فرم، ضامن عملکرد آن به‌صورت ذکرشده است؛ یعنی پاره‌ای از ذرات مقطع کشیده شده و مابقی تحت تأثیر فشار قرار می‌گیرند. به‌عبارت دیگر این فرم، بارهای خود را به شکل کشش و فشار توأمان، یعنی خمش حمل می‌کند.

تصویر ۴: وضعیت‌های مختلف باربری به‌ترتیب از چپ به راست: الف. زنجیرهٔ آویختهٔ کششی؛ ب. قوس فشاری؛ پ. تیر افقی

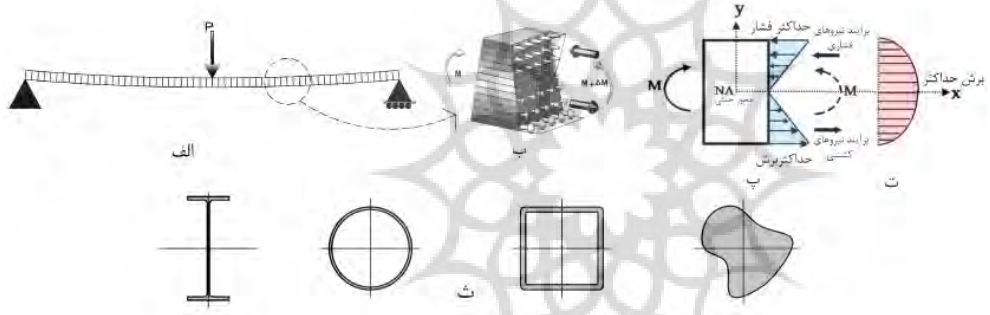
عوامل بیرونی و درونی مختلفی بر شکل‌گیری نیروی خمشی و تحمل خمشی در یک عضو سازه‌ای مؤثرند. میزان بار وارده، طول عضو سازه‌ای، وضعیت تکیه‌گاهی و نحوهٔ اتصال اعضای سازه‌ای به یکدیگر، عوامل بیرونی مؤثر در ایجاد نیروی خمشی را تشکیل می‌دهند. به‌طوری‌که در تصویر (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی وارده، تغییر شکل و افت عضو باربر نیز افزایش می‌یابد و به همین ترتیب است، اگر میزان طول عضو باربر با مشخصات ثابت افزایش یابد؛ بنابراین مشخص است که مقدار نیروی خمشی که در درون عضو ایجاد می‌شود به وضعیت تکیه‌گاهی، طول و نوع و مقدار بار وارده که همگی عوامل بیرونی هستند، وابسته است و این در حالی است که تحمل یا ظرفیت خمشی یک عضو سازه‌ای به جنسیت و نحوهٔ پخشایش و توزیع عکس‌العمل‌های درونی مقطع عضو سازه‌ای بستگی دارد. به همین دلیل، اگر طول و مشخصات و میزان بار بیرونی وارده بر عضو سازه‌ای ثابت فرض شود ولی شکل یا جنس مصالح عضو باربر تغییر کند، ظرفیت و تحمل خمشی مقطع دچار تغییرات اساسی می‌شود.



تصویر ۵: وضعیت‌های مختلف فرم صاف و نیروی خمشی درون آن: الف و ب. ازدیاد نیروی خمشی بر اثر افزایش بار؛ پ و ت. ازدیاد نیروی خمشی بر اثر ازدیاد طول فرم

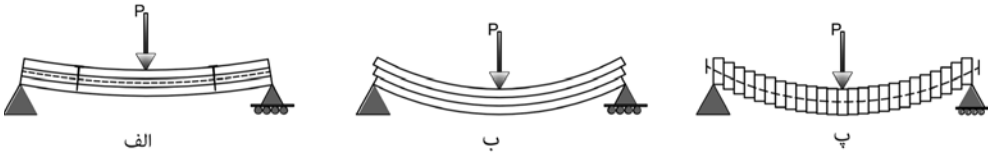
همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود، وجود هم‌زمان عکس‌العمل‌های کششی و فشاری در یک مقطع، مستلزم وجود ناحیه یا سطحی است که در آن کشش و فشار وجود نداشته باشد. این سطح، سطح خنثی[۴۷] نام دارد که در اجسام الاستیک بر مرکز سطح جسم منطبق است.[۴۸] به‌عبارت دیگر، از طریق این سطح است که بخش کششی با بخش فشاری مقطع مربوط می‌شود. این‌گونه است که ویژگی‌های هندسی سطح مقطع مانند شکل، سطح، عرض و ارتفاع مقطع بر میزان و نحوهٔ باربری خمشی مقطع تأثیر می‌گذارند.

شکل مقطع نمایانگر نحوهٔ پخشایش ذرات در مقطع جسم است. تحت تأثیر نیروی خمشی، عکس‌العمل‌های کششی و فشاری در این ذرات ایجاد می‌شود. برآیند عکس‌العمل‌های کششی و فشاری مقطع عضو سازه‌ای با فاصله‌ای، در دو سمت صفحهٔ خنثی قرار می‌گیرند و به این ترتیب، بار خارجی به گشتاور عکس‌العمل‌های درونی تبدیل می‌شود و کمیت عکس‌العمل‌ها یا برآیند آن‌ها به شکل و سطح و ابعاد مقطع مربوط می‌گردد. در واقع بر اثر خم شدن عنصر سازه‌ای تحت تأثیر بار، سطح مقطع آن به ترتیبی که در شکل نشان داده شده، حول صفحهٔ خنثی تغییر زاویه داده و می‌چرخد، پس نیروی خمشی با ویژگی چرخشی سطح مقطع عنصر سازه‌ای مربوط می‌گردد. این ویژگی ممان اینرسی نام دارد. ممان اینرسی[۴۹] در حقیقت گشتاور[۵۰] سطح مقطع عنصر سازه‌ای نسبت به تار خنثی است و بزرگی آن نشانهٔ توان تحمل خمشی بیشتر عنصر سازه‌ای است.



تصویر ۶. الف، ب، پ، ت. خمش در تیر ساده و نحوهٔ توزیع نیروها در ذرات مختلف مقطع یک تیر الاستیک؛ ث. اشکال مختلف مقطع با توجه به نحوهٔ پخشایش ذرات در سطح

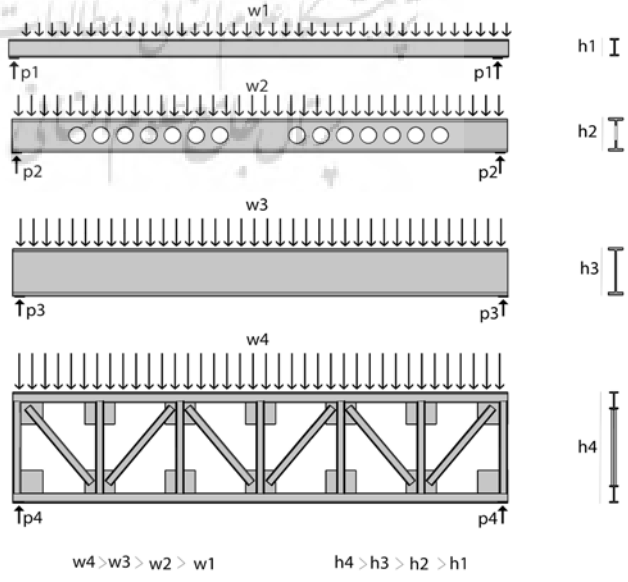
علت چرخش سطح مقطع عنصر سازه‌ای تحت تأثیر خمش، یکپارچگی مقطع است. یکپارچگی مقطع به این معنی است که همهٔ اجزا و قطعات تشکیل‌دهندهٔ مقطع به‌خوبی به هم چسبیده و یک‌تکه و یکپارچه هستند. اگر لایه‌های تشکیل‌دهندهٔ یک مقطع از هم جدا باشند، بر اثر نیروی خمشی وارده، لایه‌ها به‌صورت مستقل عمل نموده و بر روی هم می‌لغزند و باربری تنها توسط پایین‌ترین لایهٔ مجموعه اتفاق می‌افتد (شکل ۷). عدم یکپارچگی و نبود چسبندگی مابین لایه‌ها موجب می‌گردد تا توان باربری چند لایه انباشته، به باربری یک لایه منحصر و محدود شود. درصورتی‌که اگر لایه‌ها به‌خوبی به یکدیگر چسبیده باشند، در فصل مشترک لایه‌ها عکس‌العمل‌های کوچک ایجاد می‌شود و به‌واسطهٔ این عکس‌العمل‌ها، لایه‌ها به شکل یکپارچه باربری می‌کنند. این عکس‌العمل‌ها را نیروهای برشی می‌نامند. درحقیقت، نیروهای برشی یکپارچگی مقطع را تضمین می‌کنند و این‌چنین است که مقطع می‌تواند عکس‌العمل‌های کششی و فشاری را توأمان بپذیرد و در مقابل خم شدن مقاومت کرده و به‌اصطلاح تحمل یا ظرفیت خمشی بیابد.



تصویر ۷: الف. لایه‌های پیوسته به‌صورت طولی؛ ب. لایه‌های جدا از هم به‌صورت طولی؛ پ. لایه‌های جدا از هم به‌صورت عرضی

چنانچه عکس‌العمل‌هایی که در مقطع بر اثر نیروی خمشی وارده ایجاد می‌شود (نیروهای برشی) از آنچه لایه‌ها و ذرات سازنده مقطع عنصر سازه‌ای می‌توانند تحمل کنند بیشتر باشد، آنگاه چسبندگی بین لایه‌ها و ذرات از دست رفته و مقطع، مقاومت و یکپارچگی خود را از دست می‌دهد و به‌اصطلاح خراب شده و می‌شکند. این‌گونه است که تحمل خمشی در مصالح مختلف، متفاوت است و به جنسیت و ساختار مواد و مصالح و چسبندگی بین ذرات و درنتیجه، ظرفیت‌های برشی مواد و مصالح بستگی دارد؛ مثلاً چوب در مقایسه با بتن فولادی یا فولاد، توان باربری کمتری دارد. پس جنس مصالح نقش مهمی در مقاومت آن‌ها در مقابل نیروهای کششی و فشاری دارد و درنتیجه، جنسیت، فاکتور مهمی در تحمل خمشی محسوب می‌شود.

بنابراین ظرفیت خمشی یک عضو سازه‌ای اولاً به مقدار نیروی خمشی وارده یعنی مقدار بار، دهانهٔ عضو باربر و صفحهٔ اتصالی آن با دیگر اعضا و زمین بستگی دارد، ثانیاً به مقاومت مصالح عضو سازه‌ای (چوب، فولاد و...) و توان و ظرفیت باربری ذرات سازنده آن (جنس مصالح) وابسته است. درحقیقت همان‌طور که با تغییر در مقدار بار و دهانه و نوع اتصالات می‌توان مقدار نیروی خمشی وارد بر سازه را تقلیل داد، ازآنجایی‌که ظرفیت خمشی به هندسه و ویژگی‌های چرخشی سطح مقطع آن بستگی تام دارد، می‌توان با تغییر و ازدیاد ممان اینرسی مقطع عضو سازه‌ای، عکس‌العمل‌های درونی ایجادشده را به‌طور مناسبی در مقطع پخش نمود و مقادیر آن‌ها را تقلیل داد و آن‌ها را در محدودهٔ قابل تحمل ذرات مصالح انتخابی نگه داشت. چون نیروی خمشی وارده با مقدار بار به توان یک و طول دهانه به توان دو نسبت مستقیم دارد، کنترل و کم کردن دهانهٔ عضو باربر به‌مراتب بیش از تقلیل بار می‌تواند در کم شدن نیروی خمشی مؤثر باشد. همچنین چون در رابطهٔ ممان اینرسی که شاخصهٔ ظرفیت خمشی عضو سازه‌ای است، عرض مقطع تأثیری به‌مراتب کمتر از عمق آن دارد، با عمیق‌تر کردن مقطع عضو سازه‌ای و کاهش دهانهٔ آن می‌توان ظرفیت باربری عضو را کنترل نموده، بهبود بخشید. در واقع به این ترتیب است که مقاطع عضو سازه‌ای با عنایت به ظرفیت ثابت مصالح مورد استفاده قرار گرفته، در طول عضو شکل می‌گیرد و فرم سازه‌ای آن مشخص می‌شود و خلاصه طراحی سازه‌ای محقق می‌گردد. در واقع، طراحی سازه عبارت است از به‌کارگیری بهینه و به‌اندازهٔ مصالح به‌گونه‌ای که سازه بتواند با استفاده از حداقل مصالح و با ایمنی کامل، تمامی نیروهای احتمالی مؤثر بر آن را حمل نموده و به شکل مطمئنی به زمین منتقل نماید. با توجه به مطالبی که در خصوص تأثیر عمق و دهانه بر میزان تحمل خمشی و باربری آن گفته شد، مشخص است که اگر دهانه و جنس مصالح عضو سازه‌ای ثابت فرض شود، با تغییر عمق مقطع آن می‌توان میزان باربری آن را افزایش داد و حتی چندین برابر کرد (تصویر ۸).



تصویر ۸: چگونگی به‌وجودآمدن برخی سیستم‌های ساختمانی حاصل از بهبود کارایی تیر فولادی

باید توجه داشت که طراحی سازه تنها به یک عضو سازه‌ای محدود نمی‌شود، بلکه کل نظام سازه‌ای بنا یعنی ترکیب تیر و ستون، دیوار، سقف، کف و پی‌ها را نیز شامل می‌شود و این‌گونه است که سیستم‌های سازه‌ای مانند قاب، خرپا، خرپاهای فضایی، پوسته و غشا به‌وجود می‌آید.

۹. جمع‌بندی

درحالی‌که ساختمان تاریخچه‌ای چند هزار ساله دارد و موضوع پایداری و دوام آن از ابتدا مطرح بوده، آنچه امروز به‌عنوان علم سازه به معنی قابلیت تجزیه و تحلیل نیروها و تضمین استحکام ساختمان نامیده می‌شود، عمری کمتر از سیصد سال دارد. از طرفی، فرم همواره با موضوعات متنوعی از قبیل عملکرد، زیبایی و مسائل اقتصادی و... درگیر بوده و این موضوعات نقش زیادی در شکل‌گیری آن دارند، ولی نیروهای سازه‌ای نیز در تلاش‌اند که فرم را تراش دهند تا ساختار مستحکم و بادوامی شکل گیرد. تأثیر توأمان عملکرد، زیبایی و مسائل اقتصادی همراه با استحکام و بقا را به‌وضوح در پیدایش و شکل‌گیری فرم‌های طبیعی می‌توان ملاحظه کرد. درحقیقت، فرم‌های طبیعی حاصل فرایند تدریجی تکامل و تعامل با نیروهای محیطی‌اند و با بهره‌گیری از حداقل مصالح شکل می‌گیرند. ساختارشان لایه‌ای است و جریان بار در آن‌ها به‌صورت کششی و فشاری است. اما بناهای امروزی، حاصل مصالحی است که نتیجهٔ فناوری و فرایند پیچیدهٔ تولید در کارخانه است و برای ویژگی‌های فیزیکی خاص تولید شده و ظرفیت باربری مشخصی دارند. جریان باربری در آن‌ها دیگر تنها به‌صورت کششی و فشاری صرف نیست و قابلیت تحمل برش و خمشِ قابل ملاحظهٔ این مصالح سبب شده تا بتوان از آن‌ها در ساخت بناهای رفیع و پوش‌های وسیع بهره گرفت. نوع صناعت این مصالح باعث می‌شود که ظرفیت کششی و فشاری به‌صورت توأمان در آن‌ها به‌وجود آید؛ این ویژگی از مهم‌ترین خصوصیات این مصالح و وجه تمایز اصلی آن‌ها با مصالح ارگانیک یا طبیعی است و از طرف دیگر، آن‌ها را از مصالح طبیعی (مانند سنگ و گل و...) که در گذشته مورد استفاده بود، متمایز می‌کند. همین ویژگی است که باعث قابلیت تحمل خمشی در این مصالح می‌شود و به‌واسطهٔ همین قابلیت است که می‌توان برخلاف طبیعت، پوشش‌های افقی با دهانه‌های نسبتاً زیاد و بناهای مرتفع را ایجاد کرد. از طرف دیگر، ملاحظه شد که خمش به عوامل مختلفی وابسته است و پارامتر مهمی چون ممان اینرسی است که عامل اصلی تأثیرگذار در تحمل خمشی عنصر باربر در مقابل نیروی خمشی است. این عامل که همان ویژگی چرخشی سطح است، درحقیقت به عمق مقطع جسم باربر و عرض آن وابسته است و همین ویژگی باعث می‌شود که بتوان آن را ابزار مهم طراحی دانست؛ ابزاری که درحقیقت منجر به شکل‌گیری سیستم‌های ساختمانی مختلف می‌شود.

نتیجه‌گیری

تأمل بر ارتباط سازه با معماری، موضوع مهمی است که به‌کارگیری دانش سازه را در بستر طراحی ممکن می‌سازد؛ اما سازه به معنای انتظام نیروها و کار با آن‌هاست و فرم در واقع، حاصل تعامل نیروهای گوناگون داخلی و خارجی است که موجب شکل‌گیری اندازه‌ها، ضخامت‌ها و شکل عناصر سازه‌ای می‌شود که از مصالح مختلف تشکیل شده و تحت تأثیر دستگاه‌های گوناگون نیرویی قرار گرفته‌اند. در این میان، نیرویی خاص که خمش نام دارد، نقشی اساسی و بسیار مهم دارد؛ گرچه جریان نیروها در طبیعت به‌صورت لایه‌ای است، در مصالح مصنوع و فرم‌های ساختمانی، این خمش است که عامل اصلی شکل‌ساز است. ظرفیت خمشی یک مقطع در واقع، با بارهای وارده، عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی، طول عضو، مشخصات و شکل مقطع و جنسیت مصالح بستگی تام دارد و این به آن معنی است که تغییر در هریک از متغیرهای فوق، ظرفیت تحمل مقطع را تغییر می‌دهد؛ بنابراین، با کنترل هریک از این متغیرها می‌توان ظرفیت باربری عضو سازه‌ای را تغییر داد و این به معنی طراحی سازه‌ای است. از طرف دیگر، همان‌گونه که یک عضو طراحی می‌شود، مجموعهٔ اعضا در ترکیب با یکدیگر نیز قابلیت طراحی دارند؛ مجموعه‌ای که سیستم باربرِ سه‌بعدیِ ساختمان را ایجاد می‌کند. در واقع، این اعضا در ترکیبی پیچیده با یکدیگر، نظام‌ها و سیستم‌های باربَری گوناگون را ایجاد می‌کنند که انواع مختلف ساختمان‌ها را به‌وجود می‌آورند. این امر منجر به

گسترش امکانات طراحی می‌شود و به این ترتیب، سازه به سبب فرمی که دارد بر فرم معماری تأثیر می‌گذارد؛ فرمی که حاصل عوامل مختلف است و اینجاست که معماری تحت تأثیر سازه، نه تنها ایمن می‌شود بلکه فرم می‌گیرد.

پی‌نوشت‌ها

۱. Forces

2. Form

3. Structure

4. Archimedes

5. Euclid

6. Leonardo da vinci

7. Robert hooke

8. Isaac newton

9. Thomas young

10. Simon denis poisson

۱۱. رابرت هوک از فلاسفهٔ علوم طبیعی، معمار و دانشمند انگلیسی و مبدع قانون کشسانی یا قانون هوک بود (F=-KΔL). ایزاک نیوتن فیلسوف، ستاره‌شناس، فیزیکدان و ریاضیدان انگلیسی که مفهوم گرانش عمومی را مطرح ساخت و با تشریح قوانین حرکت اجسام، علم مکانیک کلاسیک را بنیان نهاد. قانون دوم نیوتن یعنی تناسب نیرو با شتاب جسم مشهور است (F=MA). توماس یانگ یکی از بزرگ‌ترین فیزیک‌دانان قرن هجده و نوزده انگلیس بود که موجی بودن نور را ثابت کرد. از کارهای دیگر او مطالعه بر نیروی کشش سطح مایعات و نیز نیروی کشش در جامدات است و به دلیل کارهای علمی او در این مورد ضریب کشسانی موسوم به مدول یانگ را به نام او انتخاب کردند (E=σ/ϵ). سیمون دنی پواسان ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی که بر روی ریاضیات محض و فیزیک الکتریسیته و مغناطیس فعالیت می‌کرد. فرایند پواسان و نسبت آن از جمله کارهای وی است (V=-ϵTRANS/ϵAXIAL).

۱۲. مطالب مربوط به آموزش سازه در معماری را برای مثال می‌توان در این منابع جست‌وجو کرد: ندیمی ۱۳۹۱؛ وزیری ۱۳۷۰ Shannon and Radford 2011; Wetzel 2012; Whitehead 2013; M. Herr 2013; Holgate 1986.

۱۳. مطالب مربوط به یکپارچگی سازه و معماری را برای مثال می‌توان در این منابع جست‌وجو کرد: تقی‌زاده آذری ۱۳۸۵؛ زرکش ۱۳۸۱؛ سالوادوری 1986؛ 2009 Eaae. Meiss 1990.

۱۴. مطالب مربوط به مشارکت مهندس معمار و مهندس سازه را برای مثال می‌توان در این منابع جست‌وجو کرد: Charleston and Pirie 2009 Bernabeu Larena 2003;.

۱۵. مطالب مربوط به درک رفتار سازه را برای مثال می‌توان در این منابع جست‌وجو کرد: فرشاد ۱۳۵۳ و ۱۳۶۲؛ سالوادوری ۱۹۸۶؛ Lin and Huang 2016 Pedersen and Taljsten 2007; Allen 2010 & 2005; Guerrin 1969; Macdonald 1998; Popov 1968; Vorwort and Einem 1990.

۱۶. مطالب مربوط به تاریخچهٔ ساختمان را برای مثال می‌توان در این منابع جست‌وجو کرد: فرشاد ۲۵۳۶؛ معماریان ۱۳۶۷؛ Adiss 2008; Timoshenko 1953.

17. Optimal form

18. Form and forces

19. Graphical techniques

20. Finding form

21. Self-forming

22. Self-optimization

23. Experiment
24. Vitruvius
25. Industrial revolution
26. Equilbrium
27. Static

۲۸. تعادل بر سه گونه تعادل پایدار، ناپایدار و خنثی دسته‌بندی می‌شود.

29. Strenght
30. Stability
31. Function
32. Compression
33. Tension
34. Stress
35. Shear
36. Bending
37. Torsion
38. Diformation
39. Strain
40. Elasticity
41. Plasticity
42. Homogeneity
43. Isotropic
44. Isostatic lines

۴۵. ویژگی مهم دیگر این مواد، امکان تولید در احجام زیاد و توانایی تولید در شکل‌های مختلف است.

۴۶. مقاومت بالای فولاد حاصل آرایش بلوری خاص این ماده است. آهن پس از استخراج از سنگ معدن، طی فرایندی خاص، ضمن ترکیب شدن با برخی فلزات و مقداری کربن، عمل‌آوری شده و تبدیل به فولاد می‌شود. شکل مقاطع تولیدشدهٔ آن، به‌دلیل جریان نورد کارخانه‌ای بسیار متنوع است و برای انواع بارهای وارده به ساختمان، بهینه شده و در طول‌های زیاد تولید می‌گردد.

47. Neutral axis

۴۸. بحث ما در این مقاله شامل حالتی است که طول جسم چندین برابر عرض آن است و همچنین مصالح الاستیک هستند و در محدودهٔ خطی منحنی مقاومتی مورد بحث قرار می‌گیرند.

49. I=ΣYd2Ad

50. Torque

۵۱. صحبت از همهٔ تنش‌های موجود در حجم یک جسم باربر و همچنین برش، خارج از بحث مقاله است و برای مطالعهٔ آن باید به کتاب‌های مکانیک مصالح رجوع کرد.

۵۲. این خاصیت مانند لغزش صفحات کاغذ روی یکدیگر است. اگر این صفحات توسط چسب به هم محکم شوند، یک مقوا به‌وجود می‌آید که مقاومتی به‌مراتب بیشتر از لایه‌های جدا از هم کاغذ دارد.

53. σmax=MC/Ix-x

54. Building forms

منابع

ـ تقی‌زاده آذری، کتایون.۱۳۸۷. طراحی عملکردی در مهندسی سازه و تأثیر آن بر طراحی. *هنرهای زیبا* (۳۴).

ـ دهخدا، علی‌اکبر. ۱۳۷۷. *لغت‌نامه*. مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

ـ چینگ، فرانسیس دی کی. ۱۹۹۵. *سازه در معماری*. ترجمهٔ محمدرضا افضلی. تهران: یزدا.

ـ رید، هربرت. ۱۳۷۴. *معنی هنر*. ترجمهٔ نجف دریابندری. تهران: انتشارات علمی و فرهنگی.

ـ زرکش، افسانه. ۱۳۸۱. *همسازی فضا و سازه در معماری*. پایان‌نامهٔ دکتری تخصصی، دانشگاه تهران.

ـ سالوادوری، ماریو. ۱۹۸۶. *سازه در معماری*. ترجمهٔ محمود گلابچی. ۱۳۷۹. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

ـ ظفرمند، سید جواد. ۱۳۸۶. چیستی فرم در هنر. مجله *رشد آموزش هنر* (۶): ۳ـ۱۸.

ـ عمید، حسن. ۱۳۸۱. *فرهنگ فارسی عمید*. تهران: امیرکبیر.

ـ فرشاد، مهدی. ۱۳۵۳. *فرم‌های ساختمانی*. انتشارات دانشگاه شیراز.

ـ ــــــــــ . ۱۳۶۲. *اصول ساختمان*. انتشارات افست مروی.

ـ ــــــــــ . ۲۵۳۶. تاریخ مهندسی در ایران. انتشارات دانشگاه شیراز.

ـ گیدئون، زیگفرید. ۱۹۴۸. *فضا، زمان و معماری، رشد یک سنت جدید*. ترجمهٔ منوچهر مزینی. جلد اول. چاپ دوم: بنگاه ترجمه و نشر کتاب.

ـ مشایخ فریدنی، سعید. ۱۳۷۷. پروژهٔ تحقیقاتی هنر مهندسی ـ پیشنهاد یک مدل آموزشی، و هنر مهندسی ـ درس‌هایی که باید از طبیعت آموخت. *صفه* (۲۷): ۵ـ۳۴.

ـ ــــــــــ . ۱۳۹۲. پژوهش در هنر مهندسی و الهام از طبیعت. *مسکن و محیط روستا* (۱۴۳): ۳ـ۱۴.

ـ معماریان، غلامحسین. ۱۳۶۷. *نیارش سازه‌های طاقی*. جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت.

ـ معین، محمد. ۱۳۶۴. *فرهنگ فارسی* ۶ جلدی. امیرکبیر.

ـ ندیمی، حمید. ۱۳۹۱. آموزش علوم مهندسی یا طراحی مهندسی: تأملی در مورد آموزش مهندسی در ایران. فصلنامه *آموزش مهندسی ایران* (۵۶): ۱ـ۱۶.

ـ هوشیار، لیلا، و حسن باروق. ۲۰۱۳. بررسی مفهوم فرم در معماری و شهرسازی معاصر. *کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و توسعهٔ شهری پایدار*. تبریز.

ـ وزیری، پرویز. ۱۳۷۰. آموزش سازه. *صفه* (۲): ۴۲ـ۵۱.

- Addis, Bill. 2008. *Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction*. Phaidon Press.

- Allen, Edward. 2005. *How Buildings Work? The Natural Order of Architecture*. Oxford University Press.

- ————, Wacław Zalewski, and Boston Structures Group. 2010. *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*. Wiley Inc.

- Anaor, A.. 1998. *Principles of Structures*. Blackwell Science. Oxford.

- Benjamin, b. s.. 1990. *Structural Evolution: an Illustrated History*. A. B. Literart House.

- Bernabeu Larena. Alejandro. 2003. *Origin Of The Collaboration Between Engineers And Architects In Great Britain In The Thirties*.

- Charleson, A.W., and S. Pirie. APRIL 2009. An Investigation Of Structural Engineer-Architect Collaboration. *Sesoc Journal. Newzealand*, N0. 1 (Vol 22).

- EAAE. 2009. *Architectural Design and Construction Education-Experimentation towards Integration*.

- Fahmi, M.M., Abdul Aziz, A., M. Ahmend, and S. Elhami, JUNE 2012, The Integration Of Structural Knowledge in Studio Design Projects: An Assessment Curriculum In: Architecture Course in Sust, *Journal of Science and Technology*, Vol. 13.

- Gartshore, Philip J., and Ian A. Mayfield, 1990, *The Teaching of Science and Technology in UK Schools of Architecture*, Design Information Research Unit, School of Architecture, Portsmouth Polytechnic.
- Guerrin A.. 1969. *Traite de Beton Arme*. Dunod. Paris.
- Holgate, Alan. 1986. *The Art In Structural Design*. Oxford University Press.
- Lin, Shaopei, and Zhen Huang, 2016, *Comprative Design of Structures- Concepts and Methodologies*, Springer and Shanghai Jiao Tong University Press.
- Macdonald, Angus J.. 1998. *Structural Design For Architecture*. Architectural Press.
- M. Herr, Christian. 2013. Qualitative Structural Design Education in Large Cohorts of Undergraduate Architecture Students. *Global Journal of Engineering Education* NO. 2 (Vol. 15).
- Meiss, Pierre Von. 1990. Elements of Architecture. Taylor and Francis.
- Moore, Fuller. 1999. *Understanding Structures*. WCB/McGraw Fill.
- Otto, Frei, and Bodo Rasch. 2001. *Finding Form*. Edition Axel Menges.
- Pedersen, Louise, and Jonas Taljsten. 2007. *Structure And Architecture*. Master's Dissertation. Division Of Structural Mechanics. LTH. Lund University. Lund. Sweden.
- Popov, Egor P.. 1968. *Introduction to Mechanics of Solids*. Prentice-Hall. Inc.. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Salvadori, Mario. 1980. *Why Buildings Stand Up: The Strength of Architecture*. W. W. Norton & Company. Inc.
- Shannon, Susan, and Antony Radford. 2011. *Iteration as A Strategy For Teaching Architectural Technologies In An Architecture Studio*. Architectural Science Review.
- *The Oxford English Dictionary*. 1989. Second Edition. Oxford University.
- Timoshenko, Stephen P.. 1953. *History of Strength of Materials*. MACGraw-Hill Book Company. Inc.
- Vorwort Von, and Mit Einem. 1990. *Experiments: Form, Force, Mass, Institute for lightweight structures*.
- Wetzel, Catherine. 2012. Integrating Structures and Design in the First-Year Studio. *Journal of Architectural Education*.
- Whitehead, Robert. 2013. Supporting Students Structurally: Engaging Architectural Students in Structurally Oriented Haptic Learning Exercises. *Architectural Engineer Journal*: 236-245.
- Zuk, William. 1963. *Concepts of Structures*. New York. Reinhold Publishing Corporation.