نشریه علمی بوطیقای معمـــاری
زمستان ۱۴۰۱، سال ۲، شماره ۷

تبیین جایگاه تکنولوژی پیشرفته و بیومکانیک در معماری با تاکید بر تحلیل آثار سانتیاگو کالاتراوا

زمان دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۲ زمان پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۸/۳۰

زهرا گنجعلی‌بنجار– دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
دکتر علی بهنام‌والا[1]– استادیار، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

واژه فناوری پیشرفتهِ «بیومکانیک» از دو بخش «بیو» و «مکانیک» تشکیل شده و به معنی کاربرد اصول مکانیکی و فناوری پیشرفته در طراحی بناهای فنی مانند رصدخانه و غیره با الگوبرداری از قوانین مکانیکی در موجودات زنده می‌باشد. به زبان دیگر بیومکانیک مطالعه ساختار و عملکرد یک سیستم زنده با استفاده از قوانین مکانیکی می‌باشد که قابلیت کاربرد در معماری و ساختارهای سیستم سازه ای را دارد. لذا می‌توان علم بیومکانیک را در شاخه‌های مختلف انسانی، حیوانی و حتی گیاهی مورد بررسی مانند معماری و طراحی داخلی یا صنعتی قرار داد. روش پژوهش حاضر توصیفی– تحلیلی است که از روش فراتحلیل در جمعبندی پیشینه نیز استفاده شده است. ابزار گردآوری داده نیز مشتمل بر مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای بوده است. یافته‌های تحقیق نشان داده است که به‌طورکلی «طراحی و ساخت هر نوع سازه مبتنی بر ساختارهای مکانیکی طبیعت (بیومکانیک) بر اساس سه شرط اساسی است که عبارتند از تعیین هدف نهایی، تعیین نیازهای اصلی و فرعی و انتخاب مصالحی که برای به انجام رساندن و تحقق یک اثر هنری کامل ضروری است»؛ چرا که فرایند به‌تصویر کشیدن یا تصور یک سازه خود نوعی هنر است. و اساسا این خود نوعی الهام است، از تجربیات درونی یک مهارت فطری و یک حس ذاتی؛ به قول «ادوارد تروجا» روند تجسم یا تصور سازه یک هنر است که به‌طور اساسی به وسیله تجربه درونی و درک مستقیم حاصل شده است و هرگز نتیجه ای صرفاً استدلالی و قیاسی نمی‌باشد.

واژگان کلیدی: بیومکانیک، سازه و معماری، کالاتراوا، ساختار بیولوژیکی.

[1] این مقاله از پایان نامه خانم «**زهرا گنجعلی‌بنجار**» در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال با **عنوان** «**طراحی رصد خانه با رویکرد معماری پیشرفته**» استخراج شده که از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد تهران شمال قدردانی می‌گردد.

(*) نویسنده مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۹۱۲۸۸۸۹۹۲۴، رایانامه: vala.behnam3@yahoo.com

۱- مقدمه و بیان مساله

بیومکانیک» (به انگلیسی) استفاده از اصول مکانیک در سیستم‌های بیولوژیکی مانند انسان، جانوران، گیاه، اندام، یاخته (سلول) است. شاید یکی از بهترین تعاریف از بیومکانیک را «هربرت هتزه» در سال ۱۹۷۴ میلادی بیان کرده است: بیومکانیک مطالعه ساختار و عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی با استفاده از روش‌های مکانیک است. واژه بیومکانیک در ابتدای دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت، که توصیف کننده استفاده از مهندسی مکانیک در سامانه‌های زیست‌شناسی و مهندسی پزشکی است. در یونان مدرن از آن به عنوان εμβιομηχανική یاد می‌شود((Tischhauser, A. & Von Moos, S. (1998). لذا بیومکانیک جهت شناسایی خواص مکانیکی و مطالعه رفتار ساختاری بافت‌های بیولوژیک (و سلول‌ها) باشد. ایجاد ارتباط بین عملکرد و ساختار بافت‌ها و اندام، آشنایی با بیومکانیک بافتهایی نظیر استخوان، غضروف، لیگامان، دیواره شریان‌ها و قلب، اشنایی با مدل‌های بیومکانیکی در مطالعه جامدهای زیستی، آشنایی با رفتار ذاتی و دینامیک مایعات زیستی (همودینامیک) و بیومکانیک سلولی از سرفصل‌های مهم بیومکانیک است. بیومکانیک عبارت است از تحلیل مکانیکی ارگان‌های موجودات زنده. در واقع بیومکانیک، کاربرد علم مکانیک در سیستم‌های بیولوژیکی است (محمودی نژاد: الف، ۱۳۹۹، ص ۳۹).

۲- روش‌شناسی و پیشینه تحقیق

روش پژوهش حاضر توصیفی- تحلیلی است که از روش فراتحلیل در جمعبندی پیشینه نیز استفاده شده است. ابزار گردآوری داده نیز مشتمل بر مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای بوده است. ماهیت این پژوهش نیز بنیادی و توسعه ای در حوزه معماری و طراحی ساختارهای فرمی و سازه‌ای معماری است.

پیشینه تحقیق: مهندسان مکانیک، اصول اساسی نیرو، انرژی، حرکت و گرما را به کار برده و با دانش تخصصی خود، سیستم‌های مکانیکی و دستگاه‌ها و فرآیندهای گرمایی را طراحی کرده و می‌سازند. مهندسان مکانیک، گستره وسیعی از دستگاه‌ها، فرآورده‌ها و فرآیندها را تولید می‌کنند؛ به‌عنوان نمونه: موتورها و سیستم‌های کنترل خودرو و هواپیما، نیروگاه‌های الکتریکی، دستگاه‌های پزشکی، اجزا و قطعه‌های گوناگون از موتورهای با ابعاد میکروسکوپی گرفته تا چرخ‌دنده‌های غول‌آسا، فناوری لیزر، طراحی و ساخت به کمک رایانه، ماشینی کردن یا خودکارسازی (اتوماسیون) و روباتیک، انواع گوناگونی از فرآورده‌های مصرفی از دستگاه‌های تهویه مطبوع گرفته تا رایانه‌های شخصی و تجهیزات ورزشی، ماشین‌ها و دستگاه‌هایی که هر یک از فرآورده‌های بالا را به صورت انبوه تولید می‌کنند. می‌توان گفت تقریباً همه جنبه‌های زندگی، در ارتباط با مهندسی مکانیک هستند. هر چیزی که حرکت کند یا انرژی مصرف نماید، احتمالاً یک مهندس مکانیک در طراحی یا ساخت آن نقش

داشته است. چندتن از مهندسان مکانیک معروف که پیش از این می‌زیسته‌اند، عبارت‌اند از (Todorova, A., Asakawa, S. & Aikoh, T. (2004)):

- کارل (فردریش) بنز (۱۸۴۴–۱۹۲۹): مخترع موتورهای دیزلی و بنیان‌گذار موتورهای احتراق داخلی (هم دوره با دایملر و می‌باخ) و سازنده اولین خودروی تجاری، مبدع پدال گاز در خودرو و سیستم جرقه‌زنی با استفاده از شمع و باتری، مخترع کلاچ و مکانیزم تعویض دنده، کاربراتور و رادیاتور نیز از اختراعات اوست.
- گوتلیب ویلهلم دایملر (۱۸۳۴–۱۹۰۰): مهندس و طراح صنعتی، به همراه می‌باخ مخترع اولین موتور سیکلت (دوچرخه موتوردار) و پیشرو در گسترش موتورهای احتراق داخلی، پدر بزرگ موتورهای احتراق داخلی.
- چستر کارل‌سون (۱۹۰۶–۱۹۶۸): دستگاه زیراکس از نوآوری‌های اوست.
- ساموئل کولت (۱۸۱۴–۱۸۶۲): سازنده اسلحه کولت.
- سویچیرو هوندا (۱۹۰۶–۱۹۹۱): بنیان‌گذار شرکت معروف هوندا.
- آیزاک سینگر (سینجر) (۱۸۱۱–۱۸۷۵): سازنده نخستین چرخ خیاطی خانگی.
- آلفرد برنارد نوبل: پایه‌گذار اندیشه جایزه نوبل.
- رودولف دیزل: سازنده موتورهای معروف دیزل که با گازوئیل کار می‌کنند.
- ویلیس کریر: مخترع تهویه مطبوع.
- دونالد کرن: در زمینه مبدلهای حرارتی خدمات ارزنده‌ای بر جای نهاد و مولف کتاب heat exchanger design نیز می‌باشد.
- می‌باخ ویلهلم (۱۸۴۶–۱۹۲۹): مهندس و طراح صنعتی، صاحب نشان میباخ، همکاری با دایملر در ساخت موتورهای احتراق داخلی و موتورهای چهار زمانه، دارنده دکترای افتخاری از دانشگاه اشتوتگارت، عضو افتخاری انجمن مهندسین آلمان.
- نیکلاس اتو (۱۸۳۲–۱۸۹۱): مهندس و مخترع اولین موتور احتراق داخلی با بازدهی مطلوب، تعمیم‌دهنده مفهوم چهار زمانه به موتورهای احتراق داخلی.
- جیمز وات: تکمیل کننده موتور بخار و پدر انقلاب صنعتی

۳- ادبیات تحقیق

۳-۱ بیومکانیک و فناوری پیشرفته (های‌تک)

بیومکانیک واژه‌ای مرکب از bio به معنی زیست و زندگانی و mechanic به معنی (افزارگر) یا کارکننده یا ابزار یا به عبارتی تعمیرکار است که به معنی: (توان‌مندی بدنی در جهت نشان دادن هستی چیزهاست. یا به عبارتی «بیومکانیک» واژه‌ای مرکب، تشکیل یافته از دو کلمهٔ: (بیو) به معنی: طبیعت و (مکانیک) به معنی: عمل و کارکرد یک ماشین است. این واژه در جمع به معنی (طبیعت

عمل) است. می‌توان بیومکانیک را از دیدگاه هنری نوعی «ریاضت و زیبایی‌شناسی فیزیکی» دانست که سعی دارد تا به طبیعت عمل یا در واقع همان «ریشهٔ چیزها» دست یابد. بیومکانیک یعنی عمل نهفته و خلاصه‌شده برگرفته از هستی «چیزها». هر پدیده‌ای در هستی، یک «چیز» محسوب می‌شود؛ پس می‌توان به کمک تلاشی ریاضت‌گونه و بدنی «چیستی» یا «ماهیت» آن را متجلی کرد. بیومکانیک اعمالی است؛ خلاصه‌شده و در نهایت دقت و کنترل که هدفش «انتقال معنی یک احساس» یا «بیان احساسی نهفته در صحنه» است ((Tzonis, A. (1999).

۳-۱ شبیه‌سازی طبیعت و بیومکانیک معماری

شبیه‌سازی طبیعت می‌تواند از حوزه‌های مرتبط با بیومکانیک باشد. از سویی دیگر، پیشرفت‌های تکنولوژی امروزی در ساخت متریال‌ها و اکتشافات علمی در زمینه ساخت و ساز نمایانگر هستند، دست یافته‌های معماری نیز در پیدا کردن راه حل برای مسائل طراحی و ساخت و ساز یاری‌رسان بوده‌اند. طبق گفته‌های «مارتین پاولی» [Martin Powly] در نوآوری در معماری: معماران و مهندسین اکنون به فرصت‌های جدیدی که توسط متریال‌های جدید فراوان و ابزار پیچیده پیش‌بینی، عرضه شده است، عکس‌العمل نشان می‌دهند. نمونه‌های متعددی از دست‌یافته‌های معماری وجود دارند که به طور موفقیت‌آمیز پیشرفت‌های تکنولوژی مدرن کنونی در طراحی و ساخت و ساز را با اصول الهام‌بخش طبیعت ادغام کرده‌اند. طرح «گراندسنترال» [Grand Central] و ایستگاه پن [Penn Station] توسط معمار سانتیاگو کالاتراوا نمونه‌های بارزی هستند. هدف اصلی او در پایانه پات [PATH] ایجاد یک پرچم دار، یک نقطه تمرکز جدید برای شهر، و یک«دروازه» خوش آمدگویی گسترده برای آنهایی بود که برای بار نخست توسط قطار به مانهاتن [Manhattan] وارد می‌شدند. ساختار و فرم، به ساختمان، و هم چنین مکان، نوعی شخصیت می‌دهد. یک رویکرد آسان‌تر برای فرم ساختاری و بیان الهام‌شده توسط طبیعت در ساختمان‌هایی با موضوعات محیط-زیستی مانند «نیکولاس گریمشا» [Nicholas Grimshaw] و پروژه عدن پارتنر [Partner's Eden Project]، به علت ذات محتوایشان، یا به خاطر موضوعات پیوسته ای که در پروژه به آنها اشاره شده، دیده می‌شود ((Tzonis, A. (1999).

تصویر ۱. گرند سنترال؛ ماخذ: اینترنت

تصویر ۲. پروژه عدن[1]؛ ماخذ: اینترنت

تصویر ۳. موزه هنر میلواکی در ایالات متحده[2]. ماخذ: اینترنت

۳-۲ سانتیاگو کالاتراوا

کارهای معمار اسپانیایی سانتیاگو کالاتراوا، با طرح‌هایی که اصول ساختاری در معماری را می‌نمایانند، فراوان‌اند. «دنیس شارپ» [Dennis Sharp] کار سانتیاگو کالاتراوا را در کتاب خود با عنوان سانتیاگو کالاتراوا با این بیان شرح می‌دهد:

«طرح‌های او اعضای مفصل دار را به‌کار می‌گیرند که مانند ارگانیسم‌ها، بیانگر گوشه‌های گرد بوده و از تضادهای تند و بخش بخشی اجتناب می‌کنند. قسمت‌های کار او منطبق با بخش‌های خمیدگی گوناگون می‌باشند؛ آنجاهایی که ستون‌هایش در میانه پهن تر و به‌تدریج حین نزدیک شدن به دو انتها باریک‌تر می‌شوند. مکررتر از همه چیز در کار او، عناصر بسیار متمایزشده هستند، متشکل از متریال‌های غیر یک شکل، که هر متریال باز هم مانند اعضای ارگانیسم‌ها وظیفه‌ای را که می‌تواند به بهترین‌نحو بدان عمل کند، متقبل می‌شود. به‌عنوان نتیجه، او به‌منظور طراحی چنین اعضایی برای خلق فواصل چالش برانگیز، ظرفیت ساختاری متریال ساختمان، به‌خصوص بتن و فولاد، را امتداد می‌دهد» ((Tzonis, A. (1999).

هم چنین طرح‌های کالاتراوا اصول ساختاری‌ای را که از استخوان‌ها و سایر فرم‌های طبیعی طبیعت الهام گرفته شده‌اند، به خوبی منعکس می‌کنند. گرچه، در بعضی موارد اثر او متمایل به تقلید از فرم بیرونی استخوان‌ها به‌جای اصولی که آنها را از درون فرم می‌دهند می‌باشد، همان طور که در پروژه «کانکریت پاویلیون» [Concrete Povilion- غرفه بتنی] هویدا است. اِعمال‌های ساختاری کالاتراوا هم چنین خصوصیات طبیعی مانند تقارن و نظم را با سختی و چکش خواری مواد ساختمانی ترکیب می‌کنند تا ساختارهایی سه بعدی با تأثیر بصری حیرت‌انگیز تولید کنند. در این باب، کالاتراوا اشاره می‌کند:

«طرح‌های من پیوسته فرم اسکلت‌ها را یادآور می‌شوند. پشت این موضوع، اصل رخداد دوباره است. در مورد مهره‌ها، می‌توان فرم را گرفته شده از این قانون کلی یافت که پایه از سر ضخیم‌تر

[1] www.edenproject.com
[2] www.cac.es

است. باز رخداد این قانون کارآمدی اقتصادی را بیان می‌کند. اما از چیز زیبایی به نام ریتم نیز برمی‌خیزد، ریتمی که می‌توان در قطعات موسیقی یافت».

توازن این ساختارها/اعضا وسیعاً به خصوصیت این متریال‌ها برای مقاومت در برابر نیروهای کشش و فشار بستگی دارد. دانش کالاتراوا از نیروهایی که روی یک ساختار عمل می‌کنند به شکل این قانون بیان می‌شود، که او به طور عالی در بدن انسان مشاهده می‌کند. برخی از این طرح‌ها مستقیماً در انتقال جلوه‌های تصویری ظاهر می‌شوند. بقیه سعی دارند تا ژست های انسانی را در این تحقیق «هندسه سازی کنند» [از روی اصول هندسه تعریف کنند] تا بعد گسترده‌تری از نیروهای فعال را بفهمند.

«آنتونی تریش‌هازر» در کالاتراوا می‌نویسد ((Tzonis, A. (1999)):

«ساختارهای کالاتروا این ایده را می‌دهند که از قسمت‌هایی ساخته شده‌اند که به هم بسته شده‌اند، که ابتدا در نگاه یک ذهن باز نشده هستند. آن‌ها سیستم‌های بازنشده‌ای نیستند، بلکه حرکتی هستند که به فرم کشیده شده است، یک انحنا درون دیگری ترکیب می‌شود بدون آن که ماهیتش را ببازد.»

اعمال مواد شهودی کالاتراوا به نظر می‌رسد که خصوصیات فیزیکی‌شان را مبدل کرده باشد. توازی با فرم‌های بدنی حیوانات و انسان‌ها با نپذیرفتن پوست از طرف کالاتراوا متوقف می‌شود. شالوده بتن، فولاد و شیشه از طریق وزن موادی که برای نگه داشتن آورده شده‌اند بیان می‌شود؛ سنگینی بیان شده لزوماً واقعی نیست. فولاد معمولاً سبک‌تر به نظر می‌رسد و سنگ‌های گرانیت سنگین هنگامی‌که در تضاد با کابل باریک قرار داده می‌شوند، ممکن است حتی سنگین‌تر به نظر برسند، مانند مورد گردشگاه استیدلهافن [Stadelhofen] با پایه‌های فولادی. «راد آشر» [Rod Usher] از مجله تایم [Time magazine] درباره معماری کالاتراوا نظر می‌دهد ((Jodidio, P. (2001)):

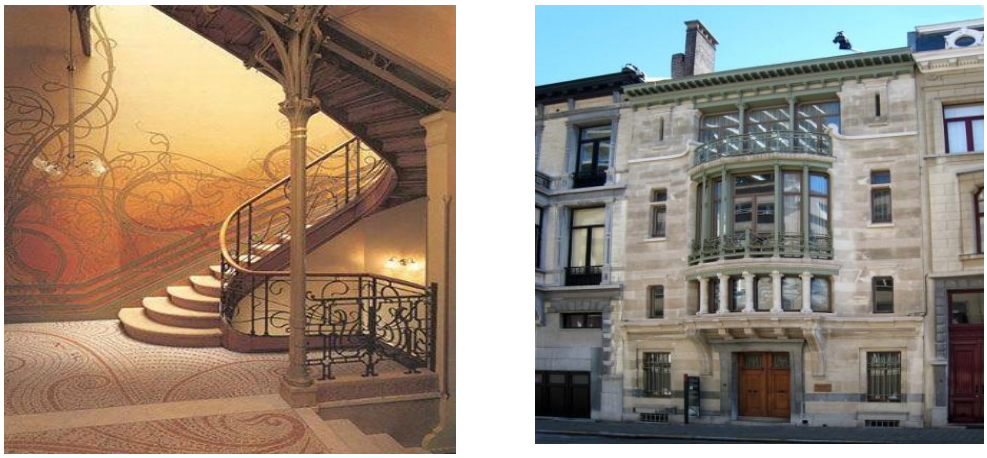
«یک شیء کالاتراوایی رویدادی بزرگ است که فضای معین خودش را اشغال می‌کند، که توسط فرم‌های سفید متمایز نشانه‌گذاری شده است. آنها اضافه، کاهش یا انطباق نمی‌پذیرند. ساختمان‌های او، به تأیید خودش، خودمختار هستند.»

با این همه، ساختمان‌ها برای کالاتراوا مانند موجودات زنده هستند و عملاً وجود در نظر گرفته می‌شوند- بالا و عمق، طرف بالایی و طرف زیرین، آغاز و پایان دارند. ساختمان‌هایش خوانا بوده و ساده، واضح، و خود مشمول به نظر می‌رسند و یکدست هستند. «روح بخشیدن به ساختمان» یکی از تمایلات معماری بیونیک است که طراحان این رشته با توجه به قدرت سازه برای تنفس (زنده‌نمایی)، به کمک خطوط مستقیم یا منحنی خالص و القاء آهسته تمامیت سازه به آن دست پیدا می‌کنند و مهمترین چیز برای معماری بیونیک آن است که ساختمان بتواند زنده بودن خود را القاء کند ((Flake, G.W. (1999)).

تصویر ۴. ایستگاه استدلهافن[1]. ماخذ: اینترنت

۳-۳ قالب‌های فولادی

بعدها، قالب فولادی که بنیان‌گذاران آن «لوئیس سولیوان» [Louis Sullivan] و مکتب شیکاگو از دهه هشتاد میلادی بودند، باعث شد تا ساختار درونی و روکش‌های بیرونی به‌صورت جداگانه درنظر گرفته شوند. مقایسه با پوست و استخوان در مهره‌داران غیرقابل اجتناب بود. تیرآهن‌های فولادی به‌عنوان اعضای ساختاری که یادآور قالب‌های اسکلتی هستند، نمایان شدند. به‌علاوه، بتن آرمه، متریالی که در فرانسه توسعه داده شد، ساختن ساختارهای چالش‌برانگیز جدید را ممکن ساخت. به دنبال خاتمه آرت‌نوو [Art Nouveau] و جنگ جهانی اول، رکودی در افزایش این تمایل به وجود آمد. احیای دوباره در دهه ۹۰ میلادی با توسعه های بیشتر در ساخت و ساز بتنی ممکن شد، همان‌طورکه امکان ساخت با استفاده از فولاد و شیشه به وجود آمد.



تصویر ۵. سبک آرت نوو و ویکتور هورتا و هتل تاسل [Hotel Tassel] براسلز [Brussels] ۱۸۹۲

بتن به یک متریال ساخت مرغوب در اواخر قرن نوزدهم به‌عنوان نتیجه پیشگامان نخستین مانند «فرانکویس هنبیک» [Francois Hannabique] (۱۹۲۱-۱۸۴۲) در فرانسه و «جی.آی وایز» [G.A. Wayss] (۱۹۱۷-۱۸۵۱) در آلمان، تبدیل شد. آثار آنها باعث رشد مطالعه علمی این ماده مرکب شد، و رویه‌های ساخت و ساز آن‌ها اقتصادی بودن رقابت‌کننده‌اش را بنیان‌گذاشتند. «هنبیک» [Hennebique] و «وایز» [Ways] در سال ۱۹۰۰ نشان داده بودند که بتن، با تقویت تیر فولادی قرار داده شده درون آن، یک متریال ساخت و ساز فراگیر است؛ و می‌شد آن را به‌جای چوب یا سنگ، یا حتی فولاد، به‌کار گرفت، البته به‌جز در محدوده‌های طولانی. بتن آرمه از آنجایی که در

[1] www.cac.es

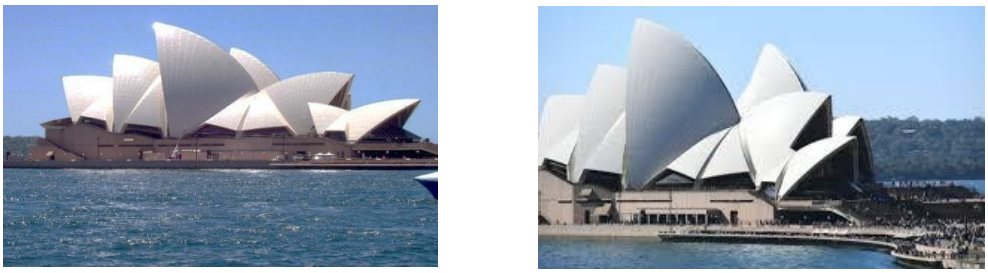
همه جهات کشیده و خم می‌شود، بسیار برای ایجاد یک معماری از دنده‌ها و استخوان‌ها مناسب است، محدودیت عمده در استفاده‌اش، هزینه‌ی ساخت چارچوب الواری است که در آن ریخته می‌شود ((Jodidio, P. (2001):

«گرچه چندین فرم بصری بی‌سابقه خلق کردند، این پیشگامان نه بر روی ظاهر ساختارهای بتنی، که بیشتر بر روی عملکرد قابل پیش‌بینی آن‌ها در خدمات و هزینه پایین ساخت و نگهداری‌شان تاکید داشتند.»

کمان‌های پل‌ها و چارچوب ساختمان‌ها مشهورترین فرم‌های آنها در دهه ۹۰ قرن ۱۸ میلادی بودند. وایز [Wayss] طرح‌های کمان‌باریک باغبان فرانسوی «جوزف مانیر» [Joseph Monier] (۱۹۰۶–۱۸۲۳) را برگرفته بود، درحالی‌که هنبیک به طور همزمان ایده‌هایش را به طور همزمان حول تیرها و ستون‌ها توسعه داد، و این کار را با عناصر فلزی که توسط بتن از آتش محافظت می‌شدند، شروع کرد. فرم‌های ساخت نهایی، با ستون‌ها، تیرها و تیرآهن‌هایی که تَختال‌های طولی را نگه می‌دارند، «شبیه ساخت و سازهای چوبی بودند». آنچه برای وی آشکار بود، این بود که ساختارهای بتن آرمه‌ای یکپارچه بودند، برخلاف آنهایی که به طور نرمال از عناصر فولادی یا چوبی ساخته شده بودند، چارچوب‌هایی که او طراحی نمود، بیان‌های بصری قدرتمندی از این طبیعت یکپارچه نبودند. این توسعه‌ها به‌تدریج به گسترش ناگهانی فرم‌هایی ساختاری که از فرم‌های طبیعی الهام گرفته شده بودند، انجامیدند. اگرچه طرح‌های حرکت نوهنر شکل‌هایی غالباً نباتی بودند، شباهت‌هایی نیز با ارگانیسم‌ها وجود داشت. کتاب کانست فرمن درناتورِ [Kunst-formen der Natur] «ارنست هکل» [Ernst Haekel] که در ۱۸۹۹ در اوج حرکات نوهنر و وینا سشنیست [Vienna Secessionist] آغاز شد، این تشدید را با موجودات دریایی متعدد ناپیدای خود که معمولاً میکروسکوپی بودند، به تصویر کشید. قرن دوازدهم معماران و مهندسینی را مانند پییر لوئیجی نروی و جیو پانتی [Gio Ponti] و نیز فلیکس کندلا که از پتانسیل ساختاری بتن آرمه بهره کافی را می‌بردند، به خود دید. عظیم‌ترین فتح‌های قرن در آثار ایرو سارینن [Eero Saarinen]، پایانه عقابی TWA در فرودگاه کندی نیویورک و کار جان یوتزن [John Utzon]، خانه‌ی اپرای سیدنی پولیسم، بارز بودند.

تصویر ۶. پایانه TWA از ارو سارینن؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

تصویر ۸. فستیوال باغ مانهیم [Mannheim]، آلمان، ۱۹۷۵؛ یک حفاظ نیمه شفاف ساخته شده توسط یک چارچوب مشبک الواری و روکشی از جنس پلی استر پوشش دار؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.



تصویر ۷. اپرای سیدنی از اوتزن؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

در طول دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی متریال‌های دیگری در شکل دهی به فرم‌های ساختاری غیر از بتن سنگین ضروری بودند. ساختارهای انعطاف پذیر بافت محور توسط کابل‌های فشاری یا فشار تورم در جای خود نگاه داشته می‌شدند. آثار بصری «باک مینیستر فولر» [Buck minister Fuller] و فری اتو [Frei Otto] توانستند برخی از هدفمندترین نقشه‌ها را به واقعیت تبدیل کنند. فری اتو کار خود را با ساختارهای تمام فشاری از طریق آویزان کردن مدل‌های زنجیری آزمایش کرد تا فرم‌های انرژی حداقلی را تعریف کند. سپس این فرم به یک ساختار فشرده بهینه تحت بار های متحدالشکل معکوس شد. یک نمونه معماری که این اصل را توصیف می کند، در فرم ساختار مشبکِ الواری برای فستیوال باغ مانهیم [Mannheim] دیده می‌شود که مطابق با تکنیکی که بالاتر اشاره شد، طراحی شده بودند. وقتی این فرم معکوس گشت، ساختار مسلسل با فشرده سازی خالص تحت وزن خودی، حاصل گشت ((Kahn, P.H. jr. (1997).

۴- بیان یافته‌های تحقیق

در ادامه به اهم یافته‌های تحقیق اشاره می‌شود.

۴-۱ تطابق نیروها در طبیعت و بیومکانیک معماری

تکنولوژی عظیم برای میلیون‌ها سال در حال کار بوده است و برای این که ساختارهای طبیعی با نیروهای فیزیکی مختلف، مانند فشار کششی، برش و پیچش، سازگار شوند، سیال، زودگذر و به زیبایی متعادل شده، و فناوری آنها پویا، سبک وزن و کارآمد گشته است. مورد آخر، که خصوصیت مهمی از ساختارهای طبیعی است، از طریق انتقال مقدار مورد نیاز از نیروها با استفاده از کمترین مقدار مواد به دست می‌آید. در حول رشد و فرم، «دی آرسی تامسون» [D'Arcy Thompson]

ادعا می‌کند که شکل موجودات زنده عموماً حاصل «مطابقت با نیروهای فیزیکی است، و حاصل رفتار و رژیم غذایی نیست، به آن صورتی که بسیاری از زیست شناسان آن زمان باور داشتند». با توجه به اینکه قیدهای موجود در حوزه‌های فن‌آوری بسیار کمتر از قیدهای گذاشته شده، بر مواد بیولوژیک است تکنیک های ساخت بسیار متنوعی توسعه یافته است. در نتیجه فرآیند ساخت تکنولوژیک غالباً با دما و فشار بسیار بالا و تنوع وسیعی از مواد همراهند تا فرآیندها تولید آغاز گردد. از این رو اینک هزاران هزارماده مصنوعی موجود در بازار برای استفاده مهندس طراح مهیاست. به منظور تقلید از طبیعت، بشر ساخت مواد مرکب را آغاز کرد که شامل یک ماتریکس (ماده زمینه‌ای) و تارهای تقویت‌کننده بود. با این وجود، باز هم فرآیندهای ساخت تکنولوژیک برای این نوع ماده در فازهای مختلفی طراحی شده، در حالیکه روش طبیعت برای اینگونه مواد پردازش «همزمان» فازهای مختلف آن است. نکته مهم اینکه فقط در این سی‌سال اخیر است که انسان به ساخت مواد کامپوزیت (مرکب) به تقلید از طبیعت روی آورده است، در حالی‌که تا قبل از آن مواد ساخته دست بشر، مواد همگن (مانند فولاد) بوده است. سیستم‌های بیولوژیک سرچشمه ای غنی برای دانشمندانی است که به دنبال ساخت مصالح و فرآیندهای جدیدی هستند، مثلاً سیستم‌های بیولوژیک الهام‌بخش تکامل رشته‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی بوده‌اند (Li, F-F., VanRullen, R., Koch, C. & Perona, P. (2002)). در سیستم‌های بیولوژیک بسیار زیادی سلول‌های عصبی ناکامل و با عملکرد کُند می‌توانند محاسبات پیچیده‌ای را انجام‌دهند. این سیستم‌ها پردازش اطلاعات را بطور «موازی» دنبال می‌کنند، در حالیکه مشخصه پردازشگرهای متعارف، یعنی «کامپیوترهای نسل جدید»، اطلاعات را بطور متوالی پردازش می‌کنند و این کامپیوترها قادرند به میزان ناچیزی در برنامه ریزی مطالعه خواص ساختار میکروسکوپی مصالح بیولوژیک، الهام‌بخش مجموعه وسیعی از مواد تکنولوژیک مصنوعی باشند. مثلا آشکار است که این مواد دارای پیچیدگی مورفولوژیک وسیعی هستند و عملکرد مکانیکی با کیفیت بسیار بالایی را فراهم می سازند. از این‌رو مرکز توجه شامل کنترل اندرکنش بین اجزا این نوع مواد، نظیر آمینواسیدها و پلی ساکاریدها می‌باشد که در ترکیب مواد بیولوژیک باعث خواص بسیار متنوعی از قبیل خواص پوست و رباط نرم و قابل کشش تا خواص صلب پوسته لاکی شده حشرات و گیاهان می‌شوند. معمولاً مواد بیولوژیک که نرم و کشش‌پذیر هستند، در مقابل شکستگی و یا پارگی بسیار مقاومند. این تمایل به دوباره جهت‌یابی ذاتی در فیبرهای کلاژن و الاستین موجود در آنها در زمان وقوع تغییر شکل نسبت به وضعیت تغییر شکل نیافته است (مثل پوست). افزون بر این مکانیزم متوقف‌کننده ترک که بازدارنده شکستگی است، به کمک این دوباره جهت‌یابی فیبرها در نوک ترک تقویت می‌شود، که این امر ناشی از تنش‌ها و تغییر شکل‌های بسیار شدیدتر در آن ناحیه است. ضمنا فیبرهای کلاژن و الاستین در امتداد عمود بر نوک ترک کشیده می‌شوند، تا وضعیت از لحاظ تنشی هموارتر و ایمن‌تری شده و این امر با مجموعه‌ای از فیبرهای

جدید که باید پاره شوند همراه است، به شرط اینکه ترک بخواهد پیشروی کند (Mansoorian، Alireza & heidaryan، 2004 .Fatemeh).

۲-۴ اعضای کششی در طبیعت و بیومکانیک معماری

فرم‌های طبیعی برای این که با کارآمدی مطابق شده و آن را افزایش دهند، اعضای کششی را ترجیح می‌دهند زیرا اعضای دارای فشار تمایل به خم شدن دارند. با استفاده از حداکثر مقدار کشش، اعضا فشار را درون نواحی داخلی متمرکز می‌کنند. ساختارهای ساخت بشر مانند حفاظ‌ها[ی صدفی] و چادرها بازدهی حداکثری ایجاد می‌کنند. برخی نمونه‌های معماری که کارآمدی را در طرح‌های ساختاری بیان می‌کنند، شامل استادیوم المپیک فری اتو [Frei Otto] در مونیخ، آلمان است که در آن شبکه‌های سیم فولادی در کشش هستند و دیرک‌های عظیم فولادی متحمل فشار می‌شوند. نمونه دیگری از کارآمدی [بازدهی] ساختاری، در طرح سانتیاگو کالاتراوا برای بام یک سالن چندمنظوره در سولار [Sular] سوئیس است، با کابل‌هایی فشاری که به درون پنل‌های سقفی منحنی وارد می‌شوند و این کابل‌ها توسط نقطه‌ای با تمرکز حداکثری به یکدیگر متصل شده‌اند. در طرح بام خود برای کارخانه جیکم [Jakem] با تکیه بر اصل باز رخداد، کالاتراوا به کارآمدی ساختاری دست یافت که با اصول یافته‌شده در طبیعت مشترک است. اعمال یک ساختار منحنی فولادی این را بیشتر تحریک نمود تا جایی که این ساختار تابع خطوط نیروی تراس‌های مثلثی است (Tischhauser, A. & Von Moos, S. (1998)).

اقتصاد خصوصیت مهم دیگری از طرح‌های ساختاری در طبیعت است. ساختارهای پربازده [کارآمد]، در صرفه‌جویی در متریال‌ها اقتصادی می‌باشند و لزوماً در مجموع اقتصادی نیستند. اگر ساخت و ساز ساختارهای بشرساز مشکل باشد، می‌توانند هزینه بر باشند. حفاظ‌های بتنی باریک، برای مثال، پربازده هستند اما معمولاً به سبب تلاش دخیل در آنها پرهزینه می‌باشند. به‌علاوه، ملاحظات اقتصادی بسته به تنظیمات اجتماعی- زمان و مکان خاص- هستند. هزینه کارها ممکن است از مکانی به مکان دیگر، و از عصری به عصر دیگر متفاوت باشد. متغیرهای دیگری مانند تجربه‌ی پیمانکار و کارگران، بر هزینه‌ی یک ساختار موثرند. در مجموع، معمار باید برای ساختارهای پربازده بکوشد، اما در نظر داشته باشد که فاکتورهای اقتصادی ممکن است دگرگونی طرح را التزام کنند. توجه به فرم‌های ساختاری مهندس «رابرت مایلارت» [Robert Maillart] (۱۹۴۰-۱۸۷۲) ارزشمند است. اگرچه معمار نیست، طرح‌های نوآورانه ساختاری‌اش در طرح ساختاری و مفاهیم معماری بتن آرمه‌ای به‌عنوان متریال عمده ساختمان برای ساخت و ساز مشارکت عظیمی داشته است. گرچه چند طرح پل در سرزمین مادری خود سوئیس داشت، اما مشارکتش در طرح ساختاری در ۱۹۰۸ انجام شد، هنگامی‌که تَختال قارچی را اختراع کرد. در این شیوه، «کنث فرامپتن» [Kenneth Frampton] بیان می‌کند ((Jodidio, P. (2001)):

«ستون‌ها، تیرها و کف‌ها به‌عنوان واحدهای جداگانه مانند ساختارهای الواری یا فولادی شناخته نمی‌شوند، بلکه ستون به طور ارگانیک از درون تَختال کف بدون تیر عبور می‌کند، ساختار حاصلی که به شکل «ستون قارچ شکل» تکامل یافت و بسیار بیانگر جهان طبیعت است.»

و می‌افزاید:

«این سیستم ساختاری یک ساختار عملی متحدالشکل را نمونه‌سازی می‌کند که پرونده ساخت و ساز اقتصادی در استفاده از متریال‌هاست، و نیز دست انعطاف را در اجرا باز گذاشته و کمک می‌کند تا طرحی سبک و ظریف با تضمین ایجاد شود».

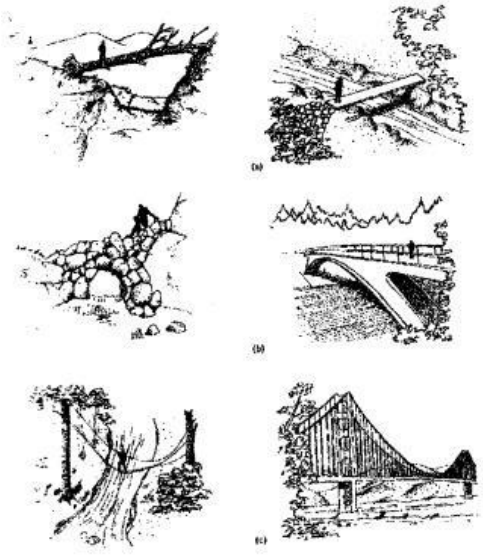
فرانک لوید رایت [Frank Lloyd Wright] بعدها فرم ساختاری «ستون‌های قارچی» یا «ستون‌های درختی» را در طرح خود برای برج آزمایشگاه برای جانسن و سان .S.C در ۱۹۴۹ اتخاذ کرد. این ستون‌های باریک که از بتن آرمه بافت فولادی ساخته شده بودند و در پایه به شکل مخروطی در آمده بودند، ساختمان را نگه می‌داشتند. «جنگل قارچ‌ها» وقتی که چیدمان بندی شد، سیستمی را ارائه داد که به‌عنوان پای ستونی که از بالا به پایین توزیع شده است عمل می‌کرد که باعث می‌شد بارهای عمودی کف‌های نگه داشته شده، در ایجاد تعادل به‌طور مساوی سهیم باشند و به‌ثابت نگه داشتن ساختار کلی ساختمان، مخصوصاً در هسته مرکزی کمک کنند. طرح نوآورانه رایت برای ستون‌ها از نظر تکنیکی موفق و از دید معماری خشنودکننده بود.

تصویر ۹. اتاق اصلی داخلی با ستون‌های قارچی، نما از پایین شرکت واکس جانسن [Johnson] در ۱۹۴۹، ماخذ: آرشیو نگارندگان.

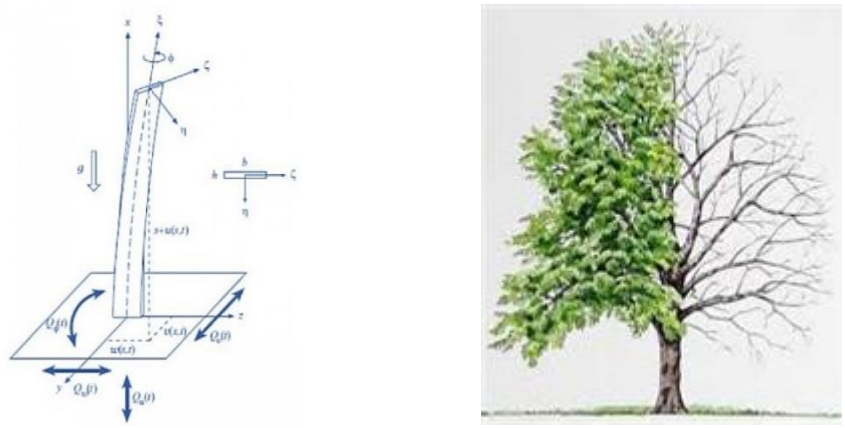
۳-۴ فشار، کشش، برش و پیچش در طبیعت و بیومکانیک معماری

همان‌طور که در طبیعت این وجود دارد، ساختارها بر فرم‌های بشرساز و نمونه‌های فراوان اعمال شده‌اند. پل‌ها نمونه‌های معمول ساختارهای یافت شده در طبیعت هستند: پل دیرکی که توسط یک درخت افتاده ایجاد می‌شود؛ پل کمانی ایجاد شده توسط فرسایش سنگ‌ها و پل معلق تشکیل شده با انواع گوناگون تاک. این سه نوع از اصول ساختاری برای هزاران سال نامتغیر مانده‌اند. هر فرم زنده و غیر زنده‌ای ساختار دارد. هدف یک ساختار این است که نیروها را به پایه‌های مستحکم،

معمولاً زمین، انتقال دهد. برای درختان، پل‌ها، ساختمان‌ها و سایر فرم‌ها، چه طبیعی و چه مصنوعی، این گونه است. نیروهایی که روی ساختار عمل می‌کنند، پنج نوع از نیرو را تولید می‌کنند: فشار، کشش، برش (بریدن) و پیچش ((Frazer, J. (1995a).



تصویر ۱۰. سه نوع اصل ساختاری که در طبیعت یافت می شود و اعمال آنها در ساختارهای بشرساز؛ ماخذ: سنوشیاین، ۱۳۹۳.



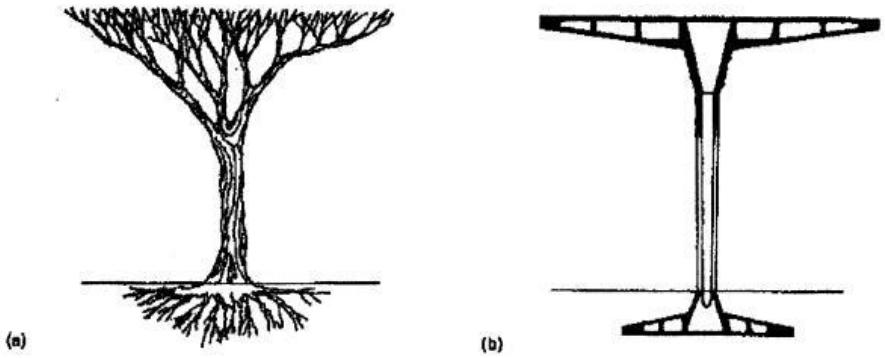
تصویر ۱۱. تحلیل ساختار درخت؛ ماخذ: نگارنده

سنوشیان در کتابش با عنوان بیوآرکیتکچر [معماری بیونیک]، درخت را به‌عنوان مثالی برای هر پنج نیروی فعال انتخاب کرده است که توضیح می‌دهد ((Kahn, P.H. (1997):

«سطح بالایی بافت‌های چوبی در شاخه‌ها کشیده می‌شود. گرانش شاخه‌ها را به سمت پایین می‌کشد درحالی‌که که بافت‌ها در سطح پایین‌تر فشرده می‌شود. هنگامی که جاذبه شاخه‌ها را به سوی خود می‌کشد، درون چوب انعطاف ایجاد می‌شود؛ وقتی باد آن‌ها را خم می‌کند، پیچش تولید می‌شود. نیروی برش نیز حین حرکت بین فیبرهای چوبی حاصل شده، که این حرکت را شاخه‌ها و تنه با تاب خوردن در باد سبب می‌شوند.»

سنوشیاین اضافه می‌کند که:

با اتکا بر قوانین طبیعی تعمیم نیرو در یک درخت، نیروها (وزن) بالاترین شاخه‌ها (کوربل- corbel) به سمت پایین انتقال داده می‌شوند، و تا زمانی که به تنه (ستون فقرات) برسند افزایش می‌یابند، که این نیروها را به سمت پایین انتقال می‌دهد (فشار)، و تا وقتی که به زمین برسد افزایش می‌یابد. پس از آن، این نیروها (وزن) از طریق ریشه‌ها (پایه) به داخل زمین انتقال داده می‌شوند.



تصویر ۱۲. چیدمان شاخه ها، انشعابات؛ ماخذ: محمودی‌نژاد: الف، ۱۳۹۹، ص ۱۸۵

همانند طبیعت، میزان و شدت نیروها اثر بی‌نظیری روی فرم‌های بشرساز (معماری) می‌گذارد. ساختارهایی مانند ساختمان‌های بزرگ نیروهای کلانی را ایجاد می‌کنند که باعث ساخت و سازهایی می‌شود که وسیعاً سازمان‌دهی شده‌اند تا آن نیروها را با متریال نگه‌دارنده فشرده تعادل‌دهد. البته کشش وجود دارد، اما در بیشتر فرم‌های ساختمانی این‌قدر واضح یا مبیّن نیست. باوجود چند استثنای قابل توجه، نیروهای کشش در بازی‌ای که فشار بر آن چیره هست، یک شخصیت مخفی می‌مانند، اما می‌توان آنها را در سطوح متفاوت یک ساختار فعال دید. کشش و فشار عناوین معمولی هستند که استفاده می‌شوند تا جهت‌گیری نیروهای درون واسط پیوسته‌ای از یک فرم را شرح می‌دهند. رابطه‌ی بین نیروهای کششی و فشاری اساس همه عملکردهایی را فرم می‌دهد که ثبات فرم و ساختار را تشریح می‌کنند. توازن یک ساختار الزام می‌کند که چیدمان نیروها ثابت باشد، یعنی تعامل نیروهای کشش و فشار، حتی تحت تأثیر نیروهای خارجی که روی فرم آن عمل می‌کنند، رابطه‌ی ثابتی می‌ماند. بزرگی نیروهایی که روی ساختار موازن عمل می‌کنند توسط جرم کلی ساختار و هر نیروی اضافی ای که ممکن است مفعول آن باشد، تعیین می‌شود ((Atran, S. (2002).

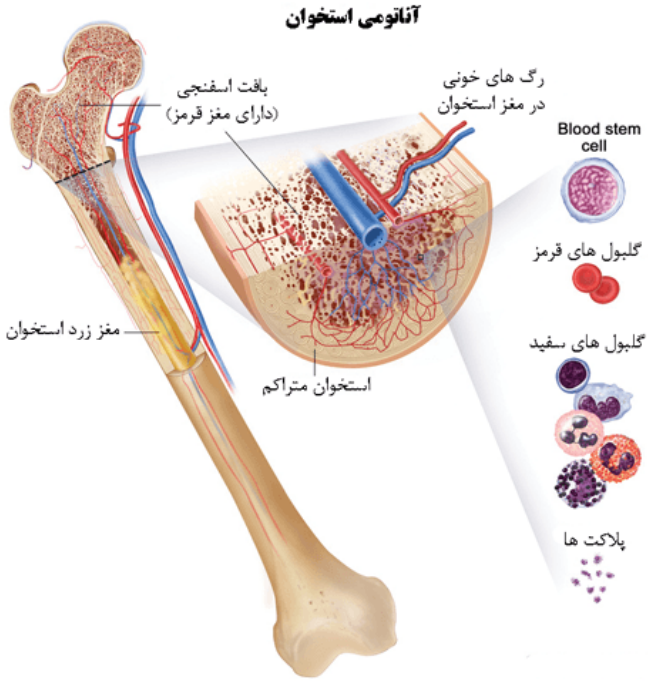
در کل، ساختارهایی که تحت نیروی فشار هستند کوتاه و ضخیم‌اند. به‌منظور تحمل وزن زیادش، ستون‌ها، چیزی مانند پاهای یک فیل، از نقطه‌ای روی بدن نزدیک به مرکز گرانش آن به طور عمودی به سمت بیرون متمایل می‌شوند. بالعکس، ساختارهایی که از کشش استفاده می‌کنند باریک و حساس هستند، مانند تارهای عنکبوت. این ساختارها می‌توانند وزن بیشتری را با مواد کمتر تحمل کنند. به‌منظور نمایان ساختن این اصل، نمونه‌ای توسط آگویلار سنوشاین ارائه شده است:

«اگر ما حشره‌ای را تصور کنیم که بسیار بزرگ‌تر از آنچه که در دنیای واقعی است رشد می‌کند، پاهایش باید کوتاه تر و ضخیم تر باشند تا با افزایش وزن آن همخوانی داشته باشند؛ بال‌های او نیز باید اصلاحاتی بپذیرد. اگر یک فیل اندازه اش کاهش یابد وزنش کمتر خواهد بود و دیگر به چنین پاها و کف پاهای ضخیمی برای تحمل آن نیاز نخواهد داشت».

در قلمرو معماری، یک جنبه کلیدی در شکل‌دهی به درک ما از فرم ساختاری این است که تقدم گرانش یک نتیجه گیری تمام شده نیست، مخصوصاً در ساختارهای طبیعی. دی آرسی تامسون مشاهده کرد که در مورد فرم سوسک آبی، گرانش کم‌اثرتر از نیروهای کشش سطحی آب است. مهم‌تر از آن، این ایده و مفهوم، مقیاس چارچوب را فراهم می‌کنند که درون آن می‌توان دقیق تر علم فرم ساختاری را تعریف کرد. در مقیاس بزرگ یک ساختمان، نیروی گرانشی نقش مقدم خود را در شکل‌دهی به رفتار ماده به علت جرم اصلی ساختمان تحمیل می‌کند. طبق گفته‌ی تامسون (Brengman, M. (2002)):

«گرانش هم بر بدن و هم ذهن ما اثر می‌گذارد. ما این را به درکمان از عمود، دانش خود از بالا و پایین، درکمان از سطح افقی که رویش می‌ایستیم، و کشفی که حول ابعاد آن کردیم، و همان طور که به هم مرتبط اند به بعد عمودی نیز مرتبط هستند، مدیونیم؛ گرانش بود که به ما آموخت تا به فضای سه بعدی بیندیشیم. معماری ما توسط گرانش کنترل می‌شود، اما گرانش اثر کمتری روی معماری یک زنبور دارد؛ اگر یک زنبور به‌جای سه بعد به فضا چهار بعد نسبت دهد، حتی ممکن است تحسین شود!»

در طبیعت، تمام یک فرم اذعان می‌کند که نیروها همیشه در نوعی از توازن به سر می‌برند. کشش‌های داخلی با یکدیگر برای ایجاد یک پیکربندی ثابت تعادل داده می‌شوند. بدن انسان یک نمونه طرح در تعادل پویاست. اسکلت ساختار داخلی بدن است، که پایه آن ستون فقراتی است که متکی به پالیز است. همه‌ی ساختار کنار هم نگه داشته شده است و توسط سیستم عضلانی حرکت می‌کند: رباط‌ها، غشاءها، تاندون‌ها و عضلات- تمام یک شبکه در کشش. تقریباً استخوان‌ها در هر دو انتها انعطاف‌پذیر و در وسط سفت هستند. نیروها با استفاده از الیاف های داخلی توزیع می‌شوند که از نظر سازگاری از نرم به سخت گوناگون‌اند- آنها به بعضی از حیوانات اجازه می‌دهند که حین این که عضلات و تاندون‌ها کشیده و استخوان‌ها تحت فشار هستند، حرکت انجام دهند. ساختاری که سفت است آسان‌تر از ساختاری که انعطاف‌پذیر یا کشسان است، شکسته می‌شود. ساختار استخوان می‌تواند به طور فعال نیروها و کشش بارهای پنهان و شدید را هدایت کرده یا در مقابل آنها مقاومت نماید. این بارها در ایجاد شکل نهایی‌اش مشارکت دارند. می‌توان گفت، حدود ساختار استخوان با فرم‌هایی که آرایششان توسط جهت‌گیری و شدت نیروها و کشش‌ها تولید می‌شود، تعیین می‌شود. در برخی موارد، یک استخوان شکل از پیش تعیین شده‌ای دارد، اما در کل طول حیاتش مطابق با همان فرم نمی‌ماند (محمودی نژاد: ب، ۱۳۹۹، ص ۱۲۳).

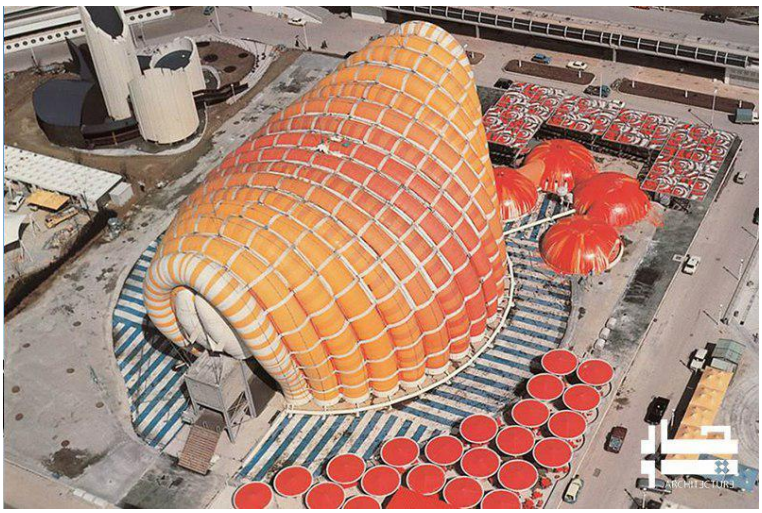


تصویر ۱۳. استخوان ران. توزیع فیبرها در هر دو انتها انعطاف لازم را به استخوان می‌دهد؛ ماخذ: آرشیو نگارنده

۴-۴ ساختار پنوماتیک و بیومکانیک معماری

در طبیعت فرم‌های بسیاری از گوی‌های کوچک (ساختارهای پنوماتیک) ساخته شده‌اند. ریزگوی‌ها مانند حباب صابون در آب عمل می‌کند، با لایه انعطاف‌پذیر سازگار و مقاومی حول یک محتوای آبی یا گازی. هر سلول حیوانی یا گیاهی ساختاری پنوماتیک است که از غشاء پروتوپلاسم ساخته شده است. یکی از ویژگی‌های اساسی مایع‌ها کشش سطحی است، که قدرت آن به حباب‌های معمولی شکل می‌دهد. وقتی حباب سطح حداقلی را دارد، شکل آن حاصل دارای حداقل مقدار ماده می‌باشد. به‌جز مقاوم بودن، این ساختارهای سبک و انعطاف‌پذیر به قالب پذیری زیادی می‌رسند. مطابق گفته‌ی سنوشیاین، ما می‌توانیم خودمان را ساختارهای پنوماتیکی در نظر بگیریم که نسبت به سوراخ شدن توسط اشیاء تیز آسیب پذیریم. نمونه‌های دیگر چنین ساختارهایی در سیستم‌های هدایتی گیاهان یافت می‌شود: در احشا به طور کلی (مشیمیه، روده‌ها، قلب، معده، شش‌ها)؛ در میوه‌های نرم مانند انگور، گوجه فرنگی، دانه‌های ذرت، سفیده تخم مرغ یا تخم های نرم خزندگان و حشرات. در قورباغه‌هایی که گلویشان را باد می‌کنند، هوا به‌عنوان عنصری از فشار عمل می‌کند که درون غشاء با کشش عمل می‌کند. پس استفاده از هوا به‌عنوان یک متریال ساختاری تازه نیست. در زندگی روزمره ساختارهای پنومتیکی وجود دارند که در آن‌ها هوا درون یک پوسته‌ی مقاوم و محافظ مانند یک پوشش، وزن سنگینی را نگه می‌دارد. بادکنک‌ها، توپ‌ها و سایر مواردی که با هوا باد می‌شوند از این دسته‌اند. پوشش پنومتیک، پنوما [pneuma] واژه یونانی به معنای ریه- همیشه نرم است. سلول‌های اصلی چوب و استخوان در واقع نرم هستند اما در برگیرنده‌ی متریال سفتی

مانند مواد استخوانی یا سلولزی هستند، که تبدیل به ساختارهای پنوماتیک سفتی می‌شوند که می‌توانند خود را تحت فشارهای معینی نگه دارند (G. Canevaa, A. Pacinia, L. Celesti (Grapowb, S. Ceschina (2012).



تصویر ۱۴. غرفه فوجی، یوتاکا موراماتا، ۱۹۷۰. ماخذ[1]: اینترنت

در حوزه معماری مصالح خلاقانه و دانش جدید سبب کسب تجارب بیشتر در طراحی و سازه شده است. ریچارد باکمینستر فولر در سال های ۱۹۵۰نسل جدیدی از معماران و مهندسین را در عصر جدید پرورش داد. حباب هایی که در دلالت های ضمنی متعددشان (سبکی، شفافیت، کاربرد، برابری، تفاوت) از مشخصات دهه ۱۹۶۰ است محیطی که در آن تفکر آزاد ترویج داده شده و سبب کاربرد سازه‌های پنوماتیک (بادی) برای شکل دادن به محیط شده است. با این حال در این دوران به سبب محدودیت‌های مالی و موانع فنی زیرساخت‌های سازه بادی به تدریج رو به زوال رفت. از جمله کسانی که در دهه‌های شصت و هفتاد به دنبال کشف معماری پنوماتیک بودند، «آنت فارم» یکی از چهره‌های مشهور بود که پروژه‌های بسیاری پیرامون باد و پلاستیک ارایه کرد. همکار آمریکایی وی، «جرسی دویل» در اوایل دهه هفتاد به جستجوی سازه‌های معماری پنوماتیک پرداخت که در بافت شهری آزادانه برجسته بودند همانند سفینه فضایی افراد بیگانه که بر روی شن، شیشه و چمن فرود آمدند (Joye, Y. & Van Loocke, Ph. (2007a)).

۵- نتیجه‌گیری و جمعبندی

تقریباً در اوایل دههٔ ۷۰ میلادی، جامعهٔ بین‌المللی واژه بیومکانیک را برای دانش مطالعه سیستم‌های حیاتی از دید مکانیکی انتخاب نمود. بیومکانیک از ابزار مکانیک برای مطالعات آناتومیکی و بررسی کارکرد اندام حیاتی استفاده می کند. این علم طیف گسترده ای را از مطالعه تئوری تا کاربردهای عملی می پوشاند. مطالعه کامل مکانیک شامل دو موضوع اساسی می‌باشد: استاتیک، که مطالعه

[1] www.earthstaion9.com/idex.html?1970_osa.htm

اجسامی است که، در اثر نیرویی که بر آن‌ها اعمال می‌شود، در حال سکونی یا وضعیت تعادل باقی می‌مانند و دینامیک، که مطالعه اجسام متحرک است. دینامیک را به نوبه خود می‌توان به زیر گروه‌های سینماتیک و سینتیک تقسیم‌بندی نمود. سینماتیک را می‌توان علم حرکت نامید، زیرا این علم، در مورد روابطی بحث می‌کند که مابین جابجایی‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها در حرکت انتقالی و دورانی وجود دارند. این علم با نیروهای درگیر کاری ندارد بلکه فقط به توصیف حرکت ناشی از آن‌ها می پردازد. سینتیک در مورد اجسام متحرک و نیروهایی بحث می کند که عمل می نمایند تا ایجاد حرکت کنند. برای روشن شدن این مطلب که مطالب مکانیکی فوق را چگونه در مورد بیومکانیک به کار می‌بریم، می‌توان به مورد زیر اشاره کرد: دیلمن (۱۹۷۱) سینماتیک و سینتیک حرکت تاب خوردن پا را در طول دویدن، مطالعه کرد. در حالی که، پلانتنگوف (۱۹۸۳) روش مطالعه دینامیک را با استفاده از یک کامپیوتر پیشنهاد نمود. در رابطه با تکنیک‌ها و مهارت‌های ورزشی، بیومکانیک باین شرح تعریف می‌شود: بیومکانیک علمی است که با بکارگیری قوانین فیزیک و مکانیک در حرکات ورزشی و فعالیت‌های روزمره انسان تجزیه و تحلیل عمل و عکس‌العمل نیروهای داخل و خارجی و تاثیرات نهایی این نیروها بر بدن انسان صحبت می‌کند. «الهام از طبیعت» و «تقلید» از آن به مثابه برترین مرجع تقلید همواره سودمند است و موجبات بسیاری از ابداعات را فراهم می آورد، چنانچه در طول تاریخ بشر نخستین، با نگاه و شهود در طبیعت توانسته به مهمترین اکتشافات خود دست یابد و در واقع از دیدگاه نگارندگان دست به هیچ اکتشاف و خلقی نزده، مگر آنکه نمونه بارز آن در طبیعت موجود باشد. بشر می تواند پاسخ بسیاری از سئوالاتش را از طریق «تجربه، آزمایش و تحقیق و خلق فرضیات جدید» پیدا کند. اما در کنار این‌ها شاید طبیعت بهترین مرجع برای یافتن این پاسخ‌ها باشد. جهت تبیین دیدگاه نسبت به الگوبرداری، تعریف الگو و شناخت انواع الگوها ضروری است. اجزای عالم به شکل الگو دریافت می شوند. بعضی از این الگوها یکسان و ثابت اند بعضی نظم و قاعده بالایی دارند بعضی دیگر به طور اتفاقی شکل می‌گیرند. در تشخیص الگوها دو عامل طبیعت و خلاقیت انسان تعیین‌کننده هستند. در واقع می‌توان الگوهای طبیعت را بعنوان راهنمایی برای ارتقاء کیفیت ساخته‌های انسان و ابزاری جهت خلاقیت بکار برد. مهمترین جنبه الگو برداری و قیاس نقش خلاقانه‌ای است که در خلق ایده های جدید ایفا می کند. ادراک ما نسبت به محیط پیرامونمان به حواس ما بستگی دارد. اندازه فیزیکی و محدودیتهای فیزیکی مارا در درک محیط محدود می‌کند. با پیشرفت علم و تکنولوژی و اختراع ابزار و تجهیزات مختلف، بر میزان ادراک ما نسبت به محیط اطرافمان افزوده است. یکی از شیوه‌های بیان الگوها، بکارگیری روابط عددی و ریاضیات نهفته در آنهاست. و دیگری الگوبرداری از فرآیندهایی که الگوها را بوجود آورده اند. ما صرفاً مشاهده‌کننده الگوهای طبیعت نیستم، بلکه آفریننده آنها نیز به نوعی هستیم. چه به‌طور ناخود-آگاه در زندگی روزمره و چه به‌طور آگاهانه به‌عنوان طراح و برنامه‌ریز. منظور از الگوبرداری از

طبیعت این نیست که ساختمان‌ها به فرم و صورت ارگانها و الگوهای طبیعی ساخته شوند، بلکه مهم شناخت ذات طبیعت و قوانین حاکم بر ساختار سامانه‌های طبیعی است که می تواند در سامانه‌های معماری به کار رود. در طبیعت ارگان‌ها بر اساس نیروهای درونی (ذاتی) و نیروهای بیرونی (کالبدی و محتوایی) شکل می‌گیرند. بهترین نوع الگوبرداری از طبیعت در معماری می تواند شکل‌گیری آثار معماری بر اساس نیروهای درونی (گونه‌شناسی بناها) و نیروهای بیرونی: شامل عوامل کالبدی (اقلیمی و جغرافیایی، عوامل فیزیکی) و عوامل محتوایی (فرهنگ، جامعه، مذهب، سنت) باشد. استفاده صرف از اشکال ارگانیسم‌های طبیعی صرفاً یک تقلیدی ظاهری و سطحی و بدون درنظرگرفتن فرآیند شکل‌گیری ارگانیزم و نیروهای بدون بوجودآورده آن است و نمی‌تواند الگوبرداری صحیحی ازطبیعت باشد به عبارت دیگر در الگوبرداری از طبیعت، مهّم این است که به‌دنبال معانی و ابعاد متافیزیکی طبیعت باشیم نه صورت و شکل آن را محوریت تقلید و محاکات قرار دهیم. سازه، قدرت ایجاد مقاومت در مصالح و منظومه‌ای از عناصر ساختمانی بهم پیوسته است که در مقابل بارهای مرده و زنده مقاومت کرده و آن‌ها را به زمین منتقل می‌کند. سازه الزاماتی دارد که شامل تعادل، مقاومت، پایداری، قاعده، توجه به خواص مصالح، تبعیت از مسیر نیرو و هندسه است. ساده‌ترین راه توصیف عملکرد یک سازه این است که سازه قسمتی از بناست که در برابر بارهای وارده مقاومت می‌کند. سازه همواره یکی از اجزاء ضروری معماری بوده و هست. انسان از ابتدا همواره ناگزیر از به کار بردن مقادیر معینی از مواد خاص برای شکل دادن به آنها بوده است تا بتواند ساختار معماریش را در برابر نیرو جاذبه زمین و سایر بارهای خطرناک ایستایی بخشد. اما از آنجایی که حس زیبایی از ابعاد فطری انسان است، همواره بر سازه شرایط سخت تری را نسبت به شرایط استحکام و اقتصاد تحمیل گردیده است و هدف اصلی از سازه محصور کردن فضا و حفاظت آن از عوامل طبیعی و تامین فضای لازم برای فعالیت افراد، و مقاومت در برابر نیروهای جانبی است. فرم یک سازه نیز مستقیما تحت تاثیر نقش آن در ایجاد و تعریف یک فضای معماری قرار دارد. هدف اصلی در طراحی معماری ایجاد فرم‌های ساختمانی است که هم نیازهای عملکردی را پاسخگو باشد و هم از جنبه های زیباشناسی و اقتصادی موفقیت داشته باشند. و هدف اصلی طراحی سازه ایجاد فرمهای سازه ای است که ضمن تحقق نیازهای عملکردی، نیروهای وارده را به بهترین و مطمئن‌ترین نحو تحمل نمایند. به‌طورکلی «طراحی و ساخت هر نوع سازه مبتنی بر سه شرط اساسی است که عبارتند از تعیین هدف نهایی، تعیین نیازهای اصلی و فرعی و انتخاب مصالحی که برای به انجام رساندن و تحقق یک اثر هنری کامل ضروری است»؛ چرا که فرایند به‌تصویر کشیدن یا تصور یک سازه خود نوعی هنر است. و اساسا این خود نوعی الهام است، از تجربیات درونی یک مهارت فطری و یک حس ذاتی؛ به قول «ادوارد تروجا» روند تجسم یا تصور سازه یک هنر است که به‌طور اساسی به وسیله تجربه درونی و درک مستقیم حاصل شده است و هرگز نتیجه ای صرفاً استدلالی

و قیاسی نمی‌باشد و یا به قول «آ. دوریک میلز» تکنولوژی ساخت شاخه ای از علم است ولی به شکل در آوردن آن هنر می‌باشد. توسعه علوم معماری و سازه‌ای در زمان معاصر، تخصصی شدن آنها را الزامی می‌کند. ولی این تخصصی شدن موجب شده که متخصصین هر یک از این رشته‌ها به میزان لازم در رشته دیگری تبحر نداشته باشند و فاقد دانش جامعی باشند که برای ایجاد یک بنای شایسته لازم است. در صورتی که بنا صرفا مبتنی بر سازه باشد، ساختمان تحت تاثیر زیبایی‌شناسی سازه‌ای قرار می‌گیرد نه برنامه زیبایی شناسی فضا. در واقع، ارتباط احساس معماری با سازه بصورت زیبایی شناسی سازه ای بروز می‌کند. و آنچه از برنامه فضا مورد توجه است عملکرد، یکپارچگی و وسیع بودن است و سایر ابعاد کیفی فضا توجه لازم نمی شود. به عبارتی بنا مبتنی بر زیبایی و بیان بصری سازه است که می تواند شامل سازه با عملکرد استاتیکی، سازه با خواص زیبایی شناسی فرم که بر اساس بیان تناسبات و هارمونی یا سازه با بیان مقیاس و یا سازه با بیان سمبولیک است. به طور کلی این نوع بیان سازه‌ای به نظم بین اجزاء، مقیاس صحیح سازه‌ای، بیان‌های نمادین و سمبولیک و کالبد سازه‌ای مقاوم همراه با زیبایی و حتی سازه‌هایی بر اساس ساختارهای زیست شناسی نیز توجه دارد. مراد از سازه‌گرایی این است که عوامل سازنده و پایدار نگاه دارنده ساختمان، در ساختن فرم معماری نقش تعیین‌کننده پیدا کند. معماری با سازه خویشاوندی نزدیک دارد و در اصل این دو پیوسته به هم بوده و از هم جدا نشدنی هستند. چراکه در صورت جدایی، استواری و زیبایی ساختمان درهم فرو خواهد ریخت و ضمن اینکه از ابتدای معماری همواره سودمندی، استحکام و زیبایی از ارکان اصلی معماری به حساب می‌آیند. شواهد بسیاری از این پیوند در معماری مصری، در معماری یونانی و در معماری ایرانی و در معماری گوتیک وجود دارد. در برخی بناها نیز بر عکس به ازادی فضا اندیشیده می‌شود که در آنها مصالح ساختمانی قدرتمند برای پوشش دهانه‌های کوچک به کار می‌روند. سازه پایین‌تر از حداکثر توان سازه اش به کار می‌رود. به عبارتی فرم سازه‌ای، فرم فعالی نیست و در نتیجه مشارکتی اساسی در ایجاد مقاومت ندارد که بیشتر در بناهای با بیان احساسی معماری به کار می‌رود. یکسانی فضا و سازه بر پایه کلیت هماهنگ و وحدت اجزاء تعریف می‌شود. هر ساختمانی تمایل به مطرح ساختن خود به عنوان یک کل دارد که در نتیجه آن گرایش به وحدت شکل می گیرد و فضا در کلی در نظر گرفته می‌شود که خواه ناخواه سازه هم با آن همراه است و سازه نیز در کلی نگریسته می شود که ناگزیر فضا هم در آن موجود است. هنگامی که کل تحت تاثیر عوامل اقلیمی، اقتصادی، فرهنگی سازه ای و... تعریف می شود، فضا و سازه در ارتباط با کل و بلافاصله در هماهنگی با یکدیگر و دیگر اجزاء تعیین می‌شوند؛ به عبارتی سازه یک جزء پیوسته با فضاست که در نتیجه، فضا و سازه و... با هم متحد بوده و یک چیز را بیان می‌کنند. زاویه اجزاست. فرایند طراحی معماری نیز به حکم ماهیت آن دارای سرشتی کل محور است. کلی که به اجزاء در جهت دست یابی به وحدت و یکپارچگی انتظام می بخشد. فرایند طراحی معماری با یک طرحمایه

ذهنی سه بعدی معمار که حاصل جمع‌بندی داده‌ها، محدودیت‌ها، پیش زمینه ذهنی و آینده نگری و خلاقیت معمار است، شروع می شود. به عبارتی فرایند طراحی ماهیتی راه حل محور دارد تا مسئله محور؛ بدین معنی که معمار طراحی را با پاسخ تخمینی شروع می کند و آنرا تا رسیدن به جواب نهایی مدام تحلیل، ترکیب و ارزیابی می‌نماید. اما گسترش روز افزون علوم و معماری، نیاز به ساختمانهای عظیم را سبب شده است که با توجه به گستردگی مسائل نیاز به همکاری سایر متخصصین را می‌طلبد. نکته مهم در فرایند طراحی نحوه دستیابی به کل یکپارچه با وجود تعدد عوامل و مولفه‌های شکل دهنده معماری است. به منظور دستیابی به این هدف، شناخت مفهوم کلیت معماری از سوی تمام متخصصین تاثیرگذار در شکل‌گیری بنا ضرورت دارد. و همچنین درک رفتار سازه‌ها از سوی معمار و همچنین آگاهی متخصص سازه از جنبه‌های مختلف معماری از جمله عملکردی، زیبایی‌شناسی و... اهمیت پیدا می‌کند. به‌عبارتی به منزله برقراری ارتباط بین این متخصصین نیاز به یک زبان مشترک بین آنها وجود دارد. و این امر با شناخت نسبی از حوزه تخصص دیگری می‌تواند حاصل شود. در این فرایند، معمار هنگام تحلیل ها و ارزیابی‌های خود از طرح همواره و در تمامی مراحل باید مسائل سازه‌ای و نظر متخصص آن را جویا شود. میزان زیبایی سازه‌ای طرح هم بسته به مشخصه سازه‌ای داشته و می‌تواند متغییر باشد. بدین منظور تمییز قایل شدن به بناهایی که مشخصه سازه‌ای دارند و بناهایی با مشخصه سازه‌ای پایین‌تر ضرورت دارد. در ساختمانهای کوچکتر می توان تا حدی از اصول طراحی سازه ای عدول کرد، ولی ساختمانهایی با حجم بزرگ حتماً نیاز به طراحی سازه ای مناسب دارند، چون سازه در این طرحها نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند و زیبایی بنا به شدت تحت تاثیر زیبایی سازه‌ای است. بنابر این به منظور دست‌یابی به اثر شایسته معماری هدفمند و یکپارچه، رهبری پروژه توسط معمار باید در جهتی باشد که طرحمایه ذهنی خود را همواره در تمامی مراحل اتود کردن و در نهایت انتخاب گزینه نهایی، با تحلیل، ترکیب و ارزیابی همه مولفه های شکل دهنده معماری به خصوص سازه پیش ببرد.

(*) اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است. (تعارض منافع به حالتی گفته می‌شود که منافع شخصی مادی یا غیرمادی نویسنده یا نویسندگان با نتایج پژوهش در تعارض باشد و این موضوع بر روند انجام پژوهش یا اعلام صادقانهٔ نتایج تأثیر بگذارد).

۶- منابع و ماخذ

۱. گلابچی، محمود و کتایون تقی زاده و احسان سروش نیا (۱۳۹۰) نانوفناوری در معماری و مهندسی ساختمان، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

۲. گلابچی، محمود (۱۳۸۲) سازه نظام دهنده و تعیین کننده فُرم در معماری، مجله معماری و شهرسازی، شماره های ۷۳-۷۴.
۳. گلستان هاشمی، سید مهدی (۱۳۸۰) سیستم حل مساله ابداعی و خلّاقیت و نوآوری نظام یافته TRIZ، مجله مدیریت، شماره ۵۹-۶۰.
۴. محمودی نژآد، هادی: الف (۱۳۹۹) عصب شناسی در معماری، تهران: هله.
۵. محمودی نژآد، هادی: ب (۱۳۹۹) معماری بیوفیلی، تهران: هله.
۶. محمودی نژآد، هادی: پ (۱۳۹۹) معماری بیولوژیک، تهران: هله.
۷. محمودی نژآد، هادی: ت (۱۳۹۹) هوش مصنوعی در معماری، تهران: هله.

8. Atran, S. (2002), Modular and cultural factors in biological understanding: an experimental approach to the cognitive basis of science. In Carruthers, P., Stich, S. & Siegal, M. (eds.), The Cognitive Basis of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 41-72.
9. Benyus, Janine (2002) Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Perennial.
10. Brengman, M. (2002), The Impact of Colour in the Store Environment. An Environmental Psychology Approach (doctoral dissertation). Ghent: Ghent University.
11. Cummins, D.D. & Cummins, R. (1999), Biological preparedness and evolutionary explanation. Cognition, 73, 37-53.
12. Davies, M. (1982), The embodiment of the concept of organic expression: Frank Lloyd Wright. Architectural History, 25, 34-36.
13. Feuerstein, G. (2002), Biomorphic Architecture. Human and Animal Forms in Architecture. Stuttgart/London: Edition Axel Menges.
14. Fischer, M.A. & Shrout, P.E. (2006), Children's liking of landscape paintings as a function of their perceptions of prospect, refuge, and hazard. Environment & Behavior, 38, 373-393.
15. Flake, G.W. (1999), The Computational Beauty of Nature. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
16. Frazer, J. (1995a), An Evolutionary Architecture. London: Architectural Association.
17. G. Canevaa, A. Pacinia, L. Celesti Grapowb, S. Ceschina (2012) The Colosseum's use and state of abandonment as analyzed through its flora, International Biodeterioration & Biodegradation 51 (2003) 211 – 219
18. Herzog, T.R., Kaplan, S. & Kaplan, R. (1982), The prediction of preference for unfamiliar urban places. Population and Environment, 5, 43-59.
19. Jencks, C. (2002), The new paradigm in architecture. New Haven & London: Yale University Press.
20. Jodidio, P. (2001), Santiago Calatrava. Cologne: Taschen.
21. Joye, Y. & Van Loocke, Ph. (2007a), Motivating biomorphic constructions based on complex systems science. Systems Research and Behavioral Science, 24, 103-114.
22. Kahn, P.H. jr. (1997), Developmental Psychology and the Biophilia Hypothesis: Children's Affiliation with Nature. Developmental Review, 17, 1-61.
23. Katcher, A. & Wilkins, G. (1993), Dialogue with animals: its nature and culture. In Kellert, S.R. & Wilson, E.O. (eds.), The Biophilia Hypothesis. Washington: Island Press, 173-197.

24. Kuo, F.E. & Sullivan, W.C. (2001a), Environment and crime in the inner city: Does vegetation reduce crime? Environment & Behavior, 33, 343-367.
25. Li, F-F., VanRullen, R., Koch, C. & Perona, P. (2002), Natural scene categorization in the near absence of attention. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 99, 9596-9601.
26. Mansoorian Alireza. TRIZ and Bionical Engineering as tools for Creative Problem Solving. 4th TRIZ Congress Europe. 2005.
27. Mansoorian ،Alireza & heidaryan ،Fatemeh. 2004. 40 Inventive Principles and Biological Models. September. TRIZ Journal.
28. Olgyay. Victor , Design With Climate: Bioclimatic Approach To Architectural Regionalism, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, Fourth printing, 1973.
29. Tischhauser, A. & Von Moos, S. (1998), Calatrava – Public buildings. Basel: Birkhauser.
30. Todorova, A., Asakawa, S. & Aikoh, T. (2004), Preferences for and attitudes towards street flowers and trees in Sapporo, Japan. Landscape and urban planning, 69, 403-416.
31. Tzonis, A. (1999), Santiago Calatrava. The Poetics of Movement. London: Thames & Hudson.
32. Ulrich, R.S. (1993), Biophilia, Biophobia, and Natural Landscapes, In Kellert, S.R. & Wilson, E.O.

چکـــــــیده لاتین

Zahra GanjaliBanjar- *Msc in architecture, Tehran Shomal Branch, Islamic azad university, Tehran, Iran*
Ali Behnam Vala- *Assistant Professor, Tehran Shomal Branch, Islamic azad university, Tehran, Iran*

Explaining the place of biomechanics in bionic architecture with emphasis on the works of Santiago Calatrava

Abstract

The word "biomechanics" consists of two parts "bio" and "mechanics" and means the application of mechanical principles in living organisms. In other words, biomechanics is the study of the structure and function of a living system using mechanical laws that can be used in architecture and structural system structures. Therefore, biomechanics can be studied in various human, animal and even plant branches such as architecture and interior or industrial design. The method of the current research is descriptive and analytical, which meta-analysis method is also used in summarizing the background. The data collection tool also included documentary and library studies.The findings of the research have shown that, in general, "the design and construction of any type of structure is based on the mechanical structures of nature (biomechanics) based on three basic conditions, which include determining the final goal, determining the main and secondary needs, and choosing the materials that are used for It is necessary to complete and realize a complete work of art"; Because the process of drawing or imagining a structure is a kind of art. And basically this is a kind of inspiration, from the inner experiences of an innate skill and an inherent sense; According to "Edward Troja", the process of visualizing or imagining a structure is an art that is basically achieved through inner experience and direct understanding and is never a result of mere reasoning and speculation.

Key words: *biomechanics, structure and architecture, Calatrava, biological structure.*