

## طراحی سازه‌های پیش‌ساخته و پایدار با رسوب نمک با الهام از الگوی بهینه‌سازی مصرف مصالح در استخوان تراپکولار انسان

مهندس آذین جلالی\*، دکتر محمود گلابچی\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵

### چکیده

معماری بیونیک، رویکرد نوینی در جهان معاصر است که از راه‌حل‌های پایدار طبیعت برای پاسخگویی به مشکلات انسان بهره می‌برد. برای حل مشکل استخراج بیش‌ازحد مصالح از محیط‌زیست که یکی از عوامل ایجادکننده ناپایداری در صنعت ساخت‌وساز و معماری است، به کشف و بازخوانی راه‌حل بهینه‌سازی مصرف مصالح در طبیعت پرداخته می‌شود. سازه‌های طبیعی، مانند استخوان انسان، به تدریج مصالح خود را از محیط استخراج می‌کنند. چگونگی شبیه‌سازی ساختار پیش‌ساخته هوشمند که توانایی تخریب و ترمیم خود را دارد و به‌مرورزمان با جذب مصالح از محیط اطراف خود، رشد می‌یابد ارائه می‌شود. آب‌های خلیج فارس و دریاچه ارومیه با بحران شورشدگی بیش‌ازحد مواجه‌اند. استخراج نمک، به‌عنوان مصالح تکمیل‌کننده، از آب‌شور و برگرداندن آب با غلظت کمتر، پایداری زیست‌محیطی این روش ساخت‌وساز را تأمین می‌کند.

### واژه‌های کلیدی

معماری پایدار، معماری بیونیک، بهینه‌سازی مصرف مصالح، رسوب‌گذاری نمک، خاصیت پیزوالکتریک استخوان

\* دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فناوری معماری بیونیک، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران. (مسئول مکاتبات)

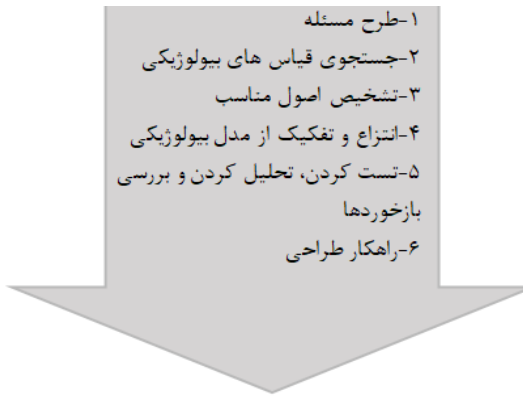
Email: azin.jalali@ut.ac.ir

\*\* استاد دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.

Email: golabchi@ut.ac.ir

## ۱-۱- مقدمه

انسان» نیز یک روش مبتنی بر مسئله یا طراحی به روش بالا به پایین محسوب می‌شود.



شکل ۱. روش بالا به پایین (Source: Speck et al., 2008)

امروزه واژه توسعه پایدار، حرکتی است برای نیل به توافق‌های بین‌المللی، که منافع همگان را محترم می‌داند و از یکپارچگی محیط‌زیست جهان و نظام توسعه حمایت می‌کند. یکی از اهداف توسعه پایدار، حفظ و ارائه بهتر محیط‌زیست و کاهش ائتلاف منابع و انرژی است (محمودی نژاد، ۱۳۹۰). بیونیک یا علم بررسی نظام حیات جانداران، امروزه به‌عنوان یکی از سه علم برتر جهان (بیونیک، آی تی، فناوری نانو) است. بیونیک علم سیستم‌هایی است که شالوده آنها سیستم‌های زنده‌اند و با خصوصیات سیستم‌های زنده را دارند یا به سیستم‌های زنده شبیه‌اند (ژراردن، ۱۳۹۰). بیونیک از تلفیق دو واژه «بیولوژی» و «تکنیک» به معنای دانشی است که مسائل فنی را از راه‌حل‌های زیستی پاسخ می‌دهد. بیونیک دانشی است که از ترکیب مفاهیم متفاوت علوم طبیعی و مهندسی شکل گرفته و با مطالعه سیستم‌های حیاتی پیچیده موجودات زنده و فرم‌های طبیعی، پاسخگوی خوبی برای حل مسائل فنی و ساختاری مهندسان است. هدف از مطالعه طبیعت، دستیابی به این نگرش سیستمی و نظام‌مند است که قدرت فهم و تحلیل و درک ساختارهای قاعده مدار موجود در طبیعت را فراهم می‌سازد.

## روش‌های طراحی بیونیک

### روش مبتنی بر مسئله یا روش بالا به پایین

### روش مبتنی بر راهکار یا روش پایین به بالا

این روش با این مراحل شکل می‌گیرد: (۱) نقطه شروع این فرایند، نتایج جدید و الهام‌بخش پژوهش‌ها و مطالعات پایه بیولوژیست‌ها است. (۲) تحلیل بیومکانیک و ریخت‌شناسی کاربردی یک سیستم بیولوژی. (۳) درک دقیق‌تر و گسترده‌تر از اصول و قوانین پنهان در پشت شکل‌ها، کاربری‌ها و ساختارهای بیولوژیکی به کمک تجزیه و تحلیل‌های کمی. (۴) انتزاعی نمودن که در آن اصول و قوانین کشف‌شده از مدل بیولوژی جدا می‌گردند. این بخش از مهم‌ترین و دشوارترین مراحل است زیرا باید بینش و شناخت عمیق اصول و قوانین طبیعت برای بهره‌گیری هرچه بهتر در کاربردهای فنی توسط افراد غیر بیولوژیست درک شوند. (۵) گام نهایی، به مسائل فنی اجرایشده که در ابتدا در مقیاس آزمایشگاهی و سپس در مقیاس مهندسی و واقعی انجام می‌گیرند می‌پردازد. (۶) تکنیک‌ها و روش‌های تولید صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا محصولات الهام گرفته‌شده از طبیعت با توجه به اولویت‌ها و هزینه‌ها، بهینه و وارد مرحله تولید شوند. (متینی، ۱۳۹۳) (شکل ۲)

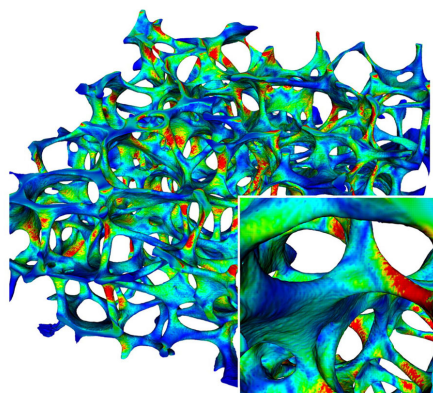
برای کشف سیستمی در معماری که به‌مرور زمان مصالح مورد نیاز خود را از بستر ساختش جمع‌آوری می‌کند، به پدیده‌های مشابه در طبیعت که همین رفتار را دارند باید مراجعه شود. پدیده‌های طبیعی مانند رشد اسفنج‌های دریایی، رشد استخوان و غیره می‌توانستند الگوهای فرض شده برای شروع تحقیق باشند. به کمک روش نمونه پژوهی، با بررسی اولیه الگوهای متفاوت رشد پدیده‌ها در طبیعت، الگوی رشد استخوان انسان که در جهت نیروهای وارده خود را رشد می‌دهد و مستحکم‌تر می‌کند، منطبق‌ترین نمونه با سؤال اصلی پژوهش انتخاب شد.

این روش با این مراحل شکل می‌گیرد: (۱) این فرایند به‌طور معمول با یک سؤال مهندسی آغاز می‌شود. (۲) جست‌وجوی الگوهایی از طبیعت که احتمال پاسخ به سؤال مطرح‌شده از طریق آنها وجود دارد. این مرحله با کمک و همکاری بیولوژیست‌ها انجام می‌شود. به‌طور معمول در این فرایند، غربالگری تعداد متفاوتی الگوی بیولوژیکی که بهترین شرایط را برای تولید ایده‌های پاسخگو به الزامات فنی سؤال مطرح‌شده را دارند، از طریق بیولوژیست‌ها و مهندسیین ارائه می‌شوند. (۳) انتخاب یک یا دو نمونه از امیدوارکننده‌ترین راه‌حل‌های بیولوژیکی و تجزیه و تحلیل بیش‌تر و بررسی‌های تجربی کامل‌تر برای اطمینان از نمونه‌های انتخابی. (۴) انتزاعی نمودن؛ که در این مرحله راه‌حل‌های یافته شده از الگوهای بیولوژی جدا می‌شوند. (۵) مرحله نهایی پس از انتقال موفقیت‌آمیز دانش برگرفته از طبیعت به حوضه معماری، بررسی قابلیت‌های پیاده‌سازی فنی، ارائه طرح‌ها و الگوهای اولیه و آزمایش آنها توسط مهندسیین است. در صورت موفقیت‌آمیز بودن آزمایش‌ها، محصول به‌دست آمده وارد مراحل تولید صنعتی می‌شود. البته فرایند بالا به پایین ممکن است در مراحل یادشده به‌طور کامل خاتمه نیافته و چرخه پژوهش‌های بیولوژیکی بعد از مراحل غربالگری اولیه، مجدداً برای چندین مرتبه تکرار شود. این امر گاهی اوقات برای تضمین یافتن یک الگوی مناسب بیولوژیکی که دارای اطلاعات موجود بیش‌تری بوده یا ما را به راه‌حل‌های بهتری هدایت کند، ضرورت دارد (متینی، ۱۳۹۳). (شکل ۱). «طراحی سازه‌های نیمه پیش‌ساخته و خود تکمیل‌شونده با الهام از الگوی رشد استخوان تراپکولار

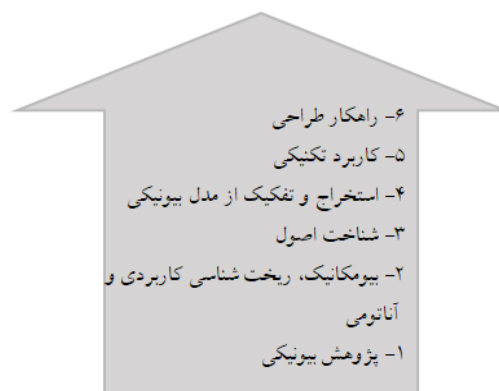
تشکیل‌دهنده اسکلت انسان است. استخوان به ریخت‌های گوناگون و اندازه‌های بسیار مختلف در بخش‌های اندام جای گرفته و سازه‌ی درونی و بیرونی پیچیده‌ای دارد. استخوان‌ها دارای وزن کمی هستند ولی محکم و پایدارند.

**استخوان‌های اسفنجی**<sup>۱</sup>: استخوان‌های اسفنجی که به آنها استخوان‌های تراپکولار<sup>۲</sup> هم می‌گویند. قسمت داخلی آنها از جنس بافت استخوان اسفنجی است. استخوان تراپکولار بسیار متخلخل است. استخوان اسفنجی یک ساختار سه‌بعدی پیچیده متشکل از اجزایی به نام تراپکولا است که از دیدگاه مهندسی عملکردی شبیه به تیرهای سه‌بعدی دارد. شکل میکروسکوپی استخوان اسفنجی به صورت تیغه‌هایی است که به صورت سه‌بعدی در کنار هم قرار گرفته‌اند. استخوان اسفنجی به خاطر همین فضاهای خالی، تراکم کمتری داشته و مانند اسفنج متخلخل است. درجهٔ تخلخل آن حدود ۹۰-۳۰ درصد است. در این استخوان‌ها مقدار و جهت قرار گرفتن تیغه‌ها بسته به نیروهایی است که به استخوان وارد می‌شود. هرچه استخوان تحت تأثیر نیروهای بیشتری باشد تراکم این تیغه‌ها بیشتر و تیغه‌ها قوی‌تر است. جهت قرار گرفتن تیغه‌ها هم در جهت و امتداد نیروهایی است که به استخوان وارد می‌شوند. سلول‌های سازنده استخوان این تیغه‌ها را در جهاتی می‌سازند و هم‌راستا قرار می‌دهند که استخوان با وجود داشتن کمترین وزن بیشترین مقاومت را برای تحمل نیروهای وارده به آن داشته باشد. (سلیمانی راد، ۱۳۹۴ *Keaveny, 2001; iranorthoped, 2016; daneshnameh* ; 2016)

در آزمایش‌های بسیار دقیق و شبیه‌سازی‌ها و اسکن‌های سه‌بعدی که دانشمندان از استخوان تراپکولار انجام داده‌اند مشخص می‌شود که توزیع استخوان و توزیع فضاهای خالی در بافت تراپکولار به گونه‌ای است که اجزا تحت کمترین تنش بارهای وارده را انتقال می‌دهند (*Acquaah 2015*). (شکل ۳)



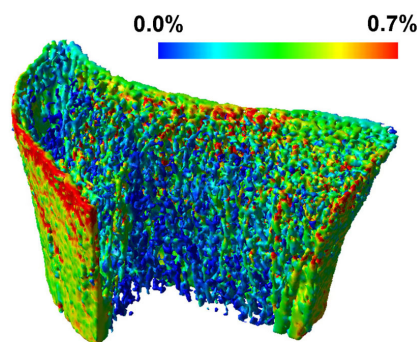
شبیه‌سازی توزیع تنش در استخوان تحت بارهای محوری



شکل ۲. روش بالا به پایین (Source: Speck et al., 2008)

### ساختارهای طبیعی و تکمیل شونده به‌مرور زمان

تعریف مسئله: هدف طبیعت استفاده از کمترین مصالح در عین دستیابی به بیشترین کارایی است. یکی از راهکارهای طبیعت در تولید ساختارها، که طی هزاران سال تکامل ایجاد شده، فراهم کردن ساخت مایه به‌مرور زمان است. تلاش این مقاله در ارائه‌ی پیشنهادی برای سازه‌های نیمه پیش‌ساخته است که به‌مرور زمان با جذب مصالح از محیط اطراف خود، رشد می‌یابند و خود را تکمیل می‌کنند. نمونه‌ی این ساختارها در طبیعت استخوان‌های بدن انسان است که به‌مرور زمان و با توجه به نیاز لازم از خون کلسیم و دیگر مواد آلی و معدنی را جذب می‌کند و در جهت بارهای وارده خود را تقویت می‌کند و رشد می‌یابد. برای الهام‌گیری و سپس طراحی چنین سیستمی ابتدا نیاز به شناخت بیشتر منبع الهام اولیه از طبیعت یا همان استخوان انسان، است. در ادامه شناخت پدیده طبیعی به انتزاعی کردن پدیده و سپس آماده‌سازی برای تولید صنعتی، سیستمی پیشنهاد می‌شود. شناخت بیشتر الگوی اولیه از طبیعت: استخوان جسم جامدی است که



نواحی قرمز حداکثر تنش و نواحی آبی حداقل تنش را دارند.

شکل ۳. بررسی توزیع تنش در استخوان انسان (Source: Van Lenthe, 2008)



شکل ۴. استفاده از پرینترهای سه بعدی و مصالح اولیه موجود در طبیعت (Source: Philippawagner, 2017)

## انتزاع و شبیه‌سازی

با آب بیش از حد شور شده محیط، به‌مرور زمان بلورهای نمک خلل و فرج اسکلت اولیه را متراکم‌تر و مقاوم‌تر می‌کند (شکل ۵)

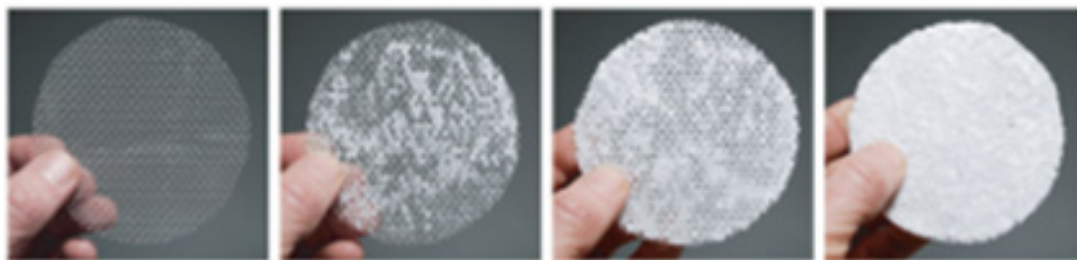
مزیت این روش در نوع نگاه به الهام‌گیری از طبیعت است. با نگاه به نحوه‌ی رشد استخوان انسان و اینکه در ابتدا بدن ساخت مایه کمی را برای اسکلت مصرف می‌کند و به مرور زمان ساخت مایه موردنیاز خود را جذب می‌کند این نوع از سازه‌های نیمه پیش‌ساخته نیز با مصالح ارزان‌قیمت و موجود در محیط به‌مرور زمان خود را تکمیل می‌کنند. مزیت دیگر این سازه‌های نیمه پیش‌ساخته در هماهنگی با اکوسیستم محل ساخت است و با گرفتن آب غلیظ از محیط و برگرداندن آب رقیق به اکوسیستم می‌توان اطمینان داشت که آسیبی به محیط‌زیست و اکوسیستم محل ساخت وارد نمی‌شود. (شکل ۶)

شبیه‌سازی شرایط رسوب‌گذاری: برای تشکیل نمک‌های تبخیری به شرایطی از قبیل حوضه مناسب رسوب‌گذاری (ماتریس پایه در استخوان)، تغذیه ماتریس با مقدار محدودی از آب شور علاوه بر شرایط مساعد آب و هوایی نیاز است. ذخایر تبخیری را تنها در مناطقی که میزان تبخیر بیش از بارندگی باشد می‌توان مشاهده نمود، این قبیل ذخایر در مناطق قاره‌ای، مناطق کم‌عمق حاشیه دریاها و بالاخره در آب‌های محدود بزرگ یا کوچک می‌تواند به وجود

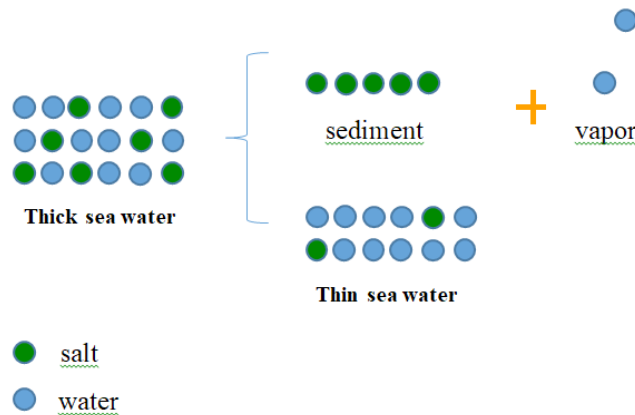
طبق اعلام سازمان محافظت از محیط‌زیست آمریکا، صنعت ساخت‌وساز ۴۰٪ از دی‌اکسید کربن جهان را تولید می‌کند. از بعد از انقلاب صنعتی بتن و آجر و سیمان ساخت مایه‌های اصلی این صنعت باقی‌مانده‌اند و با توجه به مشکلات زیست‌محیطی کنونی همه به دنبال راه‌حلی از طبیعت می‌باشند (Van Lenthe, 2008). پس از مطالعه کامل منبع الهام اولیه (پدیده طبیعی) و استخراج الگوهای رشد استخوان انسان، این فرآیند باید به مرحله شبیه‌سازی و سپس مرحله تولید صنعتی برسد. با توجه به مشکلات زیست‌محیطی که معماری و صنعت ساختمان سرمنشأ بسیاری از آن است، حتی‌الامکان راه‌حلی باید ارائه بشود که کمترین میزان آلودگی محیط‌زیست و کمترین میزان مصرف مصالح (برداشت از طبیعت) را در برگیرد.

شبیه‌سازی اسکلت اولیه: به کمک پرینترهای سه‌بعدی و استفاده از مصالح اولیه ارزان و در دسترس مانند شن‌های ساحل ساختار اولیه با تراکم حداقلی ساخته می‌شود. (شکل ۴)

شبیه‌سازی رشد استخوان اسفنجی: با قرار گرفتن این اسکلت اولیه کنار سواحلی مانند ساحل دریاچه ارومیه یا ساحل خلیج فارس و تغذیه ساختار



شکل ۵. مراحل رسوب‌گذاری نمک روی ماتریس پایه (Source: Inhabitat, 2016)



شکل ۶. دیگرام ساز و کار رسوب گذاری و رشد سازه، استفاده از آب غلیظ برای تامین شرایط رسوب گذاری و بازگشت آب رقیق به اکوسیستم

پس از جست‌وجو و مقایسه افزونه‌های<sup>۴</sup> موجود برای گرس هاپر، افزونه کوکون<sup>۵</sup> برای شبیه‌سازی انتخاب شد. سازه‌های فضا کار رایج از اعضای توپر یا مقاطع لوله‌ای استفاده می‌کنند. در این سیستم هر عضو از اعضای سازه فضا کار یک استخوان در نظر گرفته می‌شود که متخلخل ولی پایدار است که باید به‌مرور زمان با رسوب گذاری نمک خود را تقویت کند. نحوه فرم یابی هر عضو سازه‌ای به این شرح است. روش الف: ابتدا یک استوانه ترسیم می‌شود. سپس به‌صورت تصادفی تعداد زیادی نقطه روی پوسته آن انتخاب می‌شود. بین هر دو نقطه یک خط کشیده می‌شود. این خطوط اولیه همان ساختار اولیه یا ماتریس پایه تک‌بعدی است که توسط پرینترهای سه‌بعدی باید تولید شود. به کمک پلاگین کوکون می‌توان نحوه رشد و رسوب گذاری بلورهای نمک را روی ماتریس اولیه پیش‌بینی کرد. (شکل ۷)



شکل ۷. مدل سازی دیجیتالی الگوی رشد استخوان به کمک نرم grasshopper و پلاگین cocoon

آید (حلمی، ۱۳۸۳).

طبق شرایط ذکر شده این نوع از سازه‌های پیش‌ساخته را برای قرارگیری در مکان‌هایی از قبیل ساحل دریاچه ارومیه و حاشیه خلیج فارس، گزینه‌های مناسبی محسوب می‌شوند. هر دو مکان یادشده بر اثر آسیب‌های زیست‌محیطی بیش‌ازحد طبیعی شور شده‌اند و این روش ساخت‌وساز هرچند مشکل شورشدگی بیش‌ازحد این اکوسیستم‌ها را برطرف نمی‌کند اما می‌توان اطمینان داشت که نمک برداشت‌شده از آب منطقه نه‌تنها ضرری به اکوسیستم وارد نکرده بلکه در جهت تعدیل غلظت و شوری آب منطقه رفتار کرده است. برای رسوب نمک رطوبت نسبی محیط باید حدود ۸۰ باشد. برای افزایش رسوب گذاری نمک وجود ترکیبات ارگانیکی در حوضه رسوب گذاری لازم است. افزایش کلرور منیزیم در آب‌های شور با کاهش انحلال کلرور سدیم در آب همراه است و شرایط رسوب آن را مساعد می‌سازد. چون بیشترین میزان تبخیر در فصول خشک قبل از طلوع خورشید است لذا نمک در ساعات اولیه صبح رسوب می‌شود. بلورهای درشت نمک نشانه وجود آرامش در محیط رسوبی است و بافت دانه‌ای معرف محیط آشفته رسوب گذاری است. (حلمی، ۱۳۸۳) بنابراین برای تولید بلورهای سخت و شفاف نمک تزریق آب شور خارج‌شده از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن جنوب کشور باید به‌صورت آرام و هنگام صبح صورت بگیرد.

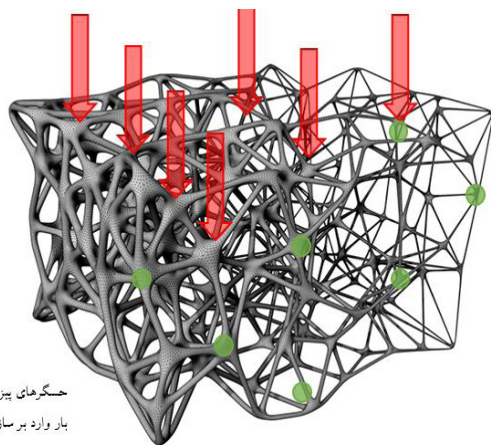
### شبیه‌سازی بافت استخوان

**مدل سازی رایانه‌ای:** پس از شناخت الگوی رشد استخوان تراپکولار و تبدیل مدل اولیه طبیعی (استخوان) به مدل انتزاعی، رسوب گذاری نمک روی ماتریس اولیه، نوبت به شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی به کمک نرم‌افزارهای سه‌بعدی سازی می‌رسد. برای تولید فرم‌های ارگانیکی و تنوع بخشیدن پارامتریکی به مدل سازی بهترین گزینه استفاده از نرم‌افزار گرس هاپر<sup>۳</sup> است.

## شبیه‌سازی الگوی رشد

**خاصیت پیزوالکتریک:** اثر پیزوالکتریک، قابلیت برخی از مواد و کریستال‌ها برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی است. تولید اختلاف پتانسیل الکتریکی در برخی بلورهای نارسانا مثل کوارتز تحت کشش یا فشار اثر پیزوالکتریک است. اثر پیزوالکتریک در کریستال‌ها برخی از سرامیک‌ها و اجسام زیستی مانند استخوان، DNA و پروتئین‌ها روی می‌دهد. (کلابچی، ۱۳۹۰) خاصیت پیزوالکتریک در استخوان به خاطر وجود کلاژن‌ها است. هنگامی که تعدادی از مولکول‌های کلاژن در یک جهت تحت فشار قرار بگیرند مقدار بار زیادی از داخل به سطح نمونه حمل می‌شود. اثر پیزوالکتریک به طور عمومی به عنوان یک حسگر نیروی بیولوژیکی عمل می‌کند. استفاده پیوسته از پتانسیل الکتریکی می‌تواند هم تخریب استخوان‌ها و هم رشد استخوان‌ها را (بسته به پلاریته یا قطبیت آنها) باعث شود. (Drake et al., 2009)

**شبیه‌سازی رفتار پیزوالکتریک:** بهینه بودن سازه‌ای بافت استخوان اسفنجی به خاطر پویایی و تغییر تراکم پیوسته آن تحت بارگذاری‌های متفاوت است و صرفاً یک شبیه‌سازی اولیه از بافت ارگانیک استخوان نمی‌تواند منجر به دستیابی به ساختار و رفتاری بهینه مشابه استخوان باشد. از آنجایی که مواد با خاصیت پیزوالکتریک توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را دارند می‌توان با تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی در بعضی نقاط سازه اختلاف دمایی ایجاد کرد که منجر به افزایش سرعت رسوب‌گذاری نمک در محدوده گرم‌تر، بشود. یعنی هوشمندی و قابلیت انطباق استخوان با بارگذاری وارد بر آن می‌تواند در این سازه‌های نیمه پیش‌ساخته به کمک حسگرهای پیزوالکتریک شبیه‌سازی شود و در نهایت سازه‌ای هوشمند با توانایی تقویت یا تضعیف خود در جهت بارهای وارده بشود. (شکل ۱۰)



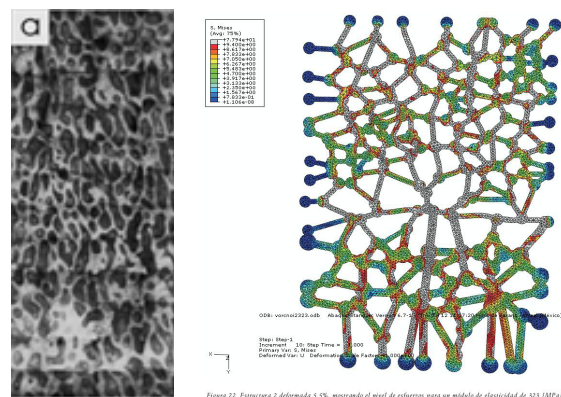
شکل ۱۰. بارگذاری بیش تر روی قسمت‌هایی از سازه منجر به تولید جریان الکتریکی و گرمای بیشتری توسط حسگرهای پیزوالکتریک شده در نتیجه در نواحی گرم‌تر تحت جریان دائمی آب شور، رسوب‌گذاری بیش تر می‌شود.

روش ب: در روش‌های قدیمی‌تر مدل‌سازی استخوان اسفنجی، با استفاده از مکانیک جامدات و شبیه‌سازی اجزای محدود با ماهیت تیر و صفحه صورت می‌گرفت. اما اخیراً تلاش‌هایی در جهت مدل‌سازی استخوان با شبیه‌سازی سلول‌های بی‌فائده در جامدات از طریق روش تقسیم‌بندی ورونوئی صورت گرفته است (Kowalczyk, 2003؛ Gan, 2005). شبیه‌سازی استخوان اسفنجی از طریق سلول‌سازی مسیرهای جریان نیروی بهتری را نسب به روش اجزای جدا هم از ارائه می‌دهد (Ruiz et al., 2017).

هر سطحی که به‌عنوان دیوار یا سازه‌ی دوبعدی موردنظر است را می‌توان با روش ورونوئی<sup>۲</sup> سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار گرس هاپر پوشش داد. خطوط اولیه و تولیدشده توسط الگوریتم ورونوئی همان ماتریس پایه دوبعدی یا داده‌ی ورودی پرنترهای سه‌بعدی می‌شود. (شکل ۸ و ۹)



شکل ۸. شبیه‌سازی بافت استخوان با استفاده از روش تقسیم بندی ورونوئی (Source: matsysdesign, 2016)



شکل ۹: سمت چپ تصویر میکروسکوپی بافت استخوان، سمت راست شبیه‌سازی بافت با استفاده از منطق و هندسه ورونوئی (Source: Ruiz et al., 2010) (cited in Ruiz et al., 2017)

جدول ۱. فرآیند طراحی (مأخذ: ستون اول و دوم: Helms, 2009)

| گام‌ها    | فرآیند طی شده در هر مرحله      | نمونه   |
|-----------|--------------------------------|---|
| گام اول   | تعریف مسئله                    | تولید سازه‌ای سبک و مقاوم                                   |
| گام دوم   | بیان دوباره مسئله              | استفاده از حداقل مصالح و حداکثر کارایی                      |
| گام سوم   | جستجوی راه حل بیولوژیکی        | فهم سازوکار استخوان انسان                                   |
| گام چهارم | تعریف راه حل بیولوژیکی         | استخوان انسان با وجود سبکی، بسیار مقاوم است                 |
| گام پنجم  | استخراج اصول                   | فرم متخلخل و الگوی رشد استخوان                              |
| گام ششم   | کاربرد این اصول - راهکار طراحی | تولید اجزای سازه‌ای مقاوم اما سبک با ساختار خودسازمان یافته |

## جمع‌بندی

اطراف خود، رشد می‌یابند پرسش اصلی این مقاله مطرح شد. با واکاوی این پدیده و به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و فناوری و ابزارهای جدید مانند پرینترهای سه‌بعدی این نوع از ساختارها برای ساخت‌وساز در آینده پیشنهاد می‌شود. محصول این مقاله ارائه ایده‌ای برای ساخت دیوارهای سبک که عمدتاً در فضاهای داخلی استفاده می‌شوند، است. البته برای جلوگیری از تحلیل نمک در مواجهه با حلال‌هایی مانند آب ممکن است برای استفاده در فضاهای خارجی، این ساختارها نیازمند یک پوشش محافظتی ضد آب باشد که در این صورت رشد و توانایی ترمیم و تخریب سازه و تطبیق‌پذیری با نیروهای وارده متوقف می‌شود. در سال‌های اخیر آب‌های خلیج فارس و دریاچه ارومیه با بحران شورش‌دگی بیش‌ازحد مواجه شده‌اند. هرچند انتظار نمی‌رود که روش پیشنهادی این مقاله مشکل شورش‌دگی خلیج فارس یا دریاچه ارومیه را حل کند اما می‌توان اطمینان داشت که استخراج نمک، به‌عنوان مصالح تکمیل‌کننده، از آب‌شور و برگرداندن آب با غلظت کمتر، پایداری زیست‌محیطی این روش ساخت‌وساز را تأمین می‌کند.

الهام‌گیری از طبیعت به معنی تقلید فرم‌های ارگانیک و طبیعی نیست بلکه الهام از طبیعت به معنی تقلید از پاسخ‌ها و راه‌حل‌های طبیعت برای حل مسائل است. در الهام از طبیعت می‌توان دو نوع برخورد با طبیعت داشت. یکی روش مبتنی بر راهکار (طراح ایده‌ای را از طبیعت می‌گیرد و سپس مسئله‌ای را در زندگی بشر ارتقا می‌دهد) و دیگری روش مبتنی بر مسئله (طراح با مسئله‌ای روبه‌رو می‌شود و در طبیعت به دنبال پاسخی مشابه با مسئله می‌گردد). پس در این نوع نگرش ابتدا به طبیعت توجه می‌گردد و سپس طراحی انجام می‌گیرد. «طراحی سازه‌های نیمه پیش‌ساخته و خود تکمیل‌شونده با الهام از الگوی رشد استخوان ترابکولار انسان» نیز یک روش مبتنی بر مسئله یا طراحی به روش بالا به پایین محسوب می‌شود. (جدول ۱)

## نتیجه‌گیری

معماری بیونیک، رویکرد نوینی در جهان معاصر است که از راه‌حل‌های پایدار طبیعت برای پاسخگویی به مشکلات انسان بهره می‌برد. در ابتدای مقاله مسئله ساخت‌وساز با استفاده از حداقل مصالح و حداقل آسیب به اکوسیستم محل ساخت مطرح شد. برای حل مشکل استخراج بیش‌ازحد مصالح از محیط‌زیست که یکی از عوامل ایجادکننده ناپایداری در صنعت ساخت‌وساز و معماری است، به کشف و بازخوانی راه‌حل‌های بهینه‌سازی مصرف مصالح در طبیعت پرداخته شد. یکی از این راه‌حل‌های طبیعت، برداشت و جمع‌آوری تدریجی مصالح از محیط است. سازه‌های طبیعی، مانند استخوان انسان، به تدریج مصالح خود را از محیط استخراج می‌کنند. راه‌حل طبیعت برای ساختارهای سبک، مقاوم و خود تکمیل‌شونده یا خود ترمیم‌شونده در استخوان انسان قابل‌بررسی و تبدیل به نمونه یا طرح‌ها و الگوهای اولیه معماری به نظر می‌رسید. چگونگی شبیه‌سازی سازه پیش‌ساخته هوشمند که توانایی تخریب و ترمیم خود را دارد و به‌مرورزمان با جذب مصالح از محیط

## پی‌نوشت‌ها

1. Cancellous bone
2. Trabecular bone
3. grasshopper
4. plugin
5. cocoon
6. Random
7. voronoi

## فهرست مراجع

- cancellous bone derived from finite element models of parameterized microstructure cells. *Journal of biomechanics*, 36(7), 961-972.
13. Ruiz-Cervantes, O., Lara-Ramírez, J. S., Ramírez-Díaz, E. I., & Ortiz-Prado, A. (2017). Trabecular bone modeling methodology using geometric representations. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 18(4), 379-387
14. Osvaldo, R. Rafael, S. Ramírez, E. Víctor, H. Ortiz, A. (2010). *Analysis of the architecture and mechanical properties of cancellous bone using 2D voronoi cell based models. Proceedings of the world congress on engineering*. 2010 Vol I WCE 2010. (June 30 - July 2). London, U.K.
15. Speck, T., Speck, O., Beheshti, N., & McIntosh, A. C. (2008). *Process sequences in biomimetic research. Design and Nature IV*, 114, 3-11.
16. Van Lenthe, G. H., & Müller, R. (2008). CT-based visualization and quantification of bone microstructure in vivo. *IBMS BoneKEy*, 5(11), 410-425.
17. *Iranorthoped*. (2016). Retrieved March, 2016. from <https://www.iranorthoped.ir/fa/news/2408>.
18. *Daneshnameh.roshd*. (2016) Retrieved March, 2016, from <https://www.daneshnameh.roshd.ir/mavara>.
19. *Matsysdesign*. (2016). Retrieved March, 2016, from <https://www.matsysdesign.com/self-organization>.
20. *Philippawagner*. (2017). Retrieved March, 2017, from <https://www.philippawagner.co.uk>
21. *Frontiersin*. (2016). Retrieved March, 2016, from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fendo.2015.00067/full>.
22. *Inhabitat*. (2016). Retrieved March, 2016. from <https://www.inhabitat.com/salt-crystalized>
۱. حلمی، فریده. (۱۳۸۳). شرحی بر نمک طعام - پتاس و پراکندگی آنها در ایران. تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران.
۲. ژراردن، لوسین. (۱۳۹۰). بیونیک - تکنولوژی از جانداران الهام می‌گیرد. (محمود بهزاد و پرویز قوامی، مترجم). چاپ چهارم. تهران: انتشارات سروش.
۳. سلیمانی راد، جعفر. (۱۳۹۴). بافت شناسی. چاپ پنجم. تهران: انتشارات گلبن.
۴. گلابچی، محمود؛ تقی زاده، کتابیون؛ و سروش نیا، احسان. (۱۳۹۰). نانوفناوری در معماری و مهندسی ساختمان. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۵. متینی، محمدرضا. (۱۳۹۳). بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای طراحی ساختارهای تغییرپذیر خم شو در معماری. نشریه هنرهای زیبا معماری و شهرسازی، ۲۰(۱)، ۶۷-۸۰.
۶. محمودی نژاد، هادی. (۱۳۹۰). معماری زیست مینا. تهران: انتشارات هله/اطحان
7. Acquaaah, F., Robson Brown, KA., Ahmed, F., Jeffery, N., & Abel, RL. (2015). *Early trabecular development in human vertebrae: overproduction, constructive regression and refinement*. *Front Endocrinol*. 6,67.
8. Drake, R., Wayne Vogl, A., Adam, W., & Mitchell, M. (2009). *Gray's anatomy for students*. London: Churchill Livingstone. Edition 40.
9. Gan, Y. X., Chen, C., & Shen, Y. P. (2005). Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, 42(26), 6628-6642.
10. Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 30(5), 606-622.
11. Keaveny, T. M., Morgan, E. F., Niebur, G. L., & Yeh, O. C. (2001). Biomechanics of trabecular bone. *Annual review of biomedical engineering*, 3(1), 307-333.
12. Kowalczyk, P. (2003). Elastic properties of



# Sustainable Prefabricated Structure Design by Salt Sediment Inspired by Material Distribution Optimization of Human Trabecular Bone

*Azin Jalali\**, M.A. of Bionic Architecture Technology, Faculty of Fine Arts, Tehran University, Tehran, Iran.

*Mahmoud Golabchi*, Professor, Department of Architecture, Faculty of Fine Arts, Tehran University, Tehran, Iran

## Abstract

Nature can be an interesting source of human inspiration for design and inventions. Man has been always related to the nature in different levels. Bionic Architecture is a new trend in contemporary world that benefits from sustainable nature's solutions for human problems. There are two main methods of bio inspired design, First: Bottom-Up or solution based method, Second: Top-Down or problem based method. The authors used Top-Down or problem based method to find the article's main question: How to design a sustainable self-growing and self-compacting structure which is cheap and uses minimum material. First there was problem of construction with minimum material usage and ecosystem damage, then human bone as an inspiring source was focused on, and abstracted form modeled by 3D printers can lead this basic prototype to industrial mass production. This article aims to find a solution for problem of over extracting materials from environment which is a factor of unsustainability in architecture and construction industry. It tries to discover the pattern of how structures optimize their material usage to build their selves. Natural structures extract needed materials from their context gradually, an example of these structures in nature is human bone that have balance between strength, weigh and material distribution. How to simulate this semi prefabricated, self-compacting and intelligent structure able to self-healing and self-destroying itself in essential parts and gradually extract material from its context environment grows and completes itself is the result of this article. The process of simulation from natural model to industrial sample is discussed in the main text. The process contains these steps: Discovering bone structure, Abstracting bone pattern, Simulating bone growth, and providing sediment phase. Bone structure can be simulated into two different ways. One of them is using random points as basic matrix and the other one is Voronoi pattern. Both of these methods can be modeled by Grasshopper plugin and Rhino software. After modeling abstracted Trabecular pattern as basic matrix, it can be made by 3D printers which use cheap and abundant material like sand. The basic sand matrix is put into over salinized water to become more and more compacted by time duration and salt sediments. The Piezoelectric property of the bone cells could be ignited by external forces is the basic cause of calcium ions absorption from bloodstream and calcium precipitation on bone matrix. Bone grows up according to the direction of the external force vectors. Simulation of this dynamic process in a smart structure that builds and destroys and repairs itself is proposed to use Quarts sensors which has the same piezoelectric feature and can simulate the behavior of bone calcium precipitation by making heat from the forces that have to bear and making heat as reaction. The material for process of structure growth is salt (sea salt). As the water of Persian Gulf or Lake Urmia is facing over salinization crisis, extracting salt from these over salty water and returning less salty water to its source can supply environmental sustainability of this kind of construction method.

**Keywords:** Sustainable Architecture, Bionic Architecture, Material Usage Optimization, Salt Sediment, Bone Piezoelectric Feature

\* Corresponding Author: Email: [azin.jalali@ut.ac.ir](mailto:azin.jalali@ut.ac.ir)