

آموزه‌هایی از سازه‌های طبیعی، درس‌هایی برای معماران

مهندس کتابون تقی زاده*

دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۲/۲۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۸۵/۹/۴)

چکیده:

از ابتدای تمدن بشری، دنیای پر جاذبه طبیعی منبعی بسیار غنی برای نوآوری و الهام بخشی بزرگ‌ترین نقاشان، مجسمه‌سازان، موسیقی‌دانان، فیلسوفان، شاعران، طراحان و مهندسان بوده است. دنیای طبیعی پیرامون ما در حال حاضر به سطح بالایی از توسعه در طول میلیون‌ها سال تکامل تدریجی خود رسیده است و دنیای امروز از دوران تغییرات طولانی عبور کرده تا به سطحی از زیبایی که ما امروزه آن را می‌بینیم و درک می‌کنیم، دست یابد. فرآیند خلق فرم‌های طبیعی که ما آنها را ذاتاً زیبا می‌نامیم، سیر تحول طولانی داشته است که در طول میلیون‌ها سال اتفاق افتاده است. فرم‌های طبیعی در طول قرون متمادی برای رسیدن به راه‌حل‌های قابل قبول در برابر عوامل خارجی (اقلیم، دسترسی به غذا، سرپناه و ...) توسعه یافته‌اند. تجزیه عوامل و محدودیت‌های عملکردی و سازه‌ای، بسیاری از عوامل فوق‌الذکر را خلاصه می‌سازد. نتیجه استفاده از فرم‌های طبیعی در طراحی معماری، دستیابی به طرحی عالی است که کارایی سازه‌ای، نیازهای عملکردی و زیبایی‌شناسی در آن با یکدیگر ترکیب شده‌اند. درس‌هایی که از طبیعت آموخته می‌شوند و به طور مناسب به کار می‌روند نه فقط "تقلید محض" از آن، در این مقاله ابتدا سازه‌های موجود در طبیعت معرفی می‌شوند و با بررسی نمونه‌های مختلف مانند درختان، پوسته تخم پرندگان، صدف‌های دریایی و ... مشابهت‌ها و تفاوت‌های دست ساخته‌های انسان با نمونه‌های طبیعی تحلیل می‌گردد. در ادامه استفاده طراحان از انواع فرم‌های طبیعی توضیح داده شده و در پایان نمونه طرح‌های موفق با استفاده از فرم‌های طبیعی تجزیه و تحلیل می‌گردند.

واژه‌های کلیدی:

سازه طبیعی، فرم‌های طبیعی، فرم پوسته‌ای، سازه ورق‌تاشده، فرم درختی، کارایی سازه‌ای.

مقدمه

"هیچ گاه از هیچ چیز تقلید مکن، مگر فرم های طبیعی"

(Ruskin, 1906, p. 247)

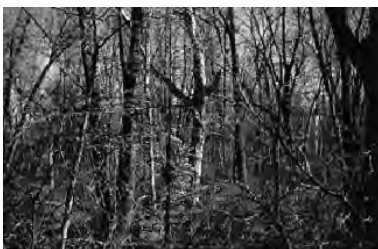
یابد. در این فرآیند، فقط کاراترین، قوی ترین و قابل انعطاف ترین فرم های طبیعی در طول میلیون ها سال باقی مانده اند. در تکوین دنیای امروزی، میراثی چند میلیون ساله از پیشرفت هایی که در طول سالیان دراز حاصل شده است، وجود دارد. ارسطو، فیلسوف دوران باستان، از نخستین افرادی بود که در مورد طبیعت به عنوان منبع عظیم الهام بخشی نوشت. او بیان کرد که زیبایی عملکردی حتی در مخلوقات بسیار کوچک نیز وجود دارد. در اکثر موارد ما از طبیعت از طریق احساس زیبایی طبیعی با استنشاق بوی خوش، رنگ، شکل، فرم و صدا الهام می گیریم. غالب اوقات بدون جستجو برای معنای عمیق تر و بدون سوال از فرم های طبیعی، به طور حسی از ذات طبیعی خود پیروی می نماییم و اصوات، رنگ ها و فرم هایی را که ما را احاطه کرده اند، تقلید می کنیم. بدون شک تعدادی از بهترین قطعات موسیقی کلاسیک و بهترین آثار نقاشی از این طریق خلق شده اند.

از ابتدای تمدن بشری، دنیای پرجاذبه طبیعی منبعی بسیار غنی برای نوآوری و الهام بخشی بزرگ ترین نقاشان، مجسمه سازان، موسیقی دانان، فیلسوفان، شاعران، طراحان و مهندسان بوده است. صدای حرکت آب در رودخانه، رنگ های خیره کننده رنگین کمان، ریتم منظم برخورد امواج دریا با صخره های اطراف آن، فریبندگی بوی خوش گل های سرخ، ساختار هوشمند کندوی عسل، غنای رنگ در فصل پاییز، آسمان زیبا به هنگام طوفان و شکسته شدن نور خورشید در یک روز برفی زمستانی تنها تعداد اندکی از عجایب طبیعی اند که باعث الهام بخشی و نوآوری در آثار دست ساخت انسان شده اند. تعجب برانگیز نخواهد بود اگر بگوییم که دنیای طبیعی پیرامون ما در حال حاضر به سطح بالایی از توسعه در طول میلیون ها سال تکامل تدریجی خود رسیده است و دنیای امروز از دوران تغییرات طولانی عبور کرده است تا به سطحی از زیبایی که ما امروزه آن را می بینیم و درک می کنیم، دست

سازه های طبیعی

زمین فرو نرفته باشد، با وزش بادهایی قوی از بین می روند. بیش از صدها هزار سال انسان اولیه به تدریج از یک مصرف کننده بدون تفکر آن چه که طبیعت در اختیار وی قرار می داد، به یک موجود فنی و تکنیکی تبدیل شد که می توانست برای مشکلات و مسائل خود راه حل هایی را بیابد. در این مرحله گذار و تحول انسان اولیه، انسان از طبیعت تقلید می کرد و پس از آن به قبول و پذیرش نمونه هایی از دنیای طبیعی پرداخت. این آموزه ها امروزه هم بیان

این امر تقریباً قطعی است که سازه های ابتدایی که توسط انسان های ماقبل تاریخ مورد استفاده قرار می گرفتند، فرم های طبیعی بودند. پیش از آن که انسان بتواند دنیای اطراف خود را مطابق با خواسته ها و نیازهای خویش تغییر دهد، برای رفع احتیاجاتش از غارها به عنوان سرپناهی برای محافظت در برابر عوامل طبیعی، از درختان برای محافظت در برابر حیوانات درنده و یا محلی برای مخفی شدن به هنگام شکار و همچنین از درختان سقوط کرده برای عبور از رودخانه ها و سیلاب ها استفاده می کرد. شاید اجداد ما بدون درک واقعی فرم های طبیعی، از یکی از بهترین معلمان یعنی طبیعت، استفاده از فرم های سازه ای موجود در آن را می آموختند. طبیعت برای اطمینان از این که سازه ها به خوبی پاسخگوی اهداف عملکردی شان می باشند یا خیر، روش مخصوص به خود را دارد، هر چیزی که به اندازه کافی قوی نیست محکوم به نابودی است. به عنوان مثال فرسایش در غارها به تدریج ابعاد دهانه غار را افزایش داد که صخره روی آن می بایست این دهانه را ببوشاند، نتیجه اینکه در اثر تنش زیاد، سقف غار فرو می ریخت، یا در مورد درختانی که ریشه های آنان به اندازه کافی در



تصویر شماره ۲ - درختان باریک و بلند



تصویر شماره ۱ - قله کوه

موثرترین شکل خود بکار برده شده‌اند. دلیل این امر این است که طبیعت چیزی را هدر نمی‌دهد.

امروزه درس‌های زیادی برای آموختن در طبیعت وجود ندارد، آموزه‌های طبیعی به سوی مراحل عمیق‌تر و دقیق‌تر پیش می‌روند. با کوشش در درک قوانین طبیعت و دیدن، احساس کردن، شنیدن و یا استشمام فرم‌های طبیعی شاید بتوان به زیبایی عملکردی طبیعی دست یافت (به طور مثال زیبایی از طریق حداکثر کارایی در مصالح و فرم حاصل می‌شود). برای توسعه و پرورش فرم‌های سازه‌ای که در طبیعت وجود دارند، قوانین اساسی وجود دارد که می‌توان آنها را در اغلب سازه‌های نوین به کار برد. بسیاری از بهترین مهندسان و معماران با استفاده از این قوانین طرح‌های زیبا خلق کرده‌اند.

هنگام در نظر گرفتن یک فرم طبیعی، معماران سعی در درک تناسبات، فرم‌های منحنی، شکل و حجم آن دارند، در حالی که مهندسان قوانین مقاومت مصالح، ایستایی و حرکت در آن را تحلیل می‌کنند و قوانین موجود در آن را برای ایجاد فرم‌های جدید مورد بررسی قرار می‌دهند. شاید با توضیحات فوق بتوان کلمه "طبیعت" را از نمودار شماره ۱ حذف کرد و به جای آن از کلمه "طراحی" استفاده کرد.

شاید آن‌چه مخلوقات طبیعی را بسیار خاص می‌سازد این باشد که کارایی سازه‌ای و زیبایی فرم در آنها همزمان اتفاق می‌افتد. در تمامی سازه‌ها بدون استثنا منطقی روشن وجود دارد که به نوعی در مسیری جادویی، فرم‌های زیبا ایجاد می‌کنند که همگان مشتاق به دیدن و تحسین آنها هستند. تشابه، تناسب و تفاوت‌هایی را می‌توان بین فرم‌های موجود در طبیعت و فرم‌های دست ساخته انسان پیدا کرد.

از نظر فلسفی، طبیعت ارتباطی است بین استدلال سازه‌ای، کارایی، بهترین استفاده از مصالح با توجه به خصوصیات آنها، تناسبات عملکردی و زیبایی‌شناسانه، رنگ، شکل و حجم در سطحی که دست ساخته‌های انسان تاکنون به آن حد نرسیده‌اند. ولی از نظر عملی، بسیاری از "مفاهیم موجود در طبیعت" به زیبایی و فرم‌های ساخته شده کارا ترجمه شده‌اند. با درک قوانین موجود در طبیعت و کاربرد آنها، انسان توانسته است سازه‌هایی با کارایی بالا و شکل و تناسباتی ایجاد نماید که می‌توان آنها را "زیبا" نامید. هنگامی که زیبایی و کارایی در یک فرم سازه‌ای با پیروی از قوانین موجود در طبیعت ترکیب می‌شوند، می‌توان ادعا کرد که این نوع از سازه‌ها کاملاً به نمونه‌های طبیعی نزدیک شده‌اند.

نمونه‌های طبیعی

• درختان

آن‌چه که در مورد فرم، زیبایی و ساختار درختان وجود دارد، بسیار منطقی و طبیعی است. با نگاهی دقیق به ساختار یک درخت درمی‌یابیم که تنه درخت در پایین پهن تر بوده و شاخه‌های آن هر قدر به سمت بالا می‌روند، نازک‌تر می‌شوند. درختان نکات زیادی

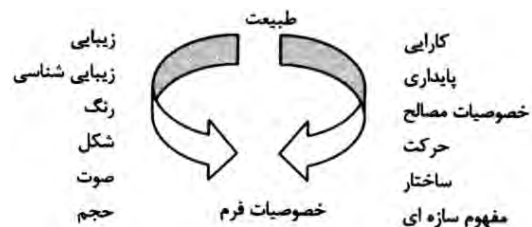
می‌شوند و مورد استفاده قرار می‌گیرند و طیف وسیعی از دانش مربوط به کارایی سازه‌ای و تمرینات عملی به شکل فرم‌های زیبا و طبیعی را شامل می‌گردند.

سلول هر موجود زنده ساختاری دارد و باید فرم سازه‌ای مشخصی داشته باشد. در استفاده از فرم‌های مناسب برای عملکردهای مشخص، طبیعت نیز مانند طراحان ساختمان با مجموعه‌ای از مسائل و مشکلات روبروست. یک فرم قوی‌تر و پایدار تر ممکن است مقاومت بیشتری را برای موجود زنده فراهم کند ولی در عین حال نیاز به مواد خام بیشتری داشته باشد (که ادامه این کار به دور باطل می‌انجامد. جایی که وزن بیشتر نیاز به سازه‌ای مقاوم‌تر برای آن که آن را حفظ کند، دارد و برای پاسخگویی به این نیاز، به وزن بیشتر احتیاج است).

یک اشتباه جزیی در طرح‌های طبیعی، نتیجه‌ای بی‌رحمانه در پی خواهد داشت. حیوان شکارچی که وزن زیادی دارد و نمی‌تواند به اندازه کافی سریع حرکت کند تا شکار خود را به چنگ آورد، مدت زیادی زنده نخواهد ماند. همچنین شکاری که وزن مناسب نداشته باشد، نمی‌تواند از دست شکارچی در امان باشد. در طبیعت فرم‌های سازه‌ای کارا الویت بیشتری دارند، زیرا طبیعت می‌تواند بارهای وارده در یک ساختار را به روش حسی انتقال دهد و دیگر اینکه طبیعت با کارایی موثر یک موجود زنده هیچ گونه سازشی ندارد. این امر یکی از کلیدهای موفقیتی است که طراحان ساختمان سعی در به دست آوردن آن دارند. آیا هدف از طراحی بهینه چیزی جز رسیدن به بهترین دستاورد با صرف کمترین سرمایه‌گذاری است؟

طبیعت ترکیب زیبایی و فرم سازه‌ای

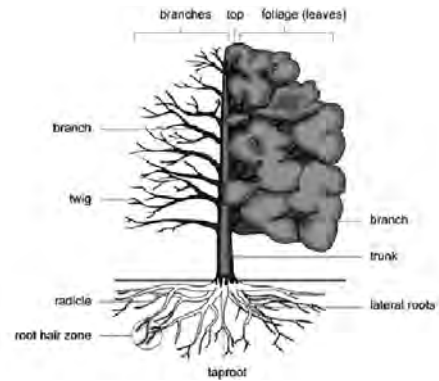
هنگامی که به یک گل نگاه می‌کنیم، تحت تاثیر بوی خوش و فرم زیبای آن قرار می‌گیریم. ولی اگر با دقت بیشتری به آن نگاه کنیم و در مورد فرم آن تفکر نماییم، شاید بیشتر تحت تاثیر این موضوع قرار گیریم که چگونه یک گل هنگام وزش نسیم نوسان می‌کند، ولی نمی‌شکند و دوباره به حالت اول خود باز می‌گردد. این موضوع در گیاهانی که دارای مفصل هستند، بیشتر به چشم می‌خورد. به دلیل وجود مفصل، این گیاهان هنگام وزش باد، انعطاف پذیر می‌باشند. موضوع جالب توجه این است که با اینکه مصالح سخت کننده در مفاصل به میزان حداقل می‌باشند، در عین حال در کاراترین و



نمودار شماره ۱

• قوس‌های طبیعی سنگی

در بسیاری از نقاط در سراسر جهان، طبیعت به ما می‌آموزد که چگونه یک قوس می‌تواند بارهای وارده در طول یک دهانه را تحمل نماید. پونت د آرک^۲ در فرانسه، پل رین باو^۴ در آریزونا و قوس لنداسکیپ^۵ در یوتا آمریکا از بزرگ‌ترین و مشهورترین نمونه‌ها هستند، هر چند که نمونه‌های کوچک‌تر طبیعی را نیز می‌توان در جایی که صخره‌های سنگی به وسیلهٔ آب دچار فرسایش شده‌اند، مشاهده کرد.



تصویر شماره ۳- سلسله مراتب در ساختار یک درخت



تصویر ۷- قوس طبیعی لنداسکیپ در آریزونا



تصویر ۸- ساختمان پرای سیدنی، نمونه‌ای از کاربرد فرم قوسی در معماری معاصر



تصویر شماره ۴- پل طره ای Forth در اسکاتلند

رمز بقای چنین سیستمی شکل آن است. صخره‌ها در برابر فشار مقاوم هستند ولی در برابر کشش ضعیف می‌باشند. به همین دلیل قوس بهترین فرم برای انتقال بارهای وارده در طول یک دهانه است که تحت فشار خالص است. باعث تعجب نیست که در طبیعت صخره‌های صاف و یا به شکل قوس معکوس پیدا نمی‌کنیم، زیرا در این صورت چنین فرمی دچار تنش‌های کششی ناپایدار شده و سیستم دچار خرابی شده و فرو می‌ریزد.

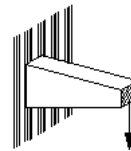
• پوسته تخم‌پرنده گان

پوسته تخم‌پرنده گان نمونه زیبایی از قانون استفاده از حداقل مصالح با حداکثر کارایی است. در پوسته تخم‌پرنده گان عملکرد اصلی حفاظت از جوجه درون آن است که به این نیاز با استفاده از حداقل مصالح به خوبی پاسخ داده شده است. با استفاده از مصالح بیشتر، هم به بدن مادر صدمه وارد می‌شود و هم وزن پوسته زیاد شده و مانع از شکسته شدن آن توسط جوجه می‌شود. پوسته تخم‌پرنده گان را می‌توان به عنوان فرم قوسی سه بعدی در نظر گرفت که در آن نیروها به شکل فشاری منتقل می‌شوند. چنین فرم قوسی شکل سه بعدی عامل اساسی طراحی ساختمان‌ها با استفاده از گنبد و فرم‌های پوسته‌ای^۶ بوده است.

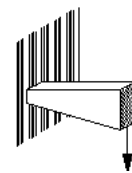


تصویر شماره ۹- پوسته تخم‌پرنده گان با مقاومت و سختی مناسب

را در مورد طراحی و ساخت سازه‌های کارا به ما آموزش می‌دهند. در حقیقت درخت یک طره عمودی بسیار بزرگ است که در یک انتها توسط ریشه‌های آن نگاه داشته می‌شود. همچنین شاخه‌ها نیز هریک طره‌ای کوچک تراند که به تنه درخت و یا شاخه‌های بزرگ‌تر متصل شده‌اند. در یک طره مقدار تنش در تکیه‌گاه بیشتر است و به سمت انتهای طره کاهش می‌یابد. با چنین استدلالی، مصالح در طره‌ها باید در تکیه‌گاه متمرکز شوند و به سمت انتهای آن کاهش یابند. این چیزی است که به طور واقعی می‌توان در شکل طبیعی درخت مشاهده کرد. طراحان چنین قانونی را از زمان‌های بسیار دور در طرح‌های خود استفاده کرده‌اند، مانند ماریو سالوادوری که در کتاب بارزخ خود در مورد مهندسی سازه به این امر اشاره کرده است (Salvadori, 1990). لازم نیست به مهندس معمار و سازه آموزش داد تا محاسبه نماید که تیر طره‌ای نشان داده شده در تصویر شماره ۵ کارایی ندارد، زیرا چنین فرمی اساساً از نظر زیبایی‌شناسی "ناصحیح" و "ناخوشایند" است و دارای آرایش "غیرمنطقی" است. دلیل اینکه ما می‌دانیم طراحی تصویر شماره ۵ صحیح نیست، چیست؟ آیا به این دلیل نیست که شکل صحیح آن را در درختان مشاهده می‌کنیم؟



تصویر ۶- شکل صحیح سازه طره‌ای



تصویر ۵- شکل غلط سازه طره‌ای

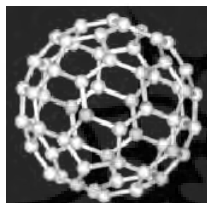
منطق موجود در ساختار درخت منبع اصلی نوآوری و ابداع در بسیاری از فرم‌های سازه‌ای بوده است که تعدادی از آنها در ادامه معرفی می‌شوند. مانند سقف زیبای فرودگاه اشتوتگارت^۱ در آلمان و فرودگاه استنستد^۲ در انگلستان که به شکل ستون‌های درختی است.

مانند کلمه "مطلوب و خوشایند" نه بعید است و نه متافیزیکی. انسان همواره در پی دستیابی به حداکثر دوام از طریق حداقل هزینه بوده است و پس از رسیدن به چنین چیزی است که احساس زیبایی شناسی را می‌توان تجربه کرد. به طور قطع همیشه این چنین نبوده است: طی قرون متمادی "زیبایی" با آرایش، تجمل، اجزا غیرضروری و اضافی و تزیینات محض مترادف بوده است. زیبایی واقعی را که درون هر دوره به طور خاص می‌توان آن را جستجو نمود، شاید بتوان آن را در شکل سنگ‌ها، فرم بدنه کشتی‌ها و یا بال یک هواپیما یافت. [Levi, 1986]

آیا پریمو لوی زیبایی باورنکردنی طرح باک مینستر فولر^۱ که سازه‌ای شگفت‌انگیز، پایدار و قوی به شکل مولکول‌های کربن بود، را دید. فرمی که برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ در نانوتکنولوژی به کار برده شد و استفاده از مصالح جدید و مقاوم‌تری را در آینده نوید می‌داد.^{۱۱}



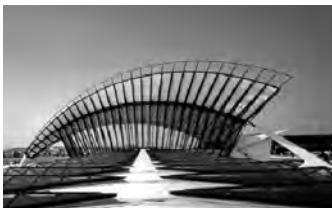
تصویر شماره ۱۴ - نمونه گنبد ژئودزیک در معماری معاصر، غرفه دبیرانی در آمریکا



تصویر شماره ۱۳ - مدل ساختار شیمیایی طرح باکمینستر فولر

• استخوان بدن حیوانات

استخوان‌ها اجزای قاب اسکلتی بدن حیوانات می‌باشند که وزن بدن آنان را حمل می‌کنند و بنابراین می‌توان آنها را با سازه‌های متشکل از تیر و ستون که در ساختمان‌های بزرگ امروزی به کار می‌روند، مقایسه کرد. اجزایی از این قاب اسکلتی که کارایی سازه‌ای ندارند و فقط باعث افزایش وزن اسکلت می‌شوند، به تدریج حذف خواهند شد. معمار و مهندس اسپانیایی، سانتیاگو کالاتراوا^{۱۲} در بسیاری از طرح‌های خود از طبیعت الهام گرفته و سازه‌هایی به شکل اسکلت بدن حیوانات طراحی نموده است. به عنوان نمونه می‌توان به ساختمان ورودی ترمینال فرودگاه لیون در کشور فرانسه و پل لوسیتانیا^{۱۳} در شهر مریدا در اسپانیا اشاره کرد.



تصویر شماره ۱۶ - نمونه‌ای از فرم‌های بدیع در معماری و سازه با استفاده از شکل اسکلت حیوانات، ساختمان ورودی ترمینال فرودگاه لیون کشور فرانسه



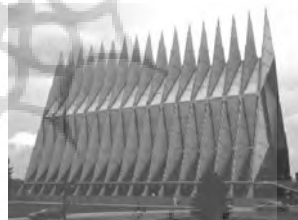
تصویر شماره ۱۵ - اسکلت بدن یک پرند



تصویر شماره ۱۰ - سازه پوسته‌ای مرکز کنفرانس CNIT در پاریس

• صدف‌های دریایی

در بسیاری از موارد به دلیل فرم بدن موجود زنده نیاز به مقاومت خمشی می‌باشد و استفاده از فرم‌های قوسی میسر نیست. مسئله‌ای که در این رابطه پیش می‌آید، استفاده از مصالح حداقل با حداکثر کارایی است. یک صفحه کاغذ صاف را برداشته و آن را خم می‌کنیم، به وضوح می‌توان مشاهده کرد که این صفحه کاغذ در برابر خمش هیچ گونه مقاومتی ندارد. ولی اگر در همین صفحه تاخوردگی‌های متعدد ایجاد نماییم، متوجه خواهیم شد که کاغذ در برابر نیروهای خمشی مقاومت قابل توجهی دارد.^۸ این امر در طبیعت نیز بدون پاسخ باقی نمانده و طبیعت باز هم ما را مغلوب خود نموده است. در صدف‌های دریایی چین خوردگی‌هایی وجود دارد که با حداقل مصالح مقاومت خمشی مناسبی را تامین می‌نماید.



تصویر شماره ۱۲ - ساختمان کلیسای Cadet در آمریکا با استفاده از ورق‌های تاشده



تصویر شماره ۱۱ - صدف دریایی

• ترکیبات شیمیایی

بعضی از نمونه‌های سازه‌های طبیعی تأثیری مستقیم بر انسان‌های اولیه نداشته‌اند، مانند آرایش مولکولی در ترکیبات شیمیایی که جستجوی طبیعت برای دستیابی به سادگی، مقاومت و زیبایی را در سطح میکروسکوپی نشان می‌دهد. پریمو لوی^۹ شیمیدان معروف ایتالیایی که بعدها نویسنده‌ای موفق نیز شد، یک ایده ساده ولی الهام بخش از زیبایی شناسی حاصل از "صحت و درستی" در فرم‌های سازه‌ای مولکول‌های کربن را این‌گونه توضیح داده است:

[در حقیقت آن چه در شیمی اتفاق می‌افتد مشابه چیزی است که در معماری مشاهده می‌شود. در معماری ساختمان‌های بزرگ و "زیبا" که ساده و متقارن هستند، محکم و نیرومند نیز می‌باشند. به طور خلاصه، همان چیزی که در مولکول‌ها اتفاق می‌افتد، همان چیزی است که در گنبد کلیسای جامع و یا قوس یک پل می‌بینیم. همچنین می‌توان این‌گونه توضیح داد که به کار بردن کلمه "زیبایی"

سازه‌های دارای اسکلت

اگر قصد تحقیق در مورد نوع باربری در اسکلت موجودات زنده را داشته باشیم، متوجه خواهیم شد که در تعداد بسیاری از فرم‌های پیشرفته موجودات زنده، سازه اصلی شامل یک پوسته بیرونی است که بدن موجودات را از محیط خارجی محافظت می‌کند و اجزا داخلی را نگاه می‌دارد و یک سازه مستحکم داخلی مجزا که درون بدن موجودات مخفی است. چنین آرایشی باعث ایجاد مقاومت و قابلیت انعطاف می‌گردد. پوسته خارجی در طول زمان می‌تواند ترمیم و تجدید شود و اگر یک بخش از آن دچار خرابی گردد، باعث خسارت سازه‌ای نشده و قابل ترمیم است. ولی خرابی در اسکلت درونی بسیار جدی است و می‌تواند باعث فروریختن سازه شود. یک ساختار متشکل از پوسته خارجی و اسکلت درونی با مقاومت بالا و انعطاف پذیری مناسب، نوع پیشرفته سازه‌های طبیعی است که در طول سال‌های متمادی سیر تکاملی خود را طی کرده است.

به عبارت دیگر، در دیگر فرم‌های طبیعی انعطاف‌پذیری معمولاً عاملی حیاتی نیست، بنابراین، دیگر مشخصات از الویت بیشتری برخوردارند. در بعضی موارد که مقدار مصالح مصرفی محدود می‌باشد، یا در جایی که اندازه‌های مشخص طرح تاثیر زیادی بر وزن سازه‌ای دارد، طبیعت نمی‌تواند مقاومت و انعطاف پذیری لازم را تنها با استفاده از یک پوسته خارجی تامین نماید. به عنوان مثال در پوسته تخم پرندگان نیازی به داشتن قابلیت انعطاف در هنگام حرکت نیست و فقط نیاز به محافظت جوجه درون آن با حداقل مصالح است و یا در مورد درختان که در آن اندازه درخت، نوع ترکیب سازه و پوسته را تعیین می‌کند.

چنین قیاسی را می‌توان در مورد سازه ساختمان‌ها نیز به کار برد. در سازه‌های ساده تر مانند سازه خانه‌های قدیمی، کلیساها و ... معمولاً پوسته خارجی و اسکلت درونی یکی است. البته موارد استثنایی در این مورد نیز وجود دارد، مثلاً چادر سرخ پوستان به نام "ته پی" ^{۱۴} دارای یک اسکلت مجزا و پوشش بیرونی روی آن می‌باشد. برای سادگی بیشتر، در سازه‌هایی با عملکرد ثابت و با مقیاس کوچک تر (منظور دهانه سازه‌ای کوچک تر می‌باشد)، فرم‌های سازه‌ای اکثراً یکسان می‌باشند. ولی در سازه‌هایی که نیاز به دهانه‌های آزاد و بزرگ تر است، مانند دفاتر اداری، فروشگاه‌ها، سالن‌های ورزش و ... در اغلب موارد سیستم‌های سازه‌ای متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم سازه‌ای در چنین مواردی متشکل از تیرها و ستون هاست (مشابه اسکلت حیوانات) و نمای ساختمان، پوشش خارجی را شکل می‌دهد (مشابه پوسته خارجی بدن حیوانات). در بعضی موارد به دلیل وزن سنگین مصالح در پوشش نهایی که تاثیری در حمل بارها ندارند، پایداری سازه‌ای دچار مشکل می‌شود. در چنین حالتی پوسته خارجی سازه به‌عنوان تکیه‌گاه اصلی در نظر گرفته می‌شود که برای نمونه می‌توان به گنبدها و پوسته‌ها اشاره کرد.

درس‌هایی از طبیعت برای طراحان

در طبیعت علاقه مفرط و بی قید و شرط به ترکیب کارایی سازه‌ای و عملکرد به چشم می‌خورد. شاید بتوان فرم‌های حاصل از حرکت بال پرندگان در حال پرواز، شاخه‌های یک درخت که در باد نوسان می‌کند، قدرت و زیبایی یک اسب و یا یک گربه در حال پرش را "زیبایی خوشایند" تعریف کرد.

فرآیند خلق فرم‌های طبیعی که ما آنها را ذاتاً زیبا می‌نامیم، سیر تحول طولانی داشته است که در طول میلیون‌ها سال اتفاق افتاده است. فرم‌های طبیعی در طول قرون متمادی برای رسیدن به راه‌حل‌های قابل قبول در برابر عوامل خارجی (اقلیم، دسترسی به غذا، سرپناه و ...) توسعه یافته‌اند. تجزیه عوامل و محدودیت‌های عملکردی و سازه‌ای بسیاری از عوامل فوق‌الذکر را خلاصه می‌سازد.

پیشرفت‌های کاملاً تصادفی در فرم‌های سازه‌ای که در دوره‌های مختلف اتفاق می‌افتد، ممکن است باعث برتری بعضی از فرم‌ها نسبت به فرم‌های دوره‌های قبل از خود و یا بالعکس باعث شکست و خرابی "در یک فرم گردد. در صورت وقوع شکست و خرابی می‌توان نتیجه گرفت که در چنین فرم‌هایی نیازهای سازه‌ای و یا ایده‌ال‌های عملکردی با یکدیگر هماهنگی نداشته‌اند. به عنوان مثال چشم ژنتیکی ممکن باعث به وجود آمدن استخوانی با مقاومت دو برابر با نصف مصالح مصرفی در استخوانی مشابه که در دوره‌های قبل وجود داشته است، گردد، ولی در صورتی که در اندازه و مقاومت رباط‌های پیوند دهنده استخوان با دیگر اعضا تغییری به وجود نیاید، چنین فرمی با وجود مقاومت بیشتر و مصالح مصرفی کمتر غیر قابل استفاده خواهد بود. مثالی دیگر در مورد افزایش طول بال پرندگان است که می‌تواند ارتفاع پرواز پرنده را افزایش دهد. در صورتی که چنین بالی از نظر سازه‌ای آن چنان ضعیف باشد که هنگام بال زدن پرنده بشکند، با وجود تامین نیازهای عملکردی، دارای کارایی سازه‌ای لازم نخواهد بود. چنین فرم‌هایی در طول زمان محکوم به شکست خواهند بود. "موفقیت" هنگامی حاصل می‌شود که تامین‌کننده ترکیبی از نیازهای مختلف سازه‌ای و عملکردی باشد.

چنین بحثی در مورد طراحی ساختمان‌ها نیز وجود دارد که مانند موارد فوق عبارت "کاملاً موفق" و یا "کاملاً ناموفق" را نمی‌توان در مورد آنها به کار برد. در تمامی ساختمان‌ها باید تعادلی بین نیازهای سازه‌ای با اهداف عملکردی ساختمان وجود داشته باشد و در عین حال ساختمان به عنوان یک کل باید از نظر زیبایی‌شناسی نیز "خوشایند" باشد. مقایسه ساختمان‌ها با آن چه که به تدریج در طبیعت اتفاق افتاده است، فقط بخشی از نیازهای طراحی را تامین می‌کند. زیرا طراحی ساختمان‌ها جدا از کارایی سازه‌ای و عملکردی، تحت تاثیر طیف وسیعی از نیازهای سیاسی، اجتماعی، عوامل انسانی و همچنین زمینه طرح قرار می‌گیرد، عواملی که بیش از نیروهای موجود در طبیعت تاثیرگذار هستند. به همین دلیل نمی‌توان هیچ طرح ساختمانی را مشابه آن چه که در



تصویر شماره ۲۰- عناصر کششی و فشاری نگهدارنده شیشه هادر ترمینال بین المللی واترلو در شهر لندن

این اجزا نقش کاملاً متفاوت در تامین مقاومت خمشی دارند. با وجود عدم شباهت ظاهری ماهیچه و استخوان با اعضای عمودی در پنجره‌ها^{۱۵} (تصویر ۲۰)، این نمونه‌ای مناسب برای مقایسه دست ساخته انسان با آن چیزی است که در طبیعت اتفاق می‌افتد. در این حالت اعضای عمودی به عنوان تیرهای عمودی عمل می‌کنند که پانل‌های شیشه‌ای را نگاه می‌دارند. هنگامی که نیروی فشار باد از یک سمت به جداره شفاف وارد می‌شود، این اعضا باید در مقابل نیروی خمشی در دو جهت مقاومت نمایند، مانند بازوی انسان که باید در برابر نیروهای وارد بر دست در دو جهت رو به بالا و رو به پایین مقاومت نماید (تصاویر ۱۸ و ۱۹).

در بازوی انسان چنین مقاومتی از طریق ماهیچه‌ها که در طرفین استخوان قرار گرفته‌اند تامین می‌شود. هنگامی که بازو خم می‌شود، استخوان می‌تواند تحت فشار باشد، در حالی که ماهیچه‌ها مقاومت کششی لازم را در جهت مناسب فراهم می‌سازند. باید توجه نمود که در اعضای عمودی پنجره‌ها میله‌های فولادی بلند تا پایین سطح شیشه ادامه می‌یابند که در واقع اعضا فشاری هستند. در طرف دیگر پانل شیشه‌ای به اعضای کوتاه که میله‌های کششی سبک تراند، متصل می‌شوند. زمانی که نیاز به خم شدن اعضای عمودی پنجره‌ها می‌باشد، اعضای بلند مانند استخوان و یک یا چند میله کششی مانند ماهیچه‌ها عمل می‌کنند. با بررسی مثال فوق می‌توان دریافت با دقت در آن چه که در طبیعت وجود دارد طراحی اعضای عمودی سازه‌ای با جزئیات و اتصالات زیبا و خیره‌کننده امکان پذیر است.

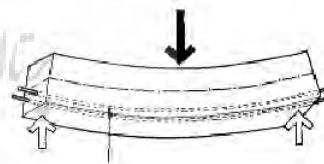
در بین جالب‌ترین نمونه‌های طراحی معماری که با استفاده از قوانین موجود در طبیعت شکل گرفته‌اند می‌توان به سازه‌هایی با فرم "درختی" اشاره کرد. وجود شاخه‌های فوقانی در یک درخت برای ایجاد سطحی به عنوان سایبانی وسیع برای درخت است که می‌تواند نور خورشید را جذب کند و در نتیجه انرژی لازم برای درخت را تامین نماید. وزن شاخه‌های فوقانی به تدریج به سمت تنه درخت متمرکز شده و یک تنه با حجم و شکل مناسب را ایجاد می‌کند. شاید اگر درختان به شکل و فرم کامل از زمین سبز شوند، فرم مناسب‌تری با کارایی سازه‌ای بهتر حاصل شود ولی درختان به شکل نهایی خود خلق نمی‌شوند.

طبیعت اتفاق می‌افتد، کاملاً " صحیح " و یا کاملاً " نادرست " ارزیابی کرد، زیرا تعادل بین عوامل فوق موضوع انتخاب‌های متنوعی را مطرح می‌سازد.

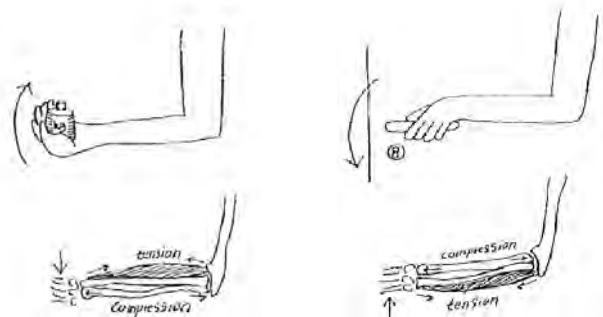
تقلید از طبیعت

در بعضی موارد هنگام بحث در مورد فرم سازه‌ای، مقایسه‌ای غلط بین فرم‌های طبیعی و دست ساخته‌های انسان صورت می‌گیرد. به عنوان مثال، می‌توان به مقایسه اشتباه بتن که اطراف آرماتورهای فولادی را می‌پوشاند با ماهیچه‌های بدن حیوانات که اطراف استخوان‌ها را می‌پوشانند، اشاره کرد. ظاهراً این چهار عامل (فولاد، بتن، ماهیچه و استخوان) با هم مشابه‌اند ولی در حقیقت اگر نقش هر یک از اجزا را در ترکیبات آنها یعنی بتن مسلح و استخوان و ماهیچه در نظر بگیریم، چنین مقایسه‌ای کاملاً اشتباه است.

استفاده از ماهیچه و استخوان برای تامین مقاومت خمشی نمونه‌ای عالی از تکنولوژی موجود در طبیعت است. به عنوان مثال در بازوی انسان، هنگامی که دست انسان یک وزنه را به شکل افقی و رو به پایین نگاه می‌دارد (تصاویر ۱۸ و ۱۹)، طره بازو، خمشی رو به پایین را تجربه می‌کند. هر عضو سازه‌ای (مانند بازوی انسان) در مقابل خمش با تولید نیروهای کششی و فشاری به شکل زوج نیرو که منتج به ایجاد گشتاور می‌شوند، مقاومت می‌کند. در بازوی انسان نیروی فشاری توسط استخوان‌ها و نیروی کششی توسط ماهیچه‌ها تامین می‌شود در حالی که در یک تیر بتنی مسلح، میله‌ای فولادی مقاومت کششی و بتن مقاومت فشاری ایجاد می‌نماید. علیرغم شباهت ظاهری بین استخوان‌ها و ماهیچه‌ها با میله‌های فولادی و بتن،



تصویر شماره ۱۷- تیربتنی مسلح



تصویر شماره ۱۹- خمش در بازوی دست انسان (نیروی وارد رو به پایین)

تصویر شماره ۱۸- خمش در بازوی دست انسان (نیروی وارد رو به بالا)

طبیعت و فرم‌های دست ساخته انسان انجام داد. درختان و ستون‌های یک ساختمان کاملاً به طور مشابه و در یک جهت عمل نمی‌کنند، زیرا بارهای وارد بر آنها متفاوت است. درختان طره‌های واقعی‌اند که خصوصیت اصلی آنها قابلیت انعطاف می‌باشد. از نظر سازه‌ای درختان به هنگام نوسان در باد و یا زمانی که کودکی از آنها تاب می‌خورد، صلب باقی نمی‌مانند و در اثر قابلیت انعطاف به تدریج مقاومت نهایی خود را به دست می‌آورند. درختان نیازی به سخت ماندن تحت بارگذاری ندارند. از سوی دیگر ساختمان‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که به هنگام بارگذاری سخت‌تر شوند. هیچ سازه‌ای نمی‌تواند بی نهایت سخت باشد و تمام ساختمان‌ها باید هنگامی که باری بر آنها وارد می‌شود، تغییر شکل دهند، هرچند که این تغییر شکل خیلی خوشایند نباشد. در بدترین حالت ممکن است چنین ساختمان‌هایی به دلیل جابجایی درها و پنجره‌ها به هنگام حرکت، غیرقابل استفاده شوند. حتی تکرار حرکت اعضای باربر می‌تواند باعث ریزش ساختمان شود.

طراح سازه‌های درختی باید چنین مشکلاتی را در ابتدا در ذهن خود مرور و حل کند. ساختن شاخه‌های طره‌ای ساده به طور طبیعی باعث سنگین شدن اعضا و خم شدن آنها با میزان بار وارده ناچیز می‌شود. یک راه حل مناسب برای این مشکل که امکان انجام آن در طبیعت وجود ندارد، بستن سر شاخه‌ها به یکدیگر است. بنابراین شاخه‌هایی که به طور طبیعی در اثر بارگذاری به سمت بالا و پایین تغییر شکل می‌دهند، به راحتی نمی‌توانند خم شوند زیرا در جهت مخالف در اثر بسته شدن به یکدیگر کشیده می‌شوند.

بهترین استفاده از این راه حل را می‌توان در فرودگاه اشتوتگارت که توسط فون گرکان^{۱۸} طراحی شده است، مشاهده نمود (تصویر شماره ۲۳). ستون‌های درختی تکیه‌گاهی دارای شاخه‌های متعددی می‌باشند و بنابراین سقف سازه‌ای در فواصل منظم نگاه داشته می‌شود. حتی به دلیل بستن شاخه‌ها به هم، اعضای طره‌ای می‌توانند به میزان قابل توجهی لاغر باشند.

آنها باید از شکل نهال رشد کنند و سپس جوانه می‌زنند و با تکرار این عمل به شکل نهایی می‌رسند. بنابراین شکل نهایی یک درخت بستگی کامل به نوع رشد آن دارد. فرم سازه‌ای درخت به گونه‌ای است که بدنه طره‌ای حجیم آن تمامی بارهای عمودی وزن و نیروهای جانبی باد را تحمل می‌کند و به خوبی پاسخگوی نیازهای عملکردی خود می‌باشد. سازه‌های درختی باید قابلیت پاسخگویی به انواع نیازها را داشته باشند. زیرا چنین سازه‌هایی به طور معمول در ساختمان‌هایی با عملکردهایی که نیاز به فضای باز بدون ستون، گشودگی و انعطاف‌پذیری دارند، بکار می‌روند. این نوع از سازه‌ها در فضاهای بدون ستون و آزاد با ارتفاع مناسب کف تا کف و یا کف تا سقف بهتر عمل می‌کنند.

از نمونه طرح‌های موفق با استفاده از این سیستم می‌توان به سالن‌های ورودی، خروجی و ترانزیت مسافران در فرودگاه‌ها و سالن‌های سخنرانی اشاره کرد. به عنوان مثال نورمن فاستر^{۱۶} با همکاری شرکت مهندسی مشاور آوه اروپ با استفاده از چنین سیستم سازه‌ای فرودگاه استنستد در چند کیلومتری شهر لندن را در سال ۱۹۹۰ طراحی کرد.

در این طرح از ستون‌هایی به شکل درخت به فواصل ۳۶ متر از یکدیگر به عنوان تکیه‌گاه اصلی ساختمان استفاده شده است. این فواصل در سطح بام به ۱۲ متر می‌رسند. بادقت در فرم این ستون‌ها در فرودگاه استنستد به خوبی فرم طره‌ای بدنه ستون و شاخه‌های آن به چشم می‌خورد. طراح ساختمان برای دستیابی به مقاومت خمشی لازم ۴ ستون لوله‌ای فولادی را در پایه به یکدیگر متصل کرده است که بتدریج به ترکیبی از لوله‌های فولادی مدور و کابل‌های کششی می‌رسند. در این ساختمان به خوبی می‌توان فرم طبیعی درخت را که در یک ستون به کار رفته است مشاهده کرد. علاوه بر آن که چنین سیستمی در شکل ظاهری خود مشابه درخت است، در عین حال طراح به یک فرم مناسب سازه‌ای که پاسخگوی نیازهای عملکردی نیز می‌باشد، دست یافته است.

در اینجا می‌توان مقایسه بیشتری بین فرم یک درخت در



تصویر شماره ۲۳ - فرودگاه اشتوتگارت، طراحی شده توسط فون گرکان



تصویر شماره ۲۲ - نمای خارجی فرودگاه استنستد شهر لندن، طراحی نورمن فاستر



تصویر شماره ۲۱ - ستون‌های درختی در فرودگاه استنستد شهر لندن

نتیجه‌گیری

عنوان منبعی عظیم برای الهام بخشی، با تقلید بی چون و چرا از فرم‌های طبیعی در معماری سخت مخالفت می‌نماید و می‌نویسد:

[آرایش شیاری ستون‌های دوریک، که من نمی‌پذیرم که سمبولی از شکل پوست درخت برای یونانیان باستان بوده است، در اصل خود تقلیدی از سازه‌های ارگانیک می‌باشد، با وجود آن که زیبایی در آن حس می‌شود ولی این زیبایی نشان دهنده سطح پایینی از نظم بسیار بالای موجود در طبیعت است.]

Ruskin, 1906, 188)

با کوشش در درک قوانین طبیعت و دیدن، احساس کردن، شنیدن و یا استشمام فرم‌های طبیعی شاید بتوان به زیبایی عملکردی طبیعی دست یافت (به طور مثال زیبایی از طریق حداکثر کارایی در مصالح و فرم حاصل می‌شود). برای توسعه و پرورش فرم‌های معماری که در طبیعت یافت می‌شوند، قوانین اساسی وجود دارد که می‌توان آنها را در اغلب ساختمان‌های بدیع و نوین به کار برد. نتیجه این کار طراحی عالی است که کارایی سازه‌ای، نیازهای عملکردی و زیبایی‌شناسی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. درس‌هایی که از طبیعت آموخته می‌شوند و به طور مناسب به کار می‌روند نه فقط "تقلید محض" از آن.

با توجه به مباحث مطرح شده و با در نظر گرفتن ساختمان‌هایی که با الهام از فرم‌های طبیعی شکل گرفته‌اند، می‌توان به این نتیجه دست یافت که طراحان برای استفاده و تقلید از فرم‌های طبیعی تاکنون دو شیوه را به کار برده‌اند. شیوه اول اینکه هدف طراح فقط تقلید از ظاهر خارجی فرم‌های طبیعی باشد که در این صورت ساختمان‌ها فقط بازتابی از زیبایی ظاهری موجود در طبیعت محیط اطراف می‌باشند. شیوه دوم آن که طراح از فرایندهایی که فرم‌های طبیعی را شکل داده‌اند، برای خلق طرح‌های جدید الهام می‌گیرد.

باید خاطر نشان ساخت که هیچ یک از این دو روش تضمینی برای ایجاد معماری با کیفیت خوب و مناسب نیست. طراحی معماری تنها با استفاده از درس‌های تکنیکی موجود در طبیعت (حتی با درک فرایندهای موجود در آن)، مشابه ایجاد معماری بدون در نظر گرفتن زندگی درون آن است و حاصل آن معماری ساکن و غیرپویاست، زیرا همچنان که در بالا اشاره شد طراحی ساختمان مجموعه‌ای از عوامل محیطی و انسانی است. به طور مشابه، تقلید بدون تفکر از فرم‌های طبیعی، منجر به نتایج غیر عقلی و غیرمنطقی خواهد شد. قابل توجه است که در بین اکثر طرح‌های معماری‌آنهايي مورد انتقاد قرار گرفته‌اند که به تقلید صرف از فرم‌های طبیعی پرداخته‌اند و از حقیقت پنهان در آن غافل مانده‌اند. حتی جان راسکین، مدافع سرسخت طبیعت به

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Stuttgart Airport
- ۲ Stansted Airport
- ۳ Pont d'Arc
- ۴ Rainbow Bridge
- ۵ - این پل معلق که در شهر توکیو اجرا شده است، دارای دهانه‌ای به طول ۷۸۰ متر، طول کلی ۲/۷۵ کیلومتر، ارتفاع پایه‌ها ۱۲۷ متر و سطح اصلی آن نیز دو طبقه می‌باشد. سازه اصلی ترکیبی از کابل و خریاست.
- ۶ Landscape Arch
- ۷ - یکی از بزرگترین قوس طبیعی در دنیا که در Arches National Park در امریکا قرار دارد. طول دهانه این قوس ۸۳ متر است.
- ۸ Thin Shells
- ۹ پوسته‌ها، سازه‌ای نازک با سطح منحنی می‌باشند که بارها را فقط به وسیله کشش، فشار و برش به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌کنند. برای مطالعه بیشتر رجوع کنید به فصل ۱۵ کتاب درک رفتار سازه‌ها.
- ۱۰ سازه ورق تاشده سطح صاف تاشده‌ای است که بارهای وارده را فقط از طریق کشش، فشار و خمشی که فقط در بین بخش‌های تاشده سطوح وجود دارد، به تکیه‌گاه‌ها انتقال می‌دهد. برای مطالعه بیشتر رجوع کنید به فصل ۱۶ کتاب درک رفتار سازه‌ها.
- ۱۱ Primo Levi
- ۱۲ Buckminster Fuller
- ۱۳ فولرن‌ها، مولکول‌هایی قفس‌مانند هستند که شکل هندسی بیست‌وجهی برش خورده دارند. این مولکول‌ها می‌توانند به فرم C60، C70 و C78 و ... باشند. نام آنها از نام معمار معروف، "باکمینستر فولر" گرفته شده است. وی طراح گنبد‌های ژئودزیک است.
- ۱۴ Santiago Calatrava
- ۱۵ - سانتیاگو کالاتراوا به هنر به عنوان انگیزه و محرکی برای خلق آثارش می‌نگرد. وی بیان می‌کند که گوناگونی و تنوع در طراحی هایش منعکس کننده اهمیت است که وی به هر جزء می‌دهد. بسیاری از موضوعات و فرم‌های ارابه‌ای شده توسط او در این سطح، به مجسمه‌هایی تبدیل شده‌اند

- ۱۳ که منبع الهامی برای پل‌ها، ایستگاه‌های قطار، فرودگاه‌ها، موزه‌ها و حتی میزهای غذاخوری بوده‌اند.
Lusitania Bridge
- ۱۴ - این پل از انواع پل‌های قوسی با سطح معلق است و در کشور اسپانیا ساخته شده است. طول دهانه اصلی ۱۸۹ متر و طول کلی آن ۴۶۵ متر می‌باشد.
Tepee
- ۱۵ Mullion
- ۱۶ Norman Foster
- ۱۷ Ove Arup
- ۱۸ Von Kergen

فهرست منابع:

سالوادوری، ماریو (۱۳۸۴)، سازه در معماری، ترجمه دکتر محمود گلابچی، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
مور، فولر (۱۳۸۴)، درک رفتار سازه‌ها، ترجمه دکتر محمود گلابچی، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

- Billington, D., (2005), *The Art of Structural Design: from Maillart to Menn*, Princeton University, New Jersey, USA.
- Cook, J, (1996), *Seeking Structure from Nature: The Organic Architecture of Hungary*, Princeton Architectural Press, New Jersey, USA.
- Holgate, A., (1986), *The Art in Structural Design*, Carlendon press, Oxford.
- Levi, P., (1986), *The Periodic Table*, (Translated from Italian by Raymond Rosenathal), Abacus Book, London.
- Mainstone, R. (2001), *Developments in Structural Form*, Architectural Press; 2nd edition, St. Louis, USA.
- Nervi, P.L. (1965), *Is architecture moving towards unchanging forms? In Kepes, G. Structure in art and science*, Braziller, New York.
- Nervi, P.L. (1956), *Structures*, McGraw-Hill, New York.
- Polano, S. (1996), *Santiago Calatrava: Complete Works*, Electa, Milan.
- Popovic Larsen, O. and Tyas, A., (2003), *Conceptual Structural Design*, Thomas Telford, London.
- Ruskin, J., (1906), *The Seven Lamps of Architecture*, George Allan, London.
- Salvadori, M., (1990), *Why Buildings Stand up*, W. W. Norton, London.
- Thompson, D'Arcy., (1992), *On Growth and Form*, The Complete Revised Edition, Dover Publications, Inc., New York.
- Tsui, E. (1999), *Evolutionary Architecture: Nature as a Basis for Design*, Wiley, London.
- Hagan, S. (2001), *Taking Shape: A New Contract Between Architecture and Nature*, Architectural Press, St. Louis, USA.