فرهنگ و زیست فناوری معماری

نشریه علمی فرهنگ و زیست‌فناوری معماری

تابستان ۱۴۰۲، سال ۳، پیاپی ۹

کاربست معماری بیومیمتیکس در پوسته‌های ساختمانی با الگوبرداری از اسکلت توتیای دریایی

زمان دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۱، زمان پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۳، زمان انتشار: ۱۴۰۲/۳/۲۳

کیانا مالکی[۱]- پژوهشگر دکتری طراحی محیط، دانشکده هنر، طراحی و معماری، دانشگاه استرالیای جنوبی، استرالیا.

دکتر کریس پتیت- استاد تمام طراحی محیط، دانشکده هنر، طراحی و معماری، دانشگاه استرالیای جنوبی، استرالیا.

دکتر یاور رستم‌زاده- استادیار گروه مهندسی معماری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

بشر مي تواند پاسخ بسياري از سئوالاتش را از طريق تجربه، آزمايش و تحقيق و خلق فرضيات جديد پيدا كند. اما شايد طبيعت بهترين مرجع براي يافتن اين پاسخها باشد. طبيعت همه پاسخ‌ها را دارد و این انسان‌ها هستند که به تدریج شیوه جواب گرفتن از طبیعت را می‌آموزند. از ابتدای قرن بیستم، سازه‌های بتنی با پوسته دوبل‌منحنی در طراحی معماری و ساخت‌وسازهای ساختمانی موردِ استفاده قرارگرفته‌اند. پوسته‌های یکپارچه به‌خاطر اینکه هندسه‌شان بارها را از طریق نیروهای غشایی انتقال می‌دهد، سختی بالایی نشان می‌دهند؛ اما این پوسته‌ها عمدتاً توسط سیستم‌های مشبکِ مقرون‌به‌صرفه‌تر جایگزین شده‌اند. ازآنجایی‌که سیستم‌های مشبک با قطعه‌های شیشه‌ای یا فلزیِ مسطح پوشانده می‌شوند، نه به بازده سازه‌ایِ پوسته‌های یکپارچه می‌رسند و نه ظرافت معماری‌شان در یک انحنای پیوسته جلوه می‌کند. پوسته توتیاهای دریایی بسیار سازگاریافته یک پوسته مدولی و چندصفحه‌ای را با طراحی انعطاف‌پذیر، منحنی، و همچنین هموارِ یک سازه یکپارچه ترکیب می‌کند. روش تحقیق توصیفی- تحلیلی و آزمایشگاهی است که برای کاربرد بیومیمتیکس در طراحی پوسته‌های ساختمانی استفاده شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که بازده سازه‌ای اسکلت توتیای دریایی و اصول آن می‌تواند برای نوآوری‌ها و ابداعات در علوم مهندسی و طراحی معماری به‌کار بسته شوند، درحالی‌که هم‌زمان می‌توانند برای تشریح سازگاری‌های زیستیِ بیولوژیکی استفاده شده و ساختمان پوسته توتیای دریایی با استفاده از تکنیک‌های عکس‌برداری مدرن و همچنین تأییدشده مثل میکروسی‌تی(۲μCT)، ذره‌بینی الکترونی ۳(SEM)، و تکنیک‌های متنوع تصویربرداریِ نوری موردِبررسی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: معماری بیومیمتیکس، آغازیان، توتیای دریایی، پوسته‌های ساختمانی.

[۱] مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۴۶۱+ ۲۰۳۳۸۷۶۷۸، رایانامه: kiana.m@nsw.ac.ir

[۲] X-ray micro-computed tomography- برش‌نگاری رایانه‌ای ریزپرتو ایکس یا میکروسی‌تی

[۳] scanning electron microscopy

۱- مقدمه و بیان مساله

روش «قیاس‌های زیست‌شناسانه»، همانند بسیاری از ایده‌هایی که بر «دکترین معماری مدرن» تاثیرگذار بودند، به سالهای ۱۷۵۰ باز می گردد. در آن سال‌ها دو کتاب علمی و تاریخ‌ساز، چاپ و منتشر شد: یکی کتاب «گونه‌شناسی گیاهی» نوشته «لینیوس» در سال ۱۷۵۳، که در آن عرصه گیاهان سبز از طریق نام‌گذاری بر مبنای علم گیاه شناسی بر اساس جابجایی گرده‌ها و توانایی تولید مثل اندام‌های ماده یا شیوه‌های تولید مثل به رشته تحریر در امده بود و دیگری کتاب «تاریخ طبیعی» نوشته «بوفون» در ۱۷۹۴ بود که در آن سعی شده بود تمامی پدیده‌های زنده بر اساس قوانین کلی طبیعت جمع‌آوری و خلاصه شوند. آنچه که لینیوس انجام داده است، در مورد مساله مورد بحث حاضر مصداقی ندارد، هرچند که شاید بهتر است گفته شود که علاقه وافر او به طبقه‌بندی گیاهان به موازات مشغله فکری باستانشناسی در آن زمان جلوه‌گر شد. اما نقطه نظرات بوفون در ارتباط با موضوع مورد بحث ما ارتباط بیشتری دارد، زیرا او هم با نقطه نظرهای گونه‌شناسانه لاتغیر لینیوس مخالف بود و هم با دکترین طبقه بندی او که بر اساس خصوصیاتی که به دلخواه برای گیاهان فرض کرده بود. او بر عکس لینیوس معتقد بود که این نحوه خلاصه‌سازی این واقعیت را که تمامی گونه ها از یک تیره اصلی مشتق شده‌اند را مخدوش خواهد نمود. تا آنجایی‌که به بهره‌مندی نظریه پردازان معماری از سیستم بیولوژیکی بوفون مربوط می شود، دو نکته حائز اهمیت است و توجه وجود دارد: یکی اینکه، در دریافت ایده «تکامل تدریجی» که او، آن را اساساً روندی انحطاطی دانست و نه روندی رو به بهبود؛ زیرا اعتقادات مذهبی‌اش مانع از آن بود که روند تکامل تدریجی برای همه موجودات مگر حیوانات پست را بپذیرد؛ و از طرف دیگر او اولین دانشمندی بود که توانست قسمت های «رشد یابنده» و بخصوص «حیوانی» حیوانات را به‌طور صحیح تشخیص‌دهد زیرا یک حیوان نمی‌تواند همانند یک اُرگانیسم گیاهی تنها قادر به جابجایی از یک نقطه به نقطه دیگر باشد (کالینز، ۱۳۷۵، صص ۱۸۰-۱۸۱). بر طبق بررسی «ورنر ناچیتگال»، اصطلاح آلمانی *Bionik* در اصل از واژه انگلیسی *bionics* می‌آید که توسط سرگرد نیروی هوایی ایالات متحده «جی. ای. استیل» در کنفرانسی با عنوان «*سمپوزیوم بیونیکس: نمونه اولیه‌های زنده- فناوری جدید*» در سال ۱۹۶۰، به‌صورت فرضی به‌عنوان ترکیب واژه‌های «بیولوژی» و یا الکترونیکس ابداع شد. در آلمان، اصطلاح *Bionik* یک تفسیر مجدد بسیار رسا در سیلاب‌های اول و آخر کلمات بیولوژی *biology* و تکنیک *Technology* پیدا می‌شود (محمودی نژاد، ۱۳۹۹، ص ۲۸). در طول اوایل قرن بیستم، پوسته‌های بتنیِ شمایلی با هندسه دوبل‌منحنیِ سازگاریافته برای انتقال بارها از طریق نیروهای غشایی، ساخته شدند. امروز، پوسته‌های یکپارچه عمدتاً توسط پوسته‌های توریِ متشکل از سیستم‌های مشبک مقرون‌به‌صرفه‌ای که با قطعه‌های شیشه‌ای یا فلزیِ مسطح پوشانده می‌شوند، جایگزین می‌شوند (گلابچی، ۱۳۹۷، ص ۱۲۱). این سیستم‌ها نه بازده سازه‌ای‌شان به‌پای پوسته‌های یکپارچه می‌رسد و نه ظرافت و

ریزه‌کاری‌های معماری‌شان در یک انحنای پیوسته جلوه می‌کند. ساخت پوسته‌های بخش‌بخش با مونتاژ اجزاء پیش‌ساخته در محل یک جایگزین سودمند است. این کار زمان ساخت در محل را کاهش می‌دهد، به‌خاطر پیش‌ساخته بودن هزینه‌ها را پایین می‌آورد و ایجاد یک انحنای نرم و هموار را ممکن می‌سازد. اتصال بخش‌های ساختمانی ضروری است اما می‌تواند با کاستن از سختیِ خمشی در اتصالات و پایین آوردن ظرفیت برای انتقال نیروهای نرمال و برشی، با وضعیت مطلوب غشا برای باربری (تحمل بار) مغایر باشد. عدم تجانس در سختی غشایی، همچنین می‌تواند سبب خمش پوسته‌های متجانس در یک وضعیت غشایی یکدست شود. بنابراین، خصوصیات و چیدمان اتصالات از اهمیت حیاتی برای رفتار باربری پوسته‌های بخش‌بخش برخوردارند. براین اساس در این پژوهش به کاربست معماری بیومیمتیکس در پوسته‌های ساختمانی با الگوبرداری از اسکلت یک توتیای دریایی پرداخته می‌شود.

۲- روش‌شناسی و پیشینه تحقیق

روش تحقیق در مرحله مبانی نظری «توصیفی- تحلیلی» و روش تحقیق با استفاده از CAD در ترسیم ساختار مورفولوژیکی توتیای دریایی در راستای طراحی فرمهای مطلوب برای پوسته های ساختمانی است. سکه‌دریایی به‌عنوان یک مدل مناسب برای پوسته‌ها در ساخت‌وسازهای ساختمانی به‌کار می‌آید. تحلیل‌های مربوط به ریخت‌شناسی عملکردی سکه‌های دریایی مختلف با تمرکز بر استریوم[۱] سبک‌وزن صفحه‌ها، اتصالات پیوندی، و نقش مؤلفه‌های ارگانیک و غیرارگانیک بینش‌هایی را در رابطه با اصول زیستی سازگاری‌های سکه‌دریایی فراهم می‌آورد. مواد و خصوصیات ساختمانیِ بررسی‌شده می‌توانند به‌عنوان پایه و اساس تحلیل اجزاء محدود (FEA) موردِاستفاده قرار گیرند و به درک بهتر ریخت‌شناسیِ عملکردیِ پوسته منجر شوند. نمایش فیزیکی اسکلت و اتصالات با استفاده از فرایندهای ساخت افزایشی و تأثیر تولید افزایشی بر اتصالات ممکن است منجر به نوآوری‌هایی در ساخت‌وساز پوسته‌ها شود. شرایط برای انتقال بار و سختی در محل اتصالات و محدودیت‌های هندسی برای بخش‌ها به‌عنوان پارامترهای متغیر در این فرایند موردِبررسی قرار خواهند گرفت. این روش‌شناسی [متدولوژی] طراحی می‌تواند برای مطالعه و بررسی اَشکال هندسی متنوع گونه‌های سکه‌دریایی که درنتیجه‌ی سازگاری‌های تکاملی با شرایط مکانیکی زیستگاه‌های مربوطه‌شان ایجاد شده‌اند و نیز برای پروراندن توصیه‌ها و پیشنهادهای طراحی برای طرح‌بندی‌های الگوی اتصالات در پوسته‌های بخش‌بخش در ساخت بنا مورداستفاده قرار گیرد. بررسی راه‌های ممکن برای انتقال ویژگی‌های اجرایی و اصول ریخت‌شناختی [مورفولوژیکی] فوق‌الذکرِ سکه‌دریایی

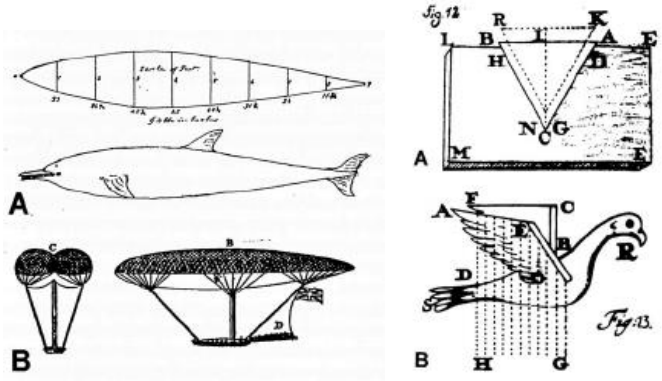
---

[۱] – استریوم (Stereom): ماده‌ای از جنس کربنات‌کلسیم که اسکلت‌های داخلی یافت‌شده در توتیاهای دریایی و تمامی خارپوستان دیگر را، چه زنده و چه فسیل، می‌سازد.

به ساخت‌وساز بنا می‌تواند صورت گیرد. اصول زیستی در سیستم‌های پوسته‌ی مدولی، درجات بالای سازگاری هندسی و بازده سازه‌ای قابل‌تعمیم به تفکیک مؤلفه را ممکن می‌سازند.

برخی پیشینه و تاریخچه موضوع عبارتند از:

لئوناردوداوینچی (۱۵۱۹-۱۴۵۲)؛ در سال ۱۵۰۵ لئوناردو داوینچی کتابی در مورد پرواز پرندگان تألیف کرد. «ونر ناچتیگال» یکی از اختراعات او را در ذیل شرح می‌دهد: پروبال آزادبال پرندگان به خاطر تحمل عجیب و غریب و عدم تقارن در طول بال و پر زدن به سمت پایین بدون شکاف (فاصله) بسته می‌شوند؛ و در طول بال و پر زدن به سمت بالا، آن‌ها را می‌گشایند تا جریان هوا را ایجاد کنند. در نتیجه لئوناردو استفاده از پروبال‌های ساخته شده از شبکه‌ای از خطوط عمود برهم از چوب درخت بید که با کتان پوشانده شد به‌عنوان بال‌های فنی، پیشنهاد داد که هنگام حرکت به پایین بسته و هنگام حرکت به بالا باز می‌شوند (این یک نمونه پیشنهاد بیونیک است؛ مشاهده پایه کپی نمی‌شود، اما اصل بسته بودن سطح بدون شکاف) و باز شدن سطح با ایجاد جریان هوا به شکل مناسبی ربوده شد. این واقعیت که این هیچگاه کارنکرده است، برای ملاحظه موجود مناسب نیست. پروپوزال در دریافت (ادراک) فنی زبان جای داده می‌شود) (گروتر، ۱۳۹۹، ص ۶۷).



تصویر ۱. آلفونسو بورتی: درباره تأثیر گوه‌ها و برهم زدن بال و تصویر ۲. مطالعات سرجورج کایلی راجع به فرم و طراحی یک بالن.

اتو لی‌لی‌ینتال (۱۸۹۶-۱۸۴۸)؛ اتو لی‌لی‌ینتال یکی از مشهورترین پیشگامان در پرواز انسان بود. به ویژه، او پرواز لک‌لک را برای توسعه دستگاه‌هایش مطالعه کرد. او به بیش از ۳۰۰۰ پرواز با وسایل مختلف اقدام کرد و در یک سقوط در سال ۱۸۹۶ درگذشت. نقشه‌های او به طور کامل نشان می‌دهند چطور می‌توان یک مخلوق زنده را به وسیله نقشه‌های مهندسی توصیف کرد. پژوهش او جدی و ژرف بود. معماران می توانند از این نوع نقشه‌ها بهره ببرند، چون این طبیعت است که به یک زبان فنی توصیف می‌شود: زیست شناسی فنی کلاسیک (محمودی نژاد: ب، ۱۳۹۹، ص ۱۲۸).

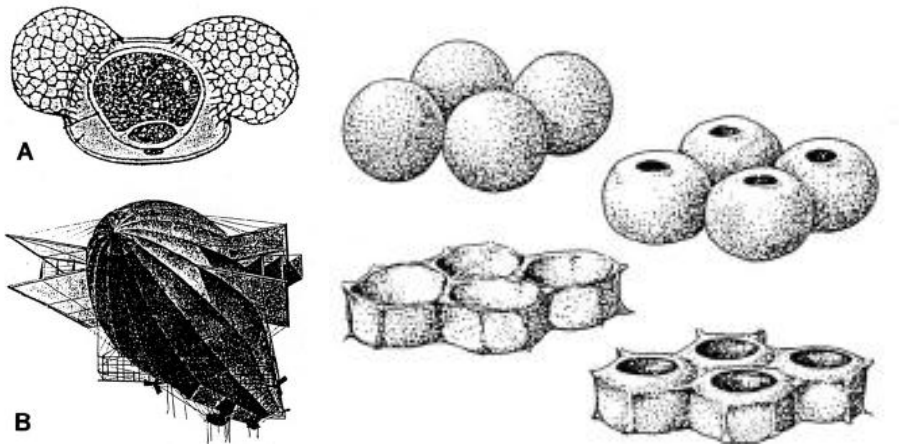
ایگو اتریچ (۱۹۶۷-۱۸۷۹)؛ در سال ۱۹۰۷، ایگو اتریچ یک هواپیمای یک باله به نام داو (فاخته، قمری) را که براساس دانه گیاه پروازی، دانه استوایی زاثونیا ماکروکارپا مدل شد، خلق کرد. این

وسیله به نام *Etrich taube* تاریخ‌ساز شد و یک مدل ۱:۱ را می‌توان در موزه *Technisches* در وی‌ینا دید. علی‌رغم استفاده از دانه گیاه به‌عنوان مدل نقش، مورفولوژی (شکل‌شناسی) نهایی این هواپیما از مورفولوژی قمری (به آلمانی *Taube*) در حال خرامیدن (سبک پریدن) پیروی می‌کرد (محمودی نژاد: الف، ۱۳۹۹، ص ۱۲۸).

۳- ادبیات تحقیق

۳-۱ معماری بیومیمتیکس

دارسی تامپسون (۱۹۴۸-۱۸۶۰) «در مورد رشد و فرم» را در سال ۱۹۴۲ چاپ کرد. آن کتاب در مورد این پرسش بود که فرم در ارگانیسم‌ها چطور توسعه می‌یابد و رادیو لاریان‌ها و چند جانور و گیاه بالاتر به‌عنوان مثال بررسی کرد. آن هنوز به‌عنوان مرجع (کتاب قانون) برای توسعه فرم و ساختار ارگانیسم‌های زنده نسبت داده می‌شود و خیلی از کارهای بعدی به یافته‌های تامپسون رجوع می‌کند. تامپسون موضوعاتی نظیر مدار(بزرگی)، رشد و مقیاس را مورد بحث قرار داد و شکل‌های طبیعی را برحسب ریاضیات و هندسه بررسی کرد کار او هنوز منبع الهام بخشی است که بواسطه رشته زیست‌شناسی ریاضی که تشکیل الگوی فضایی زمانی در زیست‌شناسی را ررسی می‌کند، به جلو برده می‌شود. این گونه به نظر می‌رسد که این قیاس‌ها بایستی در مقیاس کلی و با خصوصیتی شاعرانه مدنظر قرار گیرد و در واقع می توان گفت که آنچه که در این مقوله‌ها در ارتباط با معماری به طور موثر می‌توان یافت، به چهار مورد محدود می‌شود: *۱. «رابطه ارگانیسم‌ها با محیط»؛ و ۲. «وابستگی بین ارگان‌ها با یکدیگر»؛ و ۳. «رابطه بین فُرم عملکرد»؛ و ۴. «اصل حیات»* (کالینز، ۱۳۷۵، ص ۱۸۶).



تصویر ۳. جوهان گرهارد هلمک، تئوری توسعه فرم در دیاتوم‌ها (آغازیان). تصویر ۴. رائول فرانس، طراحی کشتی هوایی با استفاده از گروه کاج بعنوان مدل نقش ۱۹۱۹؛ ماخذ: گروتر، ۱۳۹۹، ص ۱۶۵.

کار ابداعی خلّاقانه و آفرینشگر، همیشه از پیوند دادن عوامل نقش آفرین مختلفی پدید می‌آید که قبلاً نمود نداشته‌اند و فقط با ارتباط یافتن آنها اهمّیت و موجودیّت واقعی این عوامل مشخص می‌شود. تقلید از طبیعت مزایای متمایزی می‌تواند داشته باشد؛ می‌توان فرض کرد که هر جاندار

کنونی حاصل دو هزار میلیون سال تکامل است. تکامل در طبیعت موجب پیدایش مکانیسم‌هایی شده است که می‌توان از آن الگوبرداری کرد. آنچه برای سیستم زنده خوب است، بایستی به همان اندازه و درجه برای سیستم‌های ساختگی مشابه نیز خوب باشد. در الگوبرداری از طبیعت مسئله اصلی این نیست که به‌طور صد درصد از جزئیّات مدل طبیعی استفاده شود، بلکه باید اصول و فرآیندهای طبیعی شناخته شده و بکار گرفته شوند (آنتونیادس، ۱۳۸۱، صص ۵۰-۵۵).

تصویر ۵. استفاده از ساختار تارهای عنکبوتی در طراحی سازه و معماری؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

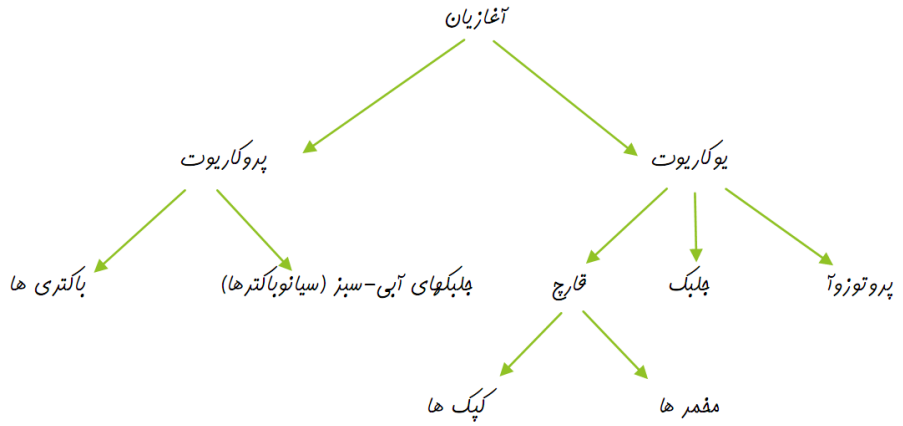
«هاینریش هرتل» یک مهندس و کارشناس در زمینه ایرودینامیک بود که در توسعه ساخت و به کار انداختن هواپیماها کارکرد. او *Biologie und technik* را به‌عنوان یک رشته تحقیقاتی در برلین، به‌عنوان یکی از پیشروهای جامعه پژوهشی فعال امروز در آلمان تأسیس کرد. او همچنین با به کار انداختن بازوی قایق ها آزمایش کرد که موفق نشد، اما توسعه فناوری دیگری برای پمپ‌ها را آغاز کرد. هرتل با زیست شناس ژوهان گرهارد هلمک همکاری کرد. برخی واژگان مرتبط با الگوبرداری از طبیعت عباتند از:

۱. **بیومیمیکری**؛ توسط یک گروه از ایالات متحده توسط «جانین بنیوس» ابداع شد که در مورد استفاده از نبوغ طبیعت برای توسعه نوآوری می‌باشد: روش کلی (کل‌گرا) شامل طراحی اکولوژیک و نیز علاقه به نوآوری فناورانه.
۲. **الهام زیستی (الهام از طبیعت)**؛ کلی‌ترین عبارت برای طراحی الهام گرفته از مدل‌های نقش طبیعی شامل تمام سطوح انتزاع، همچنین تفسیرهای کامل شکل‌شناختی است.
۳. **مورفولوژی زیستی (شکل‌شناسی زیستی)**؛ عبارتست از علم ساخت و سازمان‌دهی چیزهای زنده و عناصر آن‌ها – ارگان‌ها (اندام)، بافت و سلول‌ها.
۴. **مورفولوژی ساختاری**؛ به طراحی کارکردی در فناوری و آناتومی کارکردی در زیست شناسی برمی گردد.
۵. **میکرومورفولوژی (شکل‌شناسی میکروسکوپی)**؛ فرم جانداران و اشیاء میکروسکوپی را بررسی و توصیف می‌کند و خزانه (کشف) فرم‌های کارکردی را نمایش می‌دهد.
۶. **بیومکانیک**؛ عبارتست از به‌کارگیری قوانین فیزیکی مکانیک برای بررسی چیزهای طبیعی.

۷. **بیوفیزیک؛** موضوعات زیستی (بیولوژیک) را با اصطلاحات و روش‌های فیزیک بررسی و توصیف می‌کند.

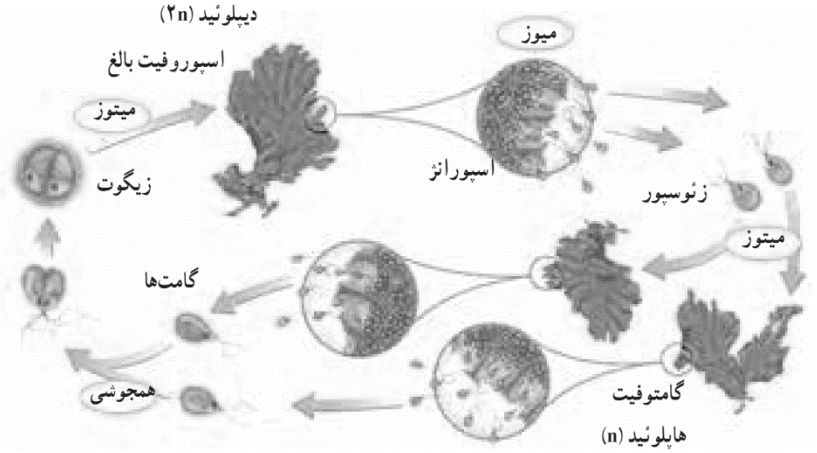
۳-۲ توتیای دریایی

توتیاهای دریایی، بی‌مهرگان دریاییِ به‌طورِ سلسله‌مراتبی سازمان‌یافته‌ای هستند که اسکلت چنداَجزائی دارند. این جانوران پنج سطح سلسه‌مراتبی را بروز می‌دهند (به‌عنوان مثال نِبلسیک و همکاران، ۲۰۱۵). این سلسله‌مراتب عبارت‌اند از: (۱) اسکلت کلی، (۲) اسکلت چندصفحه‌ای، (۳) صفحات اسکلتی مجزا، (۴) یک میکروسازه از انواع مختلف استریوم که از آن صفحات مجزا ساخته می‌شوند، و (۵) نانوسازه‌ی متعلق به استریوم زیست‌کانی‌سازی شده.

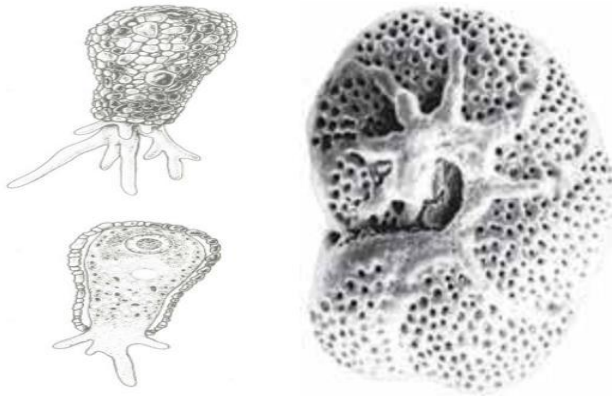


بالاترین سطح سازمانی توسط کل توتیای دریایی به نمایش گذاشته می‌شود که شامل تمامی بخش‌های نرم و سخت آن است. این اسکلت منشأ میان‌پوستی [مزودرمی] دارد و، در بیشتر موارد، تماماً توسط روپوست [اپیدرم] نرم پوشیده شده است (به‌عنوان‌مثال هایمَن، ۱۹۵۵). اگرچه سخت‌پوسته‌ی توتیای دریایی (اسکلت آهکی بدون ضمایم) یک استخوان‌بندی درونی است، به‌عنوان یک اسکلت بیرونی عمل می‌کند (به‌عنوان‌مثال، گُلدبِرگ، ۱۹۹۲) و از اندام‌های داخلی حیاتی هم در مقابل تنش‌های زیستی (مثل شکارچیانِ تغذیه‌کننده از توتیاها) و هم در برابر تنش‌های غیرزیستی (مثل تلاطم شدید آب) محافظت می‌نماید. سخت‌پوسته همچنین به‌عنوان یک زیرلایه برای ضمایم سطحیِ متنوع شامل خارها، که روی برجستگی‌های کوچک سطح سخت‌پوسته سوار می‌شوند، و چنگال‌ها[۱]، که ساختارهای میکروسکوپی آرواره‌مانندی هستند که می‌توانند ذرات و ارگانیسم‌ها را روی سطح توتیای دریایی بردارند، عمل می‌کند.

[۱] - pedicellaria (plural: pedicellariae)



به‌علاوه، اسکلت توتیای دریایی دارای روزنه‌های بی‌شماری در سخت‌پوسته شامل پِریستوم[1] (دهان)، پِریپراکت[2] (مقعد)، منفذهای تناسلی، منفذهای چشمی، جفت‌منفذها برای پاهای لوله‌ای تنفسی در سیستم حرکتی، و در کلاپیستروئیدها، تک‌منفذهای ثانویه که نمایانگر سوراخ‌های منفرد برای پاهای لوله‌ای ثانوی هستند، است. یک اندام اسکلتی دیگر که در داخل سخت‌پوسته دیده‌می‌شود، جهاز آرواره‌ایِ حامل دندان‌های خودتیزشو است.



تصویر ۶. روزن‌داران؛ و دی فلوجیا (*Difflugia pyriformis*) نوعی از توتیای دریایی (سکه دریایی). شکل پایین برش طولی جانور را نشان می‌دهد. این آمیب با ذرات ریز ماسه، غلافی به دور خودش می‌سازد؛ ماخذ: محمودی-نژاد: پ، ۱۳۹۹، ص ۱۶۷.

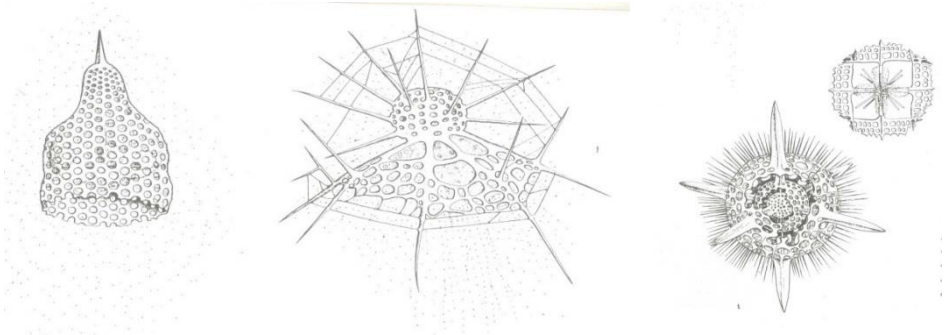
۳-۳ ساختار اسکلت توتیای دریایی

خود اسکلت از ردیف‌های چندگانه از صفحات مجزا که توسط بافت نرم ازجمله تارهای کلاژنی، مثل همان‌هایی که در توتیاهای دریاییِ باقاعده یافت می‌شوند به هم متصل هستند، به‌علاوه‌ی

[1] - peristome

[2] - periproct

پیش‌آمدگی‌های اسکلتیِ به‌هم‌قفل‌شونده در توتیاهای دریایی کلاپیستروئیدی تشکیل شده است (به‌عنوان‌مثال سیلاشر، ۱۹۷۹). بیشترِ توتیاهای دریایی باقاعده، که تقارن پنج‌گانه‌ی مشخصی را بروز می‌دهند، دارای صفحات با اَشکال مشابه در سرتاسر اسکلت هستند؛ اما این صفحات می‌توانند در برخی از گروه‌های توتیاهای دریاییِ بی‌قاعده بسیار متغیر باشند. توتیاهای دریایی دو نوع عمده‌ی صفحه در ردیف‌های دوتایی مشخص دارند؛ صفحات بازویی [ambulacralia] و صفحات بین بازویی [interambulacralia]. صفحات بازویی حامل منافذ مربوط به پاهای لوله‌ای تنفسی هستند.



تصویر ۷. اسکلت‌های سیلیسی زیبای روزنه‌داران دریایی: ۱-Arachnocorys circumtexta؛ ۲- Eucyrtidium cranoides؛ ۳-Lithoptera mulleri؛ ۴-Actinomma asteracantion. اسکلت‌های ۱ و ۲ با پروتوپلاسم شفافی احاطه شده‌اند و پاهای کاذب از سطح آن به داخل آب فرستاده می‌شوند. پروتوپلاسم ۳ در حال مرگ است و جانور خود را به درون اسکلت کشیده است.

در کلاپیستروئیدها، این منافذ به‌صورت یک طرحِ خوب‌توسعه‌یافته‌ی گُل‌مانند روی سطح پشتی متمرکز شده‌اند. به‌علاوه، عناصر آهکی در خارها، جهاز آرواره‌ای، و در داخل ساختارهای پشتیبان [نگهدارنده] گوناگون در داخل و روی سخت‌پوسته حضور دارند. هر صفحه اسکلتی منفرد از یک استریوم سبک‌وزن ساخته شده است؛ یک سیستم تورتیغه‌ای[۱] [میله‌میله] سه‌بعدیِ اسفنج‌مانند یا شبکه‌مانند که با ریزساختارهای [میکروساختارهای] استخوان‌های مهره‌داران قابل‌مقایسه است (میلوت، ۱۹۶۷). تورتیغه‌ها توسط سلول‌های تخصص‌یافته هم‌نَهِشت [سَنتِز] می‌شوند. اگرچه زیست‌کانی‌سازی[۲] در مراحل مختلفی اتفاق می‌افتد، هر صفحه‌ی منفرد به‌عنوان یک بلور مجزا تحت قطبش[۳] رفتار می‌کند که این، هم مزایای یک ساختمان یکپارچه و هم مزایای یک سازه‌ی مدولی و چند-اِلمانی را با هم ترکیب می‌کند (به‌عنوان‌مثال، راپ، ۱۹۵۹). یک ویژگی ریخت‌شناختی دیگرِ

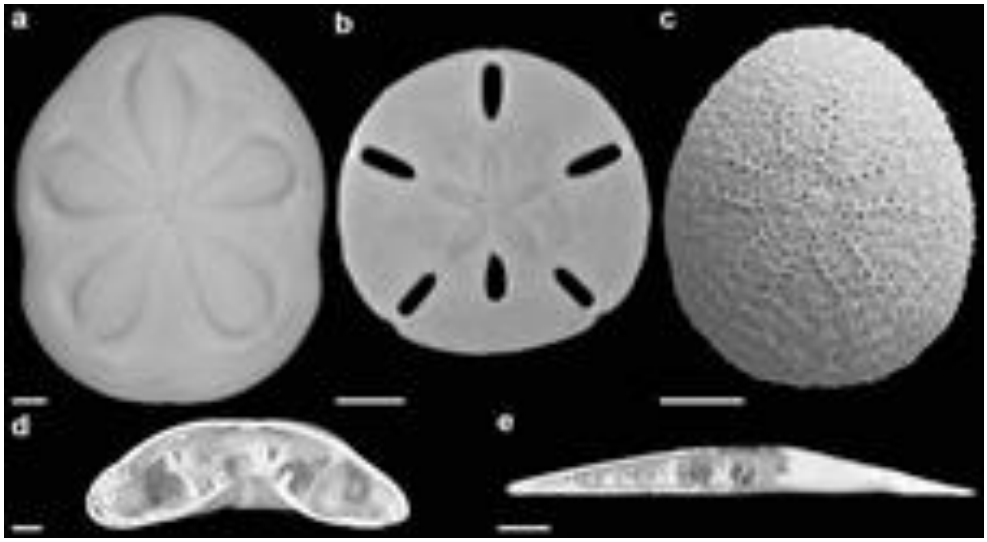
۱ - trabecular

۲ - biomineralisation

کانی‌سازی زیستی یا بیومینرالیزاسیون فرایندی است که در آن موجودات زنده، کانی تولید می‌کنند که اغلب در بافت‌های سخت آن‌ها که به آن‌ها کانبافت گفته می‌شود، موجود هستند. تاکنون بیش از ۶۰ کانی گوناگون که از این پدیده تولید می‌گردند، شناسایی شده‌اند. کانی‌سازی زیستی توسط هر شش فرمان‌رو در آرایه‌شناسی آلفا اتفاق می‌افتد. سیلیکات در جلبک‌ها و دیاتوم‌ها کربنات در بی‌مهرگان، و کلسیم‌کربنات و کلیسم‌فسفات در مهره‌داران از نمونه‌های آن هستند.

۳ - polarisation

برخی از سکه‌های دریایی که به‌طور خاص مسطح و دیسک‌شکل هستند، وجود لونولاها است، که سوراخ‌های گرد یا نوارمانند (به‌عنوان‌مثال، در *Leodia* و *Mellita*) یا کنگره‌هایی (به‌عنوان‌مثال، در *Rotula* و *Rotula*) در اسکلت هستند. لونولاها می‌توانند به تعداد متنوعی وجود داشته باشند و می‌توانند یا در طول تکوین رشد کنند یا براثر جذب مجدد مواد و مصالح اسکلتی به‌وجود آیند (به‌عنوان‌مثال هایمن، ۱۹۵۵). کلاپیپستروئیدها همچنین توسط (۱) حضور پاهای لوله‌ای تنفسی در یک پتالودیوم[۱] گُل‌مانند روی سطح مقابلِ‌دهانی، (۲) پاهای لوله‌ای ثانویه که در سرتاسر اسکلت پراکنده هستند، (۳) خارهای ریز بسیار متمایز روی سطح سخت‌پوسته، (۴) یک سیستم منشعب از شیارهای غذایی روی سطح دهانی منتهی به پریستوم، و (۵) یک جهاز آرواره‌ایِ بسیار اصلاح‌شده [تغییریافته] که در داخل سخت‌پوسته دیده می‌شود، مشخص می‌شوند.



تصویر ۸. تصاویر توتیاهای دریایی کلاپیپستروئید. (a) *Clypeaster rosaceus*، (b) *Leodia sexiesperforata*، و (c) *Echinocyamus pusillus* از نمای مقابلِ‌دَهانی. (d) *Clypeaster rosaceus* گنبددار دارای یک پریستوم متورم. (e) *Mellita tenuis* بسیار مسطح *نوار مقیاس* D 1 cm (a, b, d, e)، *نوار مقیاس* D 1 mm (c)؛ ماخذ: ویکیپیدیای فارسی، ۱۴۰۱

۴- بیان یافته‌های تحقیق

شبیه‌سازی‌های محاسبه‌ای ارگانیسم‌ها مثل توتیاهای دریایی، می‌توانند به‌خاطر پیچیدگی و نقشه [پلان] بدنی بسیار ساختارمند سخت باشند. بنابراین، توصیف جزءبه‌جزء مدل شامل تک‌تک جزئیات ریخت‌شناختی شدنی نیست. برای حصول یک مدل معنادار، سؤالات انتزاعی و فرضیه‌های مقدماتی باید برای تأیید یا رد شدن سنجش شوند. برای مدل‌سازی مکانیکی سکه‌های دریایی پیش‌بینی‌شده در اینجا، مهم‌ترین سؤال‌ها به نقش هندسه‌ی خاص و بخش‌بندی اسکلت، خصوصیات مکانیکی

[۱] - petalodium

اتصالات، نقش تورتیغه‌ها [ترابکولاها] و رابطه‌ی این اجزاء با محیط‌های زیستی‌ای که سکه‌های دریایی در معرض آن‌ها قرار می‌گیرند، مربوط می‌شود. شبیه‌سازی‌ها براساس سه مدل از سکه دریایی هستند، یک مدل کامل، یک مدل تقلیل‌یافته، و یک مدل منتزع. هدف مدل کامل یا مفصل، که در ابتدای این پروژهی تحقیقاتی دنبال می‌شود، تلاش برای رسیدن به بیشترین تقریبِ ممکن به خصوصیات هندسی، مکان‌شناختی [توپولوژیکی]، و ماده‌ای سکه‌دریایی است. مدل‌های تقلیل‌یافته و منتزع بعداً از آموزه‌های به‌دست‌آمده از مدل کامل حاصل می‌شوند. مدل تقلیل‌یافته ویژگی‌های اساسیِ مکانیکی و ساختاریِ مدل کامل را با هزینه‌ی محاسباتی بسیار پایین‌تری حفظ می‌کند؛ درحالی‌که، مدل منتزع مفهوم ساختاری زیربنایی مهم را با هدف اِعمال در معماری ارائه می‌دهد. سؤالاتی که اینجا مطرح می‌شوند این است که آیا کارآمدگی‌های مکانیکیِ معیّن ذاتاً به طرح‌بندی الگو، خصوصیات اتصالات، و ویژگی‌های کلیِ هندسی و مکان‌شناختیِ اسکلت بخش‌بخش، شامل تورتیغه‌ها [ترابکولاها] مرتبط هستند یا نه. یک مشکل بنیادی مدل‌سازی از ارگانیسم‌ها، برخلاف سازه‌های مهندسی، این است که هیچ پروتکلی در مشخص کردن هندسه، جزئیات ساخت‌وساز، و مصالحِ به‌کاررفته در دسترس نیست. همین مشکل در رابطه با بارها و شرایط مرزی هم وجود دارد. در عوض، دو روش مکمل این اطلاعات را با استفاده از اندازه‌گیری‌ها و گمانه‌زنی‌های باورپذیر به دستمان می‌دهند. این اطلاعات، اساس و مبنای مدل‌سازی اجزاء محدود را که در این بخش توضیح داده شد، شکل می‌دهند.

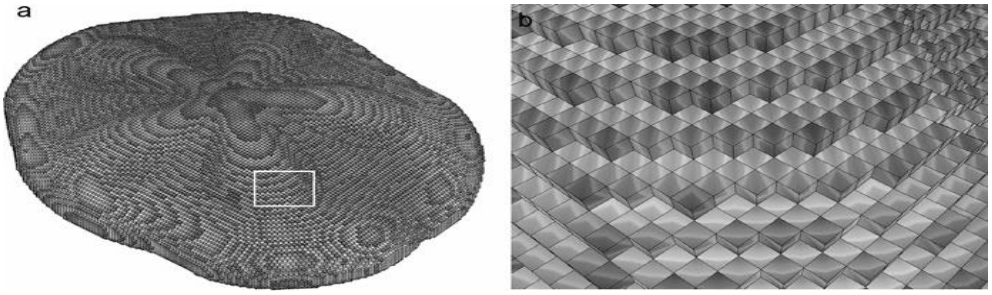
امروز، مسئله‌های مکانیکی در مهندسی عمدتاً با روش اجزاء محدود حل می‌شوند؛ یک روش عددی که به‌طور تقریبی معادله‌های دیفرانسیل با مشتقات جزئی را حل می‌کند:

- یک مسئله فنی عمده در زمان مشتق‌گیری یک مدل اجزاء محدود، تولید یک شبکه‌ی شدنی است. ابزار قدرتمندی برای تولید شبکه[1] [مِش] باتوجه به داده‌های طراحی به‌کمک رایانه[2] (CAD) از هندسه وجود دارند.
- برای مسئله‌ی حاضر، این به معنای آن است که، اول، لازم است یک مدل CAD از داده‌های خام استخراج شود، که بتواند در گام دوم توسط نرم‌افزار شبکه به‌طور خودکار پردازش شود. هیچ‌یک از این دو مرحله کم‌اهمیت نیستند و، در کل، نمی‌توانند به‌طور کاملاً خودکار انجام شوند. شبکه‌ای که به‌طور ماشینی تولید شده نیاز به اصلاحات دستی دارد. علاوه‌بر به‌کار بستن این شبکه‌ی سطح، استفاده از شبکه‌های اجزاء محدودِ واکسِل‌محور[3] که می‌توانند از داده‌های خام تولید شوند هم امکان‌پذیر است.

[1] - mesh

[2] - Computer Aided Design

[3] - voxel-based



تصویر ۹. شبکه سطح ساخته شده از شبیه سازی توتیای دریایی با سیستم CAD؛ ماخذ: Wang W, Liu Y (2009)

در این مورد، هر جزء محدود، به‌طورهندسی نمایانگر یک شش‌وجهی باقاعده است. مقیاس سیاه‌سفید می‌تواند به تراکم یا تخلخل مرتبط باشد و بنابراین می‌تواند راهنمایی‌هایی را در رابطه با خصوصیات مادی واقع‌بینانه در اختیار بگذارد. این رویکرد واکسِل‌محور اگر با یک انتقال CAD-FEM استاندارد مقایسه شود، مزایا و معایبی دارد. مدل واکسل به‌خاطر وضوح [رزولوشن] تصاویر سی‌تی اسکن و نرم‌افزار و سخت‌افزار موجود، در نرمی و صافی محدودیت دارد. عیب آشکار آن نمایش هندسی ضعیفِ خطوط سطح است که به‌طورِبالقوه به دقت و صحت نتایج محاسباتی لطمه می‌زند. یک مزیت مسلّم نیز امکان انتقال مستقیم از داده‌های خام به یک مدل عددی است. به‌علاوه، برای تحلیل‌های خطی، ماتریس‌های سختیِ جزء اساسی، قالبِ کلی یکسانی دارند. تا این لحظه، اینکه کدام‌یک از مزایا و معایب هر دو رویکرد بر دیگری غلبه کند، هنوز مشخص نیست. در حال حاضر، هر دو مفهوم به‌صورت موازی اتخاذ می‌شوند.

در زیست‌شناسی تکاملی، ویژگی‌های ریخت‌شناختی یک فرد نمونه‌های قابل‌مشاهده‌ای از فضای حل‌شدگی نظری هستند (اِبل، ۲۰۰۴). فضاهای ریخت‌شناختی یا همان «ریخت‌فضاها» فضاهای شکلی را می‌سازند که توسط ابعاد چندگانه تعریف می‌شوند. هرکدام از این ابعاد مطابق با یک پارامتر متغیر از ریخت‌شناسی است. ریخت‌فضاها به‌عنوان ابزارهای محاسباتی و مفهومی‌ای به‌کار می‌روند که توصیف و تعمیمِ گوناگونی‌های بسیار زیادِ شکل ارگانیسمی در طبیعت جاندار را ممکن می‌سازند (میتروکر و هاتگر، ۲۰۰۹). در طراحی محاسبه‌ای، تولید شکل براساس پردازش‌های الگوریتمی است که در دامنه‌های متغیر خاصی از پارامترهای انتخاب‌شده عمل می‌کنند. دامنه‌ی واریانس ترکیبیِ هریک از پارامترها در مدل محاسبه‌ای می‌تواند به‌عنوان ترسیمِ یک فضای nبُعدی که شبیه به ریخت‌فضاهای مربوط به ریخت‌شناسیِ نظری در زیست‌شناسی است، مفهوم‌سازی شود. در این مورد، تک‌تک اجزاء ساختمانی به‌عنوان نقطه‌های nبعدی نشان داده می‌شوند.

راهبردهای متعددی برای شکل‌یابی و بهینه‌سازی ساختمان‌های پوسته‌ای پرورانده شده‌اند:

۱. ازجمله کار تجربی (آزمایشی) هاینز ایزلر (شیلتون، ۲۰۰۰) و روش‌های تحلیلی بلتزینگر و رام (۱۹۹۹) و آرنوت و همکاران (۲۰۱۲). بینش‌های پیرامون شکل‌یابی و بهینه‌سازی

ساختمان‌های پوسته‌ای که الهام‌گرفته از طبیعت هستند، در تحقیقات پیشین وارسی شده‌اند (به‌عنوان‌مثال، رام و همکاران، ۱۹۹۳).

۲. بیشترین کار موجودِ انجام‌شده روی شکل‌یابی، با سازه‌های پوسته‌ای هموار سروکار دارند. پوسته‌های بتنی یکپارچه، عمدتاً به‌خاطر تلاش فراوانی که برای سفارشی‌سازی طرح‌های پیچیده‌ی آرماتور به‌صورت تک‌تک لازم است، کمترین ارتباط را با معماری امروز دارند. مونتاژ پوسته‌ها از بخش‌های پیش‌ساخته می‌تواند یک جایگزین باشد؛ این کار مزایای بسیاری برای پیش‌سازی، حمل‌ونقل، و مونتاژ کردن در محل دارد. تنها مطالعات معدودی در رابطه با طرح‌بندی بهینه‌ی اتصالات برای پوسته‌های بخش‌بخش وجود دارند.

۳. هرچندکه، چند مطالعه‌ی مقدماتی کاربردهای ممکن را تشریح کرده‌اند. دشواری‌های عمده، در انتخاب یک پاره‌بندی پارامترشده که محدودیت‌های پیکربندی را درنظر بگیرد، انتخاب الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب، جفت‌کردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی با نرم‌افزار اجزاء محدود، و تولید یک پهنه‌ی (تابعی) نهفته است.

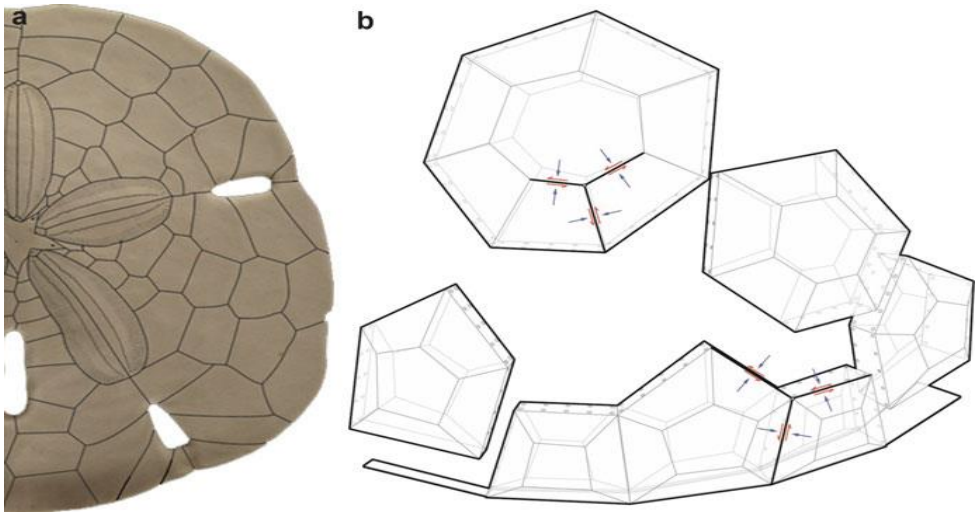
در مورد بهینه‌سازی ساختاری پوسته‌های بخش‌بخش، تابع‌های هدف عموماً باتوجه‌به متغیرهای طراحی، غیرخطی هستند و نامتوالی. الگوریتم‌های تکاملی، که فرایندهای جستجو و بهینه‌سازی فراابتکاری هستند، نویدهایی را در بهبود بخشیدن این دشواری‌ها می‌دهند زیرا این الگوریتم‌ها تنها مستلزم ارزیابیِ خودِ تابع هدف هستند. این الگوریتم‌ها اگرچه به‌سرعت روش‌های گرادیان‌محور همگرا نمی‌شوند، مشکلات کمتری با ناپیوستگی‌ها دارند. در بافت پوسته‌های بخش‌بخش، ممکن است لازم باشد تابع‌های هدف چندگانه حل شوند. این در مورد الگوی زیستی هم صدق می‌کند (به‌عنوان‌مثال، ثبات مکانیکی، جنبه‌های عملکردی، و رشدشناسی [اتوژنز])؛ همان‌طور که در مورد همتای معماری‌اش صدق می‌کند (سختی، وزن، نیروهای موجود در اتصالات، و ثبات). الگوریتم‌های تکاملی می‌توانند چندین تابع هدف را بدون نیاز به ساده‌کردنِ اولیه به یک تابع هدف، به‌یکباره حل کنند؛ آن‌ها می‌توانند مستقیماً جبهه پارتو[۱] را نمونه‌گیری کنند و بنابراین به‌طورِخاص مناسب بهینه‌سازی چندمعیاره هستند. یک مقاله مروری جامع در رابطه با الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی چندهدفه توسط فونسکا و فلمینگ (۱۹۹۵) و دِب (۲۰۱۱) ارائه شده است.

امروز، ابزارهای محاسباتی وجود دارند که بهینه‌سازی پیشرفته‌ی پوسته‌های بخش‌بخش را در معماری ممکن می‌سازند. به‌منظور مطالعه‌ی الگوی زیستی به‌لحاظ بهینگی آن، لازم است داده‌های مدل سه‌بعدی پردازش و ساده شوند تا اندازه‌شان به یک اندازه‌ی مدیریت‌شدنی برسد. بنابراین، لازم است تمامی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی مربوطه شناسایی شوند تا یک مدل طراحی پارامتریک

---

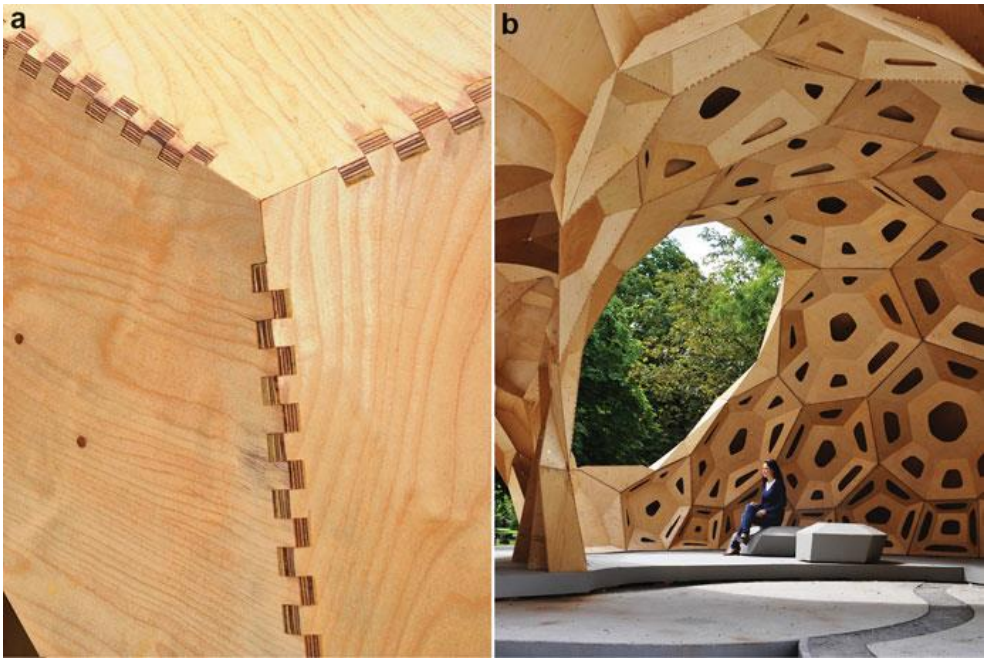
۱ - Pareto-front

تولید شود. تعریف پارامترهای هندسی با هدف مدل‌سازی از تنوع زیستیِ طرح‌بندی صفحه‌ی سکه‌دریایی و ویژگی‌های ریخت‌شناختی مثل طول، عرض، و ارتفاع، مکان‌شناسی [توپولوژی] صفحه، انحنای پوسته، کمیت و وضعیت قرارگیری جهاز اسکلتی، و کمیت و وضعیت قرارگیری پشتیبان‌های داخلی انجام می‌شود. بنابراین، مدل طراحی سه‌بعدی اسکلت به سمت یک مدل پارامتریک بسط می‌یابد که توصیف تنوع طبیعی را با استفاده از تغییرات پارامترهای طرح ممکن می‌سازد. هدف، ساده نگه‌داشتن هرچه ممکن مدل هندسی و مکانیکی است تا از مقدار پارامترها و درنتیجه زمان محاسبه کاسته شود.

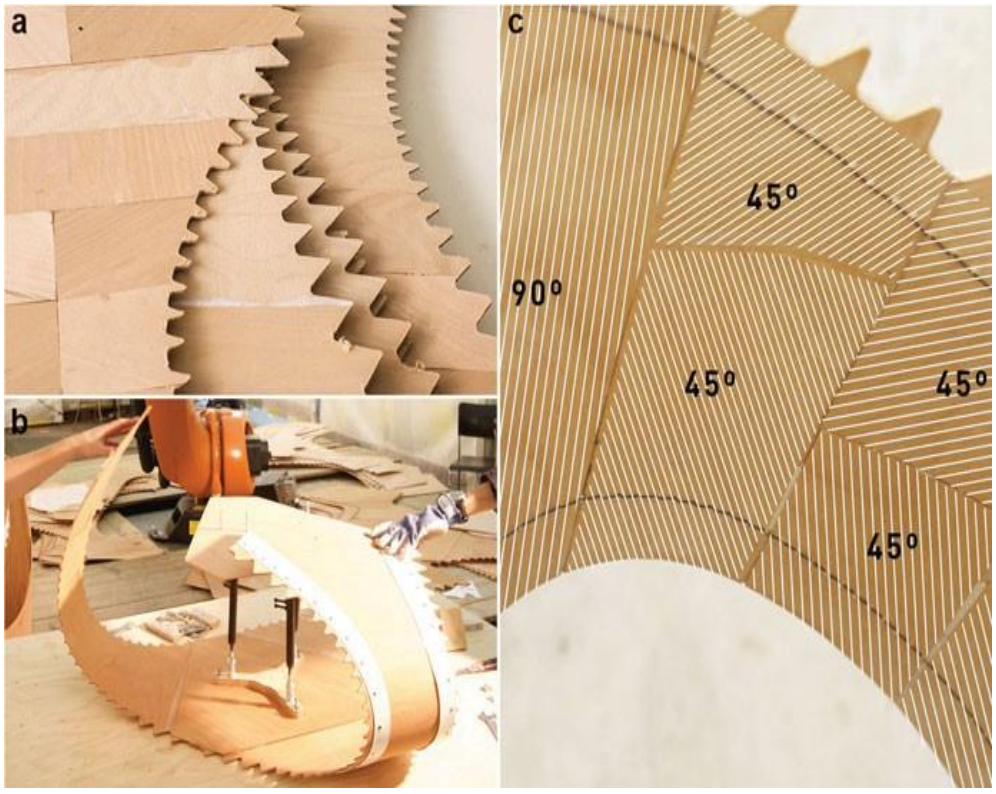


تصویر ۱۰. مدل هندسی طراحی پوسته براساس ساختار هندسی و مکانیکی توتیای دریایی؛ ماخذ: Wang W, Liu Y (2009)

شکل کلی پاویون که از روش‌های طراحی محاسبه‌ای و روش‌های سفارشی‌شده‌ی ساخت به‌کمک رایانه (CAM) حاصل شده است (لاماگنا و همکاران، ۲۰۱۳)، شامل نواحیِ سطحی با انحنای گوس بسیار متغیر و اندازه‌ی مدولی و صفحه‌ایِ مختلف است تا انعطاف‌پذیریِ نمونه‌سیستمِ ساختمانیِ مذکور را اثبات کند. درحالی‌که چیدمان و شکل مدول‌ها مطابق با ملاحظات کلی طراحی و مهندسی توسعه‌ی بیشتری یافتند، انتقال این اصول تضمین کرد که، در سطح صفحه، در ابتدا نیروهای درون‌صفحه‌ای واقع شدند. این منجر به یک سازه‌ی سبک‌وزن کارآمد شد که تماماً از صفحات نازک چوبیِ فقط ۶/۵ میلی‌متری ساخته شده است.



تصویر ۱۱. پاویون تحقیقاتی ICD/ITKE سال ۲۰۱۱ نشان‌دهنده (**a**) جزئیات اتصال صفحه‌ای از اتصالات انگشتی و (**b**) نمای داخلی؛ ماخذ: Nebelsick JH, Dynowski JF, Grossmann JN, Tötzke C (2015



تصویر ۱۲. پاویون تحقیقاتی ICD/ITKE 6 سال ۲۰۱۵. فرایند خمش فعالِ (a) نوارهای روکش لمینت‌شده مرسوم و تبدیلشان (b) به قطعاتی که از (c) یک الگوی زاویه‌ایِ برگرفته از الزامات سختی برای حصول انحنای مطلوب، تابعیت می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری و جمعبندی

معماری و «علم بیونیک» یک کارگاه بین‌المللی است که سال ۱۹۹۳ متولد شد و ایده‌های متفاوتی برای یادگیری از طبیعت در صنعت معماری داشت. یکی از ایده‌های اصلی این کارگاه بین‌المللی یاد گرفتن تکنیک‌هایی است که طبیعت به کار می‌برد. کار آن‌ها بر اساس ایده ای است که می‌گوید: «راه دیگری برای رویارویی با آینده وجود دارد آموختن از درس‌هایی است که طبیعت به ما ارائه می‌دهد تا با کمترین تلاش بازده بیشتری داشته باشیم». طراحی در طبیعت در همه جهات مانند مصالح، کاربرد، ظاهر و ... به گونه ای بهبود یافته است. این می‌تواند یک درس مفید برای معماران و طراحان باشد. طرح پیشنهادی علم بیونیک تنها یک بازگشت است، بازگشتی مجدد به طبیعت، با هدف تشویق و الگوبرداری از هماهنگی میان ماهیت کل کائنات. می‌توانیم کماکان بگوییم: یادگرفتن از طبیعت، ساختن آینده (پیوز، ۲۰۰۰). «ریچارد بونسر» در ساختمان‌های بیونیک خود دنبال این است تا بفهمد «طبیعت چه چیزی می تواند به ما بیاموزد تا استحکام را ارتقا دهیم؟» سوال اینجاست که «چرا از طبیعت تقلید کنیم؟» و برای پاسخ به این سوال می‌توان گفت: نبوغ بشر ممکن است ابداعات متنوع انجام دهد، با ابزار مختلف غلبه خود را نشان دهد و به پایان مشابهی برسد اما هیچ‌وقت راه‌حلی زیباتر، به‌صرفه‌تر و مستقیم‌تر از آنچه طبیعت ارائه می‌دهد را کشف نخواهد کرد، زیرا در ابداعات طبیعت هیچ افراط و تفریطی نیست. نهایتاً باید باور کرد آموختن از طبیعت (بیومیمتیک) اهمیت دارد، زیرا راه‌های محکم‌تری برای مشکلات بیشتر ارائه می‌دهد. «واکولنکو» می‌گوید طی سالیان طبیعت کارکرده و خود را به‌روزرسانی نموده است و فرم‌ها و سیستم‌هایی ساخته است که با تکنولوژی روز می‌توانیم به آن دست یافت. برای معماران شگفت‌انگیزترین بخش طبیعت، فرم‌ها و اشکالی است که در آن وجود می‌یابند. برای تحلیل این قالب‌ها بهتر است بدانیم چگونه ساخته می‌شوند و طبق نظریه «ماکزیمم»، فرم‌ها در طبیعت به یکی از شکل‌های زیر ظاهر می‌شوند:

۱. روندی کنترل نشده؛
۲. روندی که به قوانین فیزیک و شیمی در طبیعت و محیطی که در آن تشکیل می‌شوند وابسته است؛
۳. روندی که به صورت ژنتیکی و شرایط محیطی هدایت شده است؛ و
۴. روندی که با تقاضای بشر هدایت شده است.

اسکلت‌های سکه‌دریایی که بخش‌بخش و به‌طور سلسله‌مراتبی سازمان‌یافته هستند، باتوجه به اسلوب زندگی‌شان دارای سازگاری‌های متنوعی هستند. این سامان‌بخشی‌های [مدولاسیون‌های] ریخت‌شناختی و ساختاری با شرایط خاص محیط‌زیست بسیار سازگارند. پاسخ ریخت‌شناختی به تنش مکانیکی حاصل از فاکتورهای زیستی (زیستگانی) و غیرزیستی (غیرزیستگانی) می‌تواند به‌عنوان مولدهای شکل‌ساز و اصل‌ساز در ساختمان کلاپیپستروئید دیده شود. اتخاذ و استخراج

اصول زیستی می‌تواند ساخت‌وسازهای ساختمانی را بهبود بخشد زیرا ساختمان‌ها احتمالاً در معرض شرایط باری مشابهی با توتیاهای دریایی هستند.

استعمال روش‌ها و تکنیک‌های جدید مثل برش‌نگاری ریز پرتو ایکس (میکروسی‌تی) با وضوح [رزولوشن] بالا، ابزارهای تصویربرداری سه‌بعدی، و تحلیل‌های اجزاء محدود پیشرفته، بررسی و آزمایش مفصل الگوی زیستی را ممکن می‌سازد. شبیه‌سازی‌های محاسبه‌ای براساس داده‌های سه‌بعدی می‌توانند بینش‌هایی را در رابطه با خصوصیات مکانیکی ویژگی‌های ریخت‌شناختی و سازگاری‌های ساختاری‌شان به‌دست دهند. مدل‌های سه‌بعدی و پارامترهای مادی خاص برای چنین تحلیل‌های محاسبه‌ایِ پیشرفته‌ای ضروری هستند. مدلی که اینجا مورداستفاده قرار گرفت براساس اطلاعات ثبت شده از برش‌نگاری ریز پرتو ایکس (میکروسی‌تی) است. این مدل پس‌پردازش شده است و هم یک شبکه‌ی چندضلعی و هم یک شبکه‌ی واکسل را تولید کرده است که شامل پارامترهای تراکم مواد است. مدل‌های شبکه‌ای همچنین می‌توانند براساس پراکندگی و ریخت‌شناسیِ صفحه‌ایِ توتیای دریایی ازجمله اتصالات بین صفحه‌های مجزا تقسیم شوند.

(*) 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. احمدی شلمانی، محمدحسین (۱۳۸۸) آشنایی با معماری بیونیک، تهران: نوآوران دانشگاه پارسه.

۲. احمدی شلمانی، محمدحسین (۱۳۸۸) معماری معاصر بیونیک، تهران: نوآوران دانشگاه پارسه.

۳. آنتونیادس، آنتونی (۱۳۸۱) بوطیقای معماری (آفرینش در معماری) تئوری طراحی: راهبردهای نامحسوس به سوی خلّاقیت معماری، ترجمه احمدرضا آی، تهران: انتشارات سروش.

۴. عرفانیان امیدوار، عباس (۱۳۷۶) آشوب در سیستمهای زیست شناختی، خبر نامه پژوهشکده سیستمهای هوشمند، شماره ویژه بهار.

۵. کیانی، مصطفی (۱۳۸۰) طبیعت در آثار معماران؛ نقش سمبلهای طبیعت و جهان هستی در نگاه فُرمال معماران، مجله معماری و فرهنگ، شماره ۸.

۶. کالینز، پیتر (۱۳۷۵) دگرگونی آرمانها در معماری مدرن، ترجمه حسن حسن پور، تهران: نشر قطره.

۷. گروبر، پترا (۱۳۹۹) معماری بیومیمتیکس، ترجمه هادی محمودی نژاد، تهران: طحان.

۸. گلابچی، محمود (۱۳۸۲) سازه نظام دهنده و تعیین کننده فُرم در معماری، مجله معماری و شهرسازی، شماره های ۷۳-۷۴.

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

۱۰. محمودی نژاد، هادی (۱۳۸۸) معماری زیست مبنا، تهران:انتشارات طحان با همکاری انتشارات هله.

۱۱. محمودی نژاد، هادی: الف (۱۳۹۹) معماری بیومیمیکری، تهران: انتشارات طحان.
۱۲. محمودی نژاد، هادی: ب (۱۳۹۹) معماری آغازیان و دوزیستان تهران:انتشارات طحان با همکاری انتشارات هله.
۱۳. محمودی نژاد، هادی:پ (۱۳۹۹) معماری بیومورفیک، تهران: انتشارات طحان با همکاری انتشارات هله.

14. Abou Chakra M, Stone JR (2011) Holotestoid: a computational model for testing hypotheses about echinoid skeleton form and growth. J Theor Biol 285:113–125
15. Alexander DE, Ghiold J (1980) the functional significance of the lunules in the sand dollar Mellita quinquiesperforata. Biol Bull 159:561–570
16. Almegaard H, Bagger A, Gravesen J, Jüttler B, Šír Z (2007) Surfaces with piecewise linear support functions over spherical triangulations. Proc Math Surf XII 4647:42–63
17. Arnout S, Firl M, Bletzinger KU (2012) Parameter free shape and thickness optimization considering stress response. Struct Multidiscipl Optim 45:801–814
18. Bagger A (2010) Plate shell structures of glass. Dissertation, University of Denmark
19. Blandini L (2005) Structural use of adhesives in glass shells. Dissertation, Universität Stuttgar
20. Bletzinger KU, Ramm E (1999) A general finite element approach to the form finding of tensile structures by the updated reference strategy. Int J Space Struct 14:131–145
21. Breitenberger M, Blenzinger KU, Wüchner R (2013) Isogeometric layout optimization of shell structures using trimmed NURBS surfaces. In: Proceedings of World Congress on Structural nd Multidisciplinary Optimization, Orlando, 19—24 May
22. Chilton J (2000) Heinz Isler. The engineer's contribution to contemporary architecture. Thomas Telford Ltd, Reston
23. Deb K (2011) Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Kan Gal Rep 2011003:1–24
24. Dimcic M, Knippers J (2011) Structural optimization of grid shells. In: Proceedings of The International Association for shell and spacial structures, London, 20—23 September
25. Eble G (2004) The macroevolution of phenotypic integration. In: Pigliucci M, Perston K (eds) Phenotypic integration, studying the ecology and evolution of complex phenotypes. Oxford University Press, Oxford, pp 253–273
26. Ellers O, Johnson AS, Moberg PE (1998) Structural strengthening of urchin skeletons by collagenous sutural ligaments. Biol Bull 195:136–144
27. Fildhuth T, Lippert S, Knippers J (2012) Design and joint pattern optimisation of glass shells. In: Proceedings of The International Association for Shell and Spacial Structures, Seoul, 20—24
28. Fildhuth T, Knippers J (2011) Geometrie und Tragverhalten von doppelt gekrümmten Ganzglasschalen aus kalt verformten Glaslaminaten. Stahlbau 80:31–44
29. Nebelsick JH, Dynowski JF, Grossmann JN, Tötzke C (2015) Echinoderms: hierarchically organized light weight skeletons. In: Hamm C (ed) Evolution

of light weight structures. Analyses and technical applications. Springer, Dordrecht, pp 141–154
30. Nichols D (1962) Echinoderms. Hutchinson and Co, London
31. Pearse JS, Pearse VB (1975) Growth zones in the echinoid skeleton. Amer Zool 15:731–753
32. Philippi U, NachtigallW(1996) Functional morphology of regular echinoid tests (Echinodermata, Echinoida): a finite element study. Zoomorphology 116:35–50
33. Ramm E, Bletzinger KU, Reitinger R (1993) Shape optimization of shell structures. Revue Européenne des Éléments 2:377–398
34. Raup DM (1959) Crystallography of echinoid calcite. J Geol 67:661–674
35. Raup DM (1968) Theoretical morphology of echinoid growth. J Paleo 42:50–63
36. Schmitt A, Schwieger V (2015) Quality control of robotics made timber plates. In: Fédération Internationale Géometès, Sofia, 17—21 May
37. Schultz H (2006) Sea urchins I: a guide to worldwide shallow water species, 3rd edn. Heinke and Peter Schultz, Hemdingen
38. Schwinn T, Menges A (2015) Fabrication agency: Landesgartenschau Exhibition Hall. Archit Des 85:92–99
39. Veer FA, Wurm J, Hobbelman GJ (2003) The design, construction and validation of a structural glass dome. In: Proceedings of glass processing days, Tampere, 15—18 June
40. Wang W, Liu Y (2009) A note on planar hexagonal meshes. In: Emiris IZ, Sottile F, Theobald T (eds) The IMA volumes in mathematics and its applications. Springer, New York, pp 221–233
41. Wester T (1990) A geodesic dome-type based on pure plate action. Int J Space Struct 5:155–167
42. Wester T (2002) Nature teaching structures. Int J Space Struct 17:135–147
43. Zachos LG (2009) A new computational growth model for sea urchin skeletons. J Theor Biol 259:646–657

چکـــــــــــــیده لاتین

Kiana Maleki- *PhD candidate, faculty of Art, Design and Architecture, University of University of South Australia, Australia*
Prof. Chris Pettit- *professor, faculty of Art, Design and Architecture, University of University of South Australia, Australia*
DR. Yavar Rostamzade- *assistant professor, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran*

Application of biomimetic architecture in building shells Morphology; case study: Modeling the skeleton of a sea urchin

Abstract

Man can find the answer too many of his questions through experience, experiment and research and creating new hypotheses. But maybe nature is the best reference to find these answers. Nature has all the answers and these are the people who gradually learn how to get answers from nature. Since the beginning of the 20th century, concrete structures with a double-curved shell have been used in architectural design and building construction. Integral shells show high stiffness because their geometry transfers loads through membrane forces; but these shells have largely been replaced by more cost-effective mesh systems. Since mesh systems are covered with flat glass or metal pieces, they do not achieve the structural efficiency of monolithic shells, nor do their architectural elegance manifest in a continuous curve. The highly adaptable sea urchin shell combines a modular, multi-layered shell with a flexible, curved, as well as smooth design of an integrated structure. It is a descriptive-analytical and laboratory research method that has been used for the application of biomimetic in the design of building shells. The findings of the research show that the structural efficiency of the sea urchin skeleton and its principles can be used for innovations and innovations in engineering sciences and architectural design, while at the same time they can be used to describe the biological adaptations and the structure of the sea urchin shell using Modern and well-established imaging techniques such as microCT (μCT), scanning electron microscopy (SEM), and various optical imaging techniques are reviewed.

Key words: *biomimetic architecture, Azamiyan, sea urchin, building shells.*

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the BOTHIGHA Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License.

نحوه ارجاع به مقاله:
مالکی، کیانا. پتیت، کریس. رستم زاده، یاور (۱۴۰۲) کاربست معماری بیومیمتیکس در پوسته‌های ساختمانی با الگوبرداری از اسکلت توتیای دریایی. بوطیقای معماری، ۳(۹)، ۹۵-۱۱۴.
DOI: 10.52547/ijba.9.2.6
DOR: 20.1001.1.28212398.1402.3.6.6.6
URL: www.ijba.ir/fa/downloadpaper.php?pid=154&rid=18&p=A