ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2023;13(3):86-101

Bio-inspiration from sponge for high-performance building

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Sima Heidarzadeh[1]
Mohammadjavad Mahdavinejad[2*]
Farah Habib[3]

How to cite this article

Heidarzadeh S, Mahdavinejad M, Habib F, Bio-inspiration from sponge for high-performance building, 2023 May 22, 13(3):86-101

1. Department of Architecture, Science and research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3. Department of Urbanism, Science and research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Correspondence*
Address: Department of Architecture, Tarbiat modares university, Tehran, Iran.

mahdavinejad@modares.ac.ir

Phone:

Article History
Received: 2021/01/11
Accepted: 2021/05/17
Published: 2023/09/23

ABSTRACT

Aims: Increasing energy consumption in the building and the use of construction materials with the increase in the amount of construction, causes environmental degradation and excessive consumption of fossil fuels. Nature has undergone its evolutionary process over the centuries and has reached its most optimal form, structure, and constituent materials. The goal of biomimicry is to be inspired by nature to increase efficiency with the help of sustainable solutions. The purpose of this study is to investigate and identify the capabilities of silica sponge for use in various building components to achieve the best possible options.
Methods: The collection of basic information is through the library and using the articles of valid and up-to-date scientific journals and the research method is descriptive-analytical. Theoretical concepts are expressed from the descriptive method and qualitative content analysis is performed.
Findings: The results of the research provide the possibility of inspiring siliceous sponge with special features at different levels of biomimicry for different components of the building and design and ideation of the form, structure, process, and function of the sponge in an optimal state in the direction of the bionic structure.
Conclusion: By analyzing the form, function, structure, process, and how the sponge interacts with its surroundings, which has reached its optimal form and structure in interaction with its surroundings over the centuries, we can come up with an idea for sustainability and synchronization, achieved mostly with the environment, minimum energy consumption in the building and having optimal components.

Keywords: sponge, bio-inspiration, energy efficiency, biomimicry, high-performance building

CITATIONLINKS

[1]Hosseini, Seyed Morteza, ... [2]Yanez, Andres Fernandez, ...[3]Amer, Nihal, Biomimetic ... [4]Lopez, Marlén, Ramón Rubio, ... [5]KURU, Aysu, Philip OLDFIELD ... [6]Sabry Aziz, Moheb, Amr Y ...[7]Martín- Gómez, César, Amaia ...[8]Aanuoluwapo, Oguntona Olusegun, ...[9]Nour ElDin. N, Abdou. A, Abd ElGawad. ...[10]Shahd, Merhan M., Mostafa M. ... [11]Gehan.A.N. Radwan & Arch. ... [12]Ehret, Severin, Biomimetic potential ... [13]Müller, Werner E.G., Sergey I. Belikov, ...[14]Martins, Eva, Miguel S. Rocha, Tiago H. ... [15]Fang, James K.H., Christine A. Rooks, ... [16]Hendry, Katharine R., Lucie Cassarino, ... [17]SANDFORD, FLOYD, Physical and Chemical ... [18]Schoeppler ,Vanessa, Elke Reich, Jean ... [19]Müller, Werner E.G., Xiaohong Wang, ... [20]Masse, Sylvie, Andrzej Pisera, ... [21]Werner E.G. Mu¨ ller, Xiaohong Wang, ... [22]Werner, Peter, Horst Blumtritt ,... [23]Müller, Werner... E. G., Heinz C. ... [24]Croce, Gianluca, Alberto ... [25]Binnewerg, B., M. Schubert, ...[26]Drozdov AL, Andreykin NA, Dorofeev AG, Structure and physico-chemical properties of organosilicon crystal-like composite spicules of the glass sponge Hyalonema sieboldi, Materials Research [27]URIZ, MARI´A-J., XAVIER TURON, ...[28]Botting, J.P., Muir, L.A., ...[29]PISERA, ANDRZEJ, Some ... [30]Tang, Qing, Bin Wan, Xunlai Yuan...[31]ZHANG, PENGYU, WEIGUO XU, ... [32] Nadhira A, Sutton MD, Botting JP, Muir LA, ... [33]Peel, John S. Sponge ... [34]Zhang, Yaqi, Bryan W. ...[35]Pineda, M.-C. et al. Effects ... [36]Sundar, Vikram C., Andrew ... [37]Aizenberg, Joanna, Vikram ... [38]Nkandu, Mwila Isabel, Halil Zafer ... [39]Kennedy, Emily Barbara, Biomimetic ... [40]ZHANG, PENGYU, WEIGUO XU, WEIXIN ... [41]Monn, Michael A., Haneesh Kesari, Enhanced ... [42] Kul'chin, Yu.N., O.A. Bukin, S.S. Voznesenskiy, ... [43]Yuan, Yanping, Xiaoping Yu, Xiaojiao Yang, Yimin Xiao, Bo Xiang, Yi Wang, Bionic building energy efficiency and bionic green ... [44]Eltaweel, Ahmad, Yuehong SU, Parametric .... [45]Mirniazmandan S, Rahimianzarif E ...

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

الهام‌گرفتن از اسفنج برای بهره‌برداری در ساختمان پربازده[1]

سیما حیدرزاده[1]، محمد جواد مهدوی نژاد[2]، فرح حبیب[3]

۱- گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- گروه معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
۳- گروه شهرسازی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

اهداف: مصرف روز افزون انرژی در ساختمان و استفاده از مصالح ساختمانی با افزایش میزان ساخت و ساز، موجب تخریب محیط زیست و مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی می‌شود. طبیعت در طی قرن‌ها فرآیند تکاملی خود را طی کرده و به بهینه‌ترین فرم و ساختار و مواد تشکیل دهنده خود رسیده است. هدف بایومیمیکری الهام گرفتن از طبیعت برای افزایش بازده با کمک راه‌حل‌های پایدار می‌باشد. هدف از انجام پژوهش بررسی و شناسایی قابلیت‌های اسفنج سیلیسی در راستای کاربرد در اجزای مختلف ساختمان برای دستیابی به بهینه‌ترین گزینه‌های ممکن می‌باشد.

ابزار و روش‌ها: جمع‌آوری اطلاعات اولیه به طریق کتابخانه‌ای و با استفاده از مقالات مجلات معتبر و به‌روز علمی بوده و روش تحقیق پژوهش بصورت توصیفی-تحلیلی است. مفاهیم نظری از روش توصیفی بیان شده و به تجزیه تحلیل کیفی محتوا پرداخته شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش امکان الهام از اسفنج سیلیسی با ویژگی‌های خاصش در سطوح مختلف بایومیمیکری را برای اجزای مختلف ساختمان فراهم کرده و طراحی و ایده‌پردازی از فرم، ساختار، فرآیند و عملکرد اسفنج در حالتی بهینه در راستای ساختمان بایونیک امکان‌پذیر می‌کند.

نتیجه‌گیری: با تحلیل فرم، عملکرد، ساختار، فرآیند و نحوه تعامل اسفنج با محیط اطرافش که در طی قرن‌ها در اعماق دریا به بهینه‌ترین فرم و ساختار خود در تعامل با محیط اطرافش رسیده، می‌توان به ایده‌ای در راستای پایداری و همگامی بیشتر با محیط زیست، مصرف حداقل انرژی در ساختمان و داشتن اجزای بهینه دست یافت.

کلمات کلیدی: اسفنج ، الهام‌گرفتن از طبیعت، بهره‌وری مصرف انرژی، بایومیمیکری، ساختمان پربازده

مقدمه

طبیعت همواره در مقابل تغییراتی که با آن مواجه بوده است ادامه حیات داده و سیستمی با کارایی بالا و تکامل همراه با سازگاری را در این تغییرات از خود نشان داده است. فرم و روند آن بر اساس تغییرات اقلیمی متفاوت بوده است (۱). با توجه به اینکه طبیعت به عنوان منبع انسانی عمل می‌کند، باید تحت حفاظت قرار گرفته و عملکردش به عنوان منبع الهام قرار گیرد (۲). طبیعت بیشتر از اینکه عملکرد فزاینده داشته باشد، به عنوان بهینه کننده در بخشهای مختلف از جمله در مصالح و انرژی مصرفی در راستای عملکرد مناسبتر از طریق فرآیند تکامل عمل می‌کند (۳).

اصطلاح بایومیمیکری و بایومیمتیک از لغت یونانی bios به معنی زندگی و mimesis به معنی تقلید کردن آمده است. بایومیمتیک به معنی "انتزاع از طراحی خوب طبیعت" یا "تقلید از عملکرد پایه فرم، فرآیند و سیستم ایجاد راه حل‌های پایدار" می‌باشد (۴). در تعریف بایومیمتیک، چند اصلاح وجود دارد: بایومورفیسم به معنی استفاده از فرم‌های بایولوژیک، بایوفیلیا به معنی اقتباس از طبیعت به عنوان بخشی از فرآیند طراحی، ایده گرفتن از طبیعت که شامل تمامی مسائل زیست محور، بایومیمیکری تقلید از حیات. استفاده از ویژگی‌ها و یا رفتارهای ریخت شناسی یا فیزیولوژیکی ارگانیسم‌ها در علوم غیر بیولوژیک، به عنوان بایومیمتیک شناخته می‌شود. علاقه روز افزونی به اقتباس از ارگانیسم‌ها در واکنش به تغییرات محیطی وجود دارد که این ویژگی‌ها منجر به تاثیر بر بخش‌های مختلف ساختمان مخصوصا نمای ساختمان پربازده می‌شود (۵). بایومیمیکری در ابتدا در ادبیات علمی ظاهر شد و سپس در میان دانشمندان حیطه مصالح بصورت عملی در سال ۱۹۸۰ توسعه پیدا کرد. هدف اصلی بایومیمیکری داشتن ایده‌های جدید با تقلید از طبیعت در تکاملش در ۳,۸ بیلیون سال در فازهای مختلف است(۶).

[1] این مقاله برگرفته از رساله دکتری سیما حیدرزاده با عنوان « پوسته‌های زیست سازگار براساس ساختمان‌های پربازده: سازوکار دستیابی به فرم کلی ساختمان با هدف بهینه‌سازی نور و انرژی از طریق سایه‌اندازی بازشوهای بناهای اداری تهران» به راهنمایی آقای دکتر محمدجواد مهدوی نژاد و مشاوره خانم دکتر فرح حبیب در دانشگاه آزاد علوم تحقیقات بوده و مسئول مکاتبات آقای دکتر محمدجواد مهدوی‌نژاد می‌باشند.

اتو اشمیت لغت بایومیمتیک را در سال ۱۹۸۲ بکار برد و جنین بنیوس در سال ۱۹۹۷ آن را احیا کرد. بایومیمتیک از طبیعت می‌آموزد و آن را در تکنولوژی پربازده بکار می‌برد(۳). محققان بسیاری در این حوزه مطالعه داشته‌اند. مثلا برای کاربرد معماری آن گوبر این تعریف را دارد: "مطالعه همپوشانی بیولوژی و معماری است که نشانگر ایده‌های نو برای مسائل و مشکلات معماری است" (۶). بنیوس بایومیمیکری را "یادگیری و تقلید از فرم، فرایند و اکوسیستم برای انجام طراحی پایدار" تعریف کرده است (۷). ال امین و طالب= معتقدند بایومیمیکری به عنوان راه حلی برای مشکلاتی که طبیعت از قبل با آن‌ها مواجه بوده است مناسب است زیرا انسان هم اکنون با کمک بهره‌گیری از این راه حل‌ها می‌تواند به مسائل خود فائق آید (۸). اگرچه حیوانات و گیاهان متنوعی مبنای الهام برای کاربردهای مختلف ساختمانی بوده‌اند، بسیاری از گونه‌های طبیعی بررسی نشده و منبع الهام قرار نگرفته‌اند(۹). بایومیمتیک استفاده از قوانین طبیعی به عنوان اساس و زمینه‌ی ریخت شناسی، سازه و عملکردهای موجود در طبیعت در مهندسی و ساختمان است(۳). بایومیمیکری شیوه‌ای برای جستجوی راه حل‌های زیست الهام به وسیله‌ی اقتباس از طبیعت در گذر زمان ایجاد شده است. بایومیمیکری قادر است عناصر معماری را با محیط زیست تلفیق کرده و به عنوان جزئی از اکوسیستم باشد(۱۰). پاول و نچتیگال بایومیمتیک در معماری را به اینگونه تعریف کرده‌اند که الهام از طبیعت در مرحله طراحی و فرآیند قابل تعریف است. بایومیمتیک ساختاری به بررسی نحوه ایستایی طبیعت با حداقل استفاده از مصالح می‌پردازد. بایومیمتیک فرآیندی به توصیف چگونگی عملکرد طبیعی در تطابق با محیط فیزیکی و شیمیایی می‌پردازد. راهکارهای بایومیمتیک معمولا برای عملکردهای محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع الهام گیری اقتباس از ارگانیسم معمولا بصورت پویاست اما ساختمان معمولا بصورت ثابت باقی می‌ماند بنابراین می‌تواند برای قسمت‌های متحرک ساختمان مورد استفاده قرار گیرد (۵). بنابراین استفاده از الهام گیری از طبیعت در پروسه سه مرحله‌ای انجام می‌پذیرد: تحقیق– انتزاع– پیاده سازی (۳). طبیعت خودش را با تغییرات محیطی تطبیق می‌دهد و این اتفاق در طول میلیون‌ها سال اتفاق افتاده است. تحول و انطباق طبیعت در مواجهه با مسائل در سه سطح بایومیمیکری: ریخت شناسی، فیزیولوژیکال و رفتاری رخ می‌دهد.

- **ریخت شناسی یا ساختاری:** این سطح مربوط به شکل، اندازه، الگو یا ساختار یک ارگانیسم و محیط اطراف آن و نحوه عملکرد آن برای بقا می‌شود.
- **فیزیولوژیکال یا عملکردی:** این سطح مربوط به فرآیند شیمیایی ارگانیسم است. یک ارگانیسم تمایل به تعادل داشتن در محیط اطراف خود دارد.
- **رفتاری:** این سطح مربوط به نحوه عملکرد ارگانیسم برای بقای آن است. در این سطح تعامل بین ارگانیسم و محیط اطراف آن یا محیط خارجی دیگرش می‌باشد (۳،۴،۵).

در هرکدام از این سطوح پنج جنبه تقلید وجود دارد. این جنبه‌های تقلید شامل چگونگی شکل (فرم)، چیستی مواد ساخت (مصالح)، چگونگی ساخت(نحوهی ساخت)، چگونگی عملکرد (فرآیند) و چه کاری انجام می‌دهد (عملکرد) می‌شود. در هر سطح این پنج جنبه می‌تواند به عنوان منبع الهام مورد بررسی قرار گیرد(۶،۹) .

استراتژی‌های بایومیمتیک معمولا از عوامل محیطی اقتباس می‌شوند. در مرحله ایده گرفتن ممکن است از موجود در حال حرکت و پویا باشد ولی ساختمان بصورت ثابت در محل خود باقی می‌ماند)۵(. در طی تاریخ معماران و طراحان به طبیعت به عنوان منبع الهام اجزای ساختمان خود نگریسته‌اند. در یونان باستان در ۰۰۵ سال قبل از میلاد مسیح فلاسفه به ارگانیسم به عنوان منبع الهام برای تناسبات و هماهنگی مسحورکننده بین اجزای تعریف کنندهی زیبایی توجه بسزایی داشتند. در آن زمان شیوهای که معماران به درک طبیعت و ایده گرفتن از فرم گیاهان و حیوانات می‌پرداختند، حائز اهمیت بود(۶). در سال ۱۴۸۲ماشین پرنده که

لئوناردو داوینچی ایده آن را از پرنده در حال پرواز گرفته بود از اولین مثالهای بایومیمیکری می‌باشد. نمونه اولیه‌ای که برادران رایت آن را در ۱۹۴۸ به هواپیما ارتقا دادند. اگرچه اصطلاح بایومیمیکری در ابتدا در سال ۱۹۸۲ ایجاد شد، در سال ۱۹۹۷ نویسنده و دانشمند بنیوس این اصطلاح را در کتابش به نام "بایومیمیکری: الهام گرفتن نوین از طبیعت" عمومی کرد. در سال ۲۰۰۷ کریس آلن به بنیوس و شوان برای ایجاد "پرسش از طبیعت" که اولین کتابخانه دیجیتال دنیاست که به معرفی راه حل‌های طبیعی پرداخته و طراحان می‌توانند اجزای طبیعی مورد نیاز خود را بیابند، پیوست(۱۱). در سالهای اخیر دیدگاه تکاملی برای درک طبیعت ایجاد شده و شیوه نگرش به طبیعت برای الهام را تغییر یافته است (۶).

اسفنج به عنوان منبع الهام

از قدیم همواره طبیعت به عنوان منبع الهام در مهندسی و طراحی ساختمان مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این منابع اسفنج است که در اقانوس بیش از ۷۰۰ میلیون سال دوام آورده که این ویژگی اسفنج را به عنوان قدیمی‌ترین حیوان زنده تعریف می‌کند. آنها نه تنها از مواد مغذی داخل آب تغذیه می‌کنند بلکه محلی برای سکونت موجودات هم‌زیست با خود هستند. بیشتر اسفنج‌ها یک اسکلت سخت داخلی ساخته شده از سیلیس بی شکل حاوی آب تبلور (SiO_2) دارند(۱۲). خانواده اسفنج به سه طبقه دسته بندی می‌شوند: دمواسپونج (اسفنج با اسکلت حاوی اسپیکیول‌های سیلیسی)، هگزکتینالید (اسکلت سیلیسی)، کلکرئا (اسکلت آهکی) (۱۳). دسته بندی اسفنج همچنان بحث برانگیز است، در دسته‌بندی دیگری به این سه دسته، هوموسکلرومورفا نیز به این سه دسته افزوده شده‌اند (۱۴).

تقریبا تمام اسفنج‌ها در محل خود ثابت هستند و برای تامین غذا آب را از داخل بدن خود عبور می‌دهند به این صورت که آب را از داخل بدن خود پمپ کرده و در حین این فرآیند مواد معلق داخل آب را استخراج می‌کنند (۱۲). چرخش کافی آب دریا و رساندن میزان کافی اکسیژن برای اکسیژن رسانی به داخل اسفنج‌هایی که محل سکونت مناسبی برای موجودات هم‌زیست میکروبی هستند، ضروری است(۱۵). در حین فرآیند پالایش آب، سلول‌های خاصی سیلیس یا کلسیم را از آب دریا استخراج کرده و آن را برای ساخت اسپیکیول‌ها که عناصر اسکلتی هستند، شکست مضاعف می‌کند(۱۴). انعطاف‌پذیری اسکلت اسفنج علت رشد اسفنج به سمت بالا بوده که بتواند به راحتی در ارتباط با آب دریا قرار بگیرد. اسفنج‌ها توانایی کنترل رشد بیش از اندازه خود را در مواجهه با ارگانیسم‌های مجاور داشته و می‌توانند فرم کلی خود را برای تامین نیازهای فیزیولوژیک خود با حداقل فعل و انفعال تغییر دهند. بنابراین اسفنج سیستم خود بهینه کننده‌ای است که خودش را با شرایط محیطی مانند نیروهای هیدرودینامیک، تهیه غذا و غلظت رسوبات معلق در آب را تطبیق می‌دهد(۱۲).

اسپیکیول سیلیسی

اسفنج‌ها عمده‌ترین گروه حیوانات هستند که در چرخه سیلیس دریایی به این علت که برای ساخت عضو اسکلتی خود یعنی اسپیکیول نیاز به اسید سیلیسی به حالت حل نشده دارند، مشارکت دارند. اسفنج‌ها سکونتگاه‌های کف دریا هستند و اسید سیلیسی حل نشده مورد نیاز خود را از ته دریا تهیه می‌کنند(۱۶). اسپیکیول در اسفنج مانند ساختار اسکلتی آن عمل می‌کند. اسفنج‌های سیلیسی گروهی از اسفنج‌ها هستند که اسکلتشان حاوی سیلیس بوده و دو دسته دمواسپونج‌ها و هگزکتینالیدها را شامل شده که به آن‌ها اسفنج‌های شیشه‌ای گویند(۱۲). در این دو گروه سیلیس هیدراته بصورت غیر متبلور شیشه‌ای است(۱۷).

دمواسپونج‌ها و هگزکتینالیدها مواد معدنی سیلیسی مورد نیاز برای اسکلت اسفنج را سنتز کرده و اسپیکیول شیشه‌ای که ساختار حمایتی حیوان را ایجاد کرده و آن را از شرایط محیطی مصون می‌دارد می‌سازند(۱۸). اسکلت اسفنج شیشه‌ای از جنس سیلیکات است به این علت که دریاهای نئوپروتوزوییک غنی از اسیدهای سیلیسی هستند، همچنین بصورت مداوم به وسیله‌ی سیلیکات ناشی از بارش‌های غنی از کربنات پر می‌شوند(۱۴،۱۹). شکل و نحوه

چیدمان اسکلت اسفنج تحت کنترل عوامل ژنتیکی است(۲۰). اسپیکیول‌ها از داخلی‌ترین قسمت خود که به آن رشته‌ی محوری گویند، شروع به رشد می‌کنند که در اطراف آن بایو سیلیکا با فرمول $SiO2•nH2O\ (n = 0.3)$ وجود دارد(۱۲،۲۱). اسپیکیول‌ها گاهی بصورت سوزن‌هایی پراکنده در در بدن اسفنج هستند. در مقیاس بزرگتر مثلا در هگزکتینالیدها اسکلت خارجی بزرگی از بهم پیوستن اسپیکیول‌های تکی بهم ایجاد می‌شود اما در بیشتر موارد آن‌ها بصورت منفک از بدن اسفنج و به کمک اسپونجین پروتئین به هم قفل شده یا پیوسته شده‌اند(۱۲). در اسفنج‌هایی با اسکلت سخت مانند Venus' Flower Basket اسپیکیول‌های جدای از هم ممکن است به سختی پیدا شوند. برعکس اسپیکیول‌هایی که با فاصله نسبت به هم متصل شده‌اند یا بصورت جداگانه از هم قرار دارند، بعد از مرگ یا از هم پاشیده شدن اسفنج در محیط اطرافشان پراکنده می‌شوند و تاثیرات اکولوژیکی بر محیط زیست خود می‌گذارند(۱۲).

اندازه اسپسکیول‌ها در دمواسپونج‌ها و هگزکتینالیدها برای ساخت اسکلتشان کاملا متفاوت است(۲۲). اسپیکیول‌ها به سه بخش تقسیم‌بندی می‌شوند: کانال محوری، استوانه محوری و قسمت سیلیسی(۲۱). در اسفنج‌ها اسپیکیول‌های تکی به هم به وسیله‌ی مولکول‌های رشته‌ای اسفنجی شکل یا پروتئین DUF در دمواسپونج‌ها یا با در هم تنیدن در هگزکتینالیدها متصل می‌شوند(۲۳). در دمواسپونج‌ها یک اسپیکیول از بایو سیلیکای فشرده با رشته محوری آلی با مقطع مثلث وجود دارد. نحوه قرارگیری سیلیس هیدراته شده بصورت دایره‌ای متحدالمرکز در اطراف رشته محوری است(۲۴). در بیشتر دمواسپونج‌ها مکانیزمی برای احیای مجدد قسمت‌های آسیب دیده بدن اسفنج یا برای رشد سه بعدی اسفنج در جایی که به سطح طبیعی متصل است وجود دارد(۲۵). برعکس اسپیکیول‌های هگزکتینالیدها در مقیاس میکرو از رشته‌های محوری که حاوی کانال مکعب شکل در مرکز خود است و در لایه‌ی بیرونی ساختار لایه لایه‌ای داشته که به وسیله‌ی میان لایه‌ی آلی نازکی در حدود ۵۰ نانومتر از هم جدا شده‌اند (۲۶) (۲۲).

رشته محوری

در تمامی اسپیکیول‌های سیلیسی، یک رشته محوری با قطر در محدوده‌ی lm وجود دارد که یک هسته مرکزی پر شده از مواد پروتئینی و یک کانال شامل مواد آلی در اطراف آن دارد(۲۷) (۲۲) (۱۶). وجود رشته محوری راهی برای شناسایی اسپسکیول اسفنج سیلیسی و تمایز قائل شدن اسپیکیول از کریستال غیرآلی یا ساختارهای بیولوژیکی غیر اسفنجی است(۲۸). در آن پروتئینی به نام سیلیکاتئین وجود دارد که حاوی ترکیبات آنزیمی سیلیس بوده و خاصیت کریستالی دارد(۲۹،۲۲).

هندسه‌ی اسفنج

اسپیکیول به عنوان اسکلت و ساختار اسفنج تاثیر بسزایی در فرم نهایی اسفنج دارد. فرم‌های متنوعی از اسپیکیول اسفنج در طبیعت وجود دارد. سه ویژگی اصلی در آن ضروری است. اولین ویژگی تقارن محوری است. تعداد محورها در اسپیکیول از یک تا چهار عدد و حتی بیشتر بسته به گونه‌ی آن متغیر است. بسته به تعداد محور اسپیکیول‌ها به تک محوری، سه محوری، چهار محوری، پنج محوری و غیره تقسیم‌بندی می‌شوند. ویژگی دوم ستاره‌ای شدن انتهای محورهاست. برای مثال اسپیکیول‌ها با تقارن مرکزی همگی به فرم ستاره‌ای هستند درصورتیکه برخی اسپیکیول‌ها چندین زیر بخش ستاره‌ای با شاخه‌های کوچکی در یک یا چندین جهت یا همه جهات دارند. سومین ویژگی تنوع فرم انتهای اسپیکیول است. بخش‌های انتهایی اسپیکیول در شکل‌های نقطه‌ای، دایره، خاردار و یا دارای انشعابات کوچک ستاره‌ای می‌باشد. بعضی اسپیکیول‌ها دارای بیش از یک محور هستند. در این گونه‌ها محورها دارای شعاع‌های مشابهی بوده اما در گونه‌های دیگر، محورها در صفحات دیگری قرار دارند. برخی از این‌ها نامنظم و بقیه در شکل‌های I, X, Y هستند(۳۰،۳۱).

ریخت‌شناسی رشد اسپیکیول بصورت خطی، شاخه‌ای و چندین شاخه‌ای می‌باشد. اسکلروسایت عملکرد هماهنگی شاخه‌شدن رشته محوری اسپیکیول را بر عهده دارد و آن را بصورت ژنتیکی کنترل می‌نماید(۱۶). شکل اسپیکیول بصورت سوزنی شکل یا شاخه‌ای بوده که فرم کلی را بصورت چهار محوری یا ستاره شکل و یا به شکل دایره که شعاع‌هایی از مرکز بیرون آمده‌اند دربیاورد. در تمامی این شاخه‌ها رشته محوری در مرکز قرار دارد. نحوه قرارگیری پروتئین درون رشته محوری اسپیکیول اسفنج‌های شیشه‌ای تقارن شش گوشه یا چهار گوشه را نمایان می‌دارد. بنابراین مقطع عرضی رشته‌ها در دمواسپونج‌ها در فرم‌های شش گوشه (شش گونه شبیه به سه ضلعی و اشکال مابین آن) می‌باشد. در مقابل آن مقطع عرضی در رشته‌ها در هگزکنینالیدها بصورت مربع شکل است (۱۸،۲۷،۳۲). با بررسی اندازه‌ی اسپیکیول اسفنج، دو نوع اسپیکیول وجود دارد: میکرواسکلر و مگااسکلر (۲۰). علاوه بر این اسپیکیول‌هایی در مقیاس متوسط تنها در خانواده هگزکتینالیدها وجود دارند که به آن‌ها مزواسکلر گویند(۲۷). میکرواسکلرها در مقیاس کوچکی بوده (۱– ۱۰۰ μm) و در ساختار اسکلتی عملکردی ندارند. مگااسکلرها بزرگتر بوده (از ۱۰۰ μm تا ۳ متر طول در مواردی مانند هگزکتینالیدها) و به عنوان ساختار اسکلتی عمل می‌کنند(۲۰). مگااسکلرها عوامل بنیادی برای ساخت اسکلت اسفنجی هستند(۱۲). یک ویژگی خاصی که در اسفنج‌های سیلیسی یافت می‌شود نحوه‌ی چیدمان سیلیس به دور کانال محوری است. تغییرات طول اسپیکیول از میکرومتر تا سانتی‌متر می‌باشد (۲۰،۲۷). اسپیکیول دمواسپونج‌ها و هگزکتینالیدها در تعداد محورهای تقارن مگااسکلرها متفاوتند. در هگزکتینالیدها اسپیکیول‌ها بصورت تک محوره و سه محوره بوده و نام‌گذاری این گروه به علت تعداد بازو (انشعابات) هگزکتینالیدها (شش بازویی) می‌باشد. در دمواسپونج این مساله بصورت تک محوره و چهار محوره می‌باشد (۲۷،۱۲،۳۲). در میکرواسکلرها شکل و طبقه‌بندی اسپیکیول بر طبق محورهای تقارن متغیر است. در این مقیاس شش طبقه‌بندی مانند نقطه‌ای، گرد شده، مستقیم و منحنی ... وجود دارد(۱۲). با مرور رابطه بین شکل نهایی اسفنج و اسپیکیول آن که نقش اسکلت آن را ایفا می‌کند، در دمواسپونج‌ها فرم و چیدمان اسپیکیول نشانگر فرم نهایی اسفنج می‌باشد. اما در هگزکتینالیدها اسپیکیول‌ها به هم قفل شده یا به هم می‌پیوندند تا یک اسفنج حجیم را شکل داده و شکل تک اسپیکیول با هندسه‌ی کلی اسفنج متفاوت است(۲۷). اشکال هندسی منظم اسفنج‌های دریایی شامل لوله‌ای، شاخه‌دار، بادبزنی، کروی و بی شکل است (۱۴).

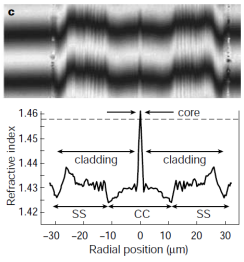
انتقال نور در اسفنج

یکی از ویژگی‌های اسپیکیول که عملکرد اسفنج را مانند فیبر می‌کند، انتقال نور در مقیاس میکرو و نانو است(۴۱). اسفنج‌ها فاقد سیستم عصبی بوده و نسبت به نور محیطی با عکس العمل متابولیک واکنش نشان داده و نور با طول موج ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر را انتقال می‌دهند(۲۳). در عمق دریا شدت نور بسیار کم بوده و اسپیکیول‌ها در ابعاد مختلف طول موج‌های مخصوصی را انتقال داده و کارایی انتقال نور در آن‌ها ۶۰٪ است(۲). اسپیکیول نور محیطی را جمع‌آوری کرده و آن را به قسمت‌های مرکزی اسفنج منتقل می‌کند (۲۳). اسفنج در بدنش میزان هم‌زیست‌های میکروبی است که با هم هم‌زیستی دارند. موجودات هم‌زیست داخل اسفنج برای تهیه مواد غذایی و انرژی برای اسفنج نیاز به جذب نور منتقل شده از داخل بدن اسفنج بوده و برای اسفنج به ازای داشتن محل امن برای زیست، مواد مغذی ایجاد می‌کنند(۳۵). برومر و همکارانش با کمک از قرار دادن کاغذ حساس به نور در داخل اسفنج و تاباندن نور به آن، نقاط تیره‌ای بر روی کاغذ مشاهده کردند که نشانگر توانایی انتقال نور از طریق اسپیکیول بود. در این سیستم روشنایی نور خورشید به عنوان منبع نور عمل کرده، اسپیکیول‌ها به عنوان انتقال دهنده‌ی نور و کریپتوکروم به عنوان دریافت‌کننده‌ی نور عمل می‌کند(۱۲).

ویژگی‌های مکانیکی و نوری اسپیکیول می‌تواند منبع خوبی برای الهام گرفتن برای ساخت فیبرهای نوری می‌باشد. مطالعات بسیاری بر روی انتقال نور در اسفنج‌های شیشه‌ای شده است. اسپیکیول‌های

هگزکتینالیدها نور با طول موج بین ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر را از میان خود عبور داده و در این میان رنگ سفید را به رنگ قرمز تبدیل می‌کنند اما در دمواسپونج‌ها کیفیت نور بی‌تغییر باقی می‌ماند. مقطع اسپیکیول از اجزای مختلفی تشکیل شده است که شامل رشته محوری، استوانه مرکزی و لایه سیلیسی در قسمت خارجی خود است و هر قسمت ساختار شیمیایی متفاوتی دارد: هسته مرکزی؛ سیلیس خالص، استوانه مرکزی؛ مواد آلی و پوسته خارجی؛ مواد آلی به حالت دایره‌ای نسبت به مرکز. تفاوت بین ویژگی‌های شیمیایی لایه‌های اسفنج منجر به تفاوت بین ضریب شکست نور می‌شود (۱۲). بررسی ضریب شکست نور در اسپیکیول نشانگر سه ناحیه است که هرکدام مربوط به یک قسمت از مقطع اسپیکیول است. هسته اسپیکیول در قسمت میانی بیشترین ضریب شکست، استوانه مرکزی دارای ضریب شکست کمتر و برای خارجی‌ترین قسمت اسپیکیول، ضریب شکست نوسان‌دار است. اسپیکیول‌ها جایی که بیشترین میزان ضریب شکست را در مقطع خود دارد، نور را عبور می‌دهد سپس می‌تواند به عنوان انتقال دهنده نور تک یا چند حالته عمل کند. وقتی نور به اسپیکیول می‌رسد، اکثر آن از طریق هسته‌ی اسپیکیول با ضریب انعکاس بالا عبور کرده و به عنوان فیبر چند حالته عمل می‌کند و نحوه کارکرد آن منبع الهام مناسبی برای فیبرهای مخابراتی است (۳۶). سیگنال‌های نوری از قسمت مرکزی عبور کرده اما در قسمت خارجی کمترین میزان انتقال را داراست. در قسمت خارجی نور به سمت داخل انعکاس پیدا کرده و در قسمت گره‌ها به سمت خارج منتشر می‌شود. در انتهای گره‌ها زاویه‌ی تقاطع حدود ۹۰ درجه نسبت به نور است بنابراین نور به سمت محیط منتقل می‌شود پس گره‌ها به مثابه نقاط درخشانی در اعماق دریا دیده می‌شوند(۳۷).

جدول ۱- ضریب شکست نور در مقطع اسپیکیول (ماخذ: نگارندگان)

مقطع اسپیکیول	جنس لایه	انتقال نور	
هسته مرکزی	پروتئین	ضریب شکست بالاتر از سیلیکای شیشه‌ای	
استوانه مرکزی	مواد آلی	ضریب شکست بسیار کمتر از هسته مرکزی	
پوشش خارجی	$SiO_2 \cdot nH_2O$ (n = 0.3)	ضریب شکست نوسان کننده، بیشتر از استوانه مرکزی، به سمت خارج به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد	

در بعضی از انواع اسفنج مانند اسپیکیول دمانکولا در قسمت خارجی اسفنج مانند کلکتور عمل کرده و نور را از محیط اطراف خود از طریق برآمدگی‌های بیضی یا دایره خود جمع‌آوری کرده و آن را به درون بدن اسفنج انتقال می‌دهند. این موضوع ارتباطی به محدوده طیفی نور ندارد. اسپیکیول نور را به کریپتوکروم که حساس به نور است انتقال می‌دهد. اسپیکیول‌ها همچنین می‌تواند نور آبی، نور بایوژن را وقتی در معرض قرارمی‌گیرد، انتقال دهد. با انجام مطالعات این نتیجه دست یافته شده که اسفنج می‌تواند نور را جذب، جمع‌آوری، منتقل و تبدیل کند(۲۶).

الهام گرفتن از اسفنج در ساختمان تقلید از فرم، سیستم و فرآیند طبیعی فرصتی برای افزایش کارایی و درعین حال کاهش تاثیرات منفی بر محیط طبیعی است. بایومیمیکری شبیه سازی یا تقلید از طبیعت در بسیاری فرم‌ها، سیستم‌ها و فرآیندها برای حل چالش‌های دنیای امروز است. بایومیمیکری برای بهینه‌سازی در مباحث پایداری و مخصوصا کارایی در زمینه‌ی طراحی و ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثال‌های اولیه بایومیمیکری در طرح‌های سریع داوینچی از ماشین پرنده است که از بال خفاش ایده گرفته است. مثال دیگر فیلیپو

برونلسکی است که مطالعاتی بر روی پوسته تخم مرغ داشت و گنبدی نازک‌تر و سبک‌تر برای کلیسای جامع فلورانس در سال ۱۴۳۶ طراحی کرد. در ۱۸۰۹ سر جرج کیلی بدنه کشتی ساده و موثرتری را از روی مطالعه دلفین ساخت(۳۸). بسیاری از مردم شیفته ستون‌های کلیسای ساگرادا فمیلیای گائودی با شاخه‌های درخت متقارن و موتیف‌های گوش‌ماهی شکل که به صورت گسترده در آن استفاده کرده، هستند(۳۹).

فرم‌های بایولوژیکی مانند استخوان، فیلوتاکسیز، ساختار مشبک چوب و غیره بصورت کامل بررسی شده و امکان ایده گرفتن از آن‌ها مورد تحقیق قرار گرفته است. اسپیکیول اسفنج قابلیت توسعه برای فرم‌های معماری را داراست. اسفنج به عنوان نمونه اولیه برای سطوح مینیمال و مدلسازی پارامتریک مورد استفاده قرار گرفته است(۴۰). در ادامه چند مورد امکان‌سنجی و نمونه موردی در ساختمان الهام گرفته از اسفنج و تحلیل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱- اسپیکیول اسفنج به مثابه تیر ساختمانی

سازه اسفنج دریایی یوپلکتلا اسپرگیلوم(E.a.) یا همان فلوور بسکت به عنوان منبعی ارزشمند برای مطالعه ویژگی‌های ساختاری به شمار می‌رود. اسکلت *E.a.* اسپیکیول‌های استوانه‌ای شکل قفسه شکلی دارد. زمانی که اسپیکیول‌ها به شکل قفسه طور برای ایجاد ساختار مشبکی محکمی به هم می‌چسبند، اسپیکیول‌هایی طره مانند به هم متصل شده تا اتصال مناسب و تکیه گاه محکمی بین کف دریا و ساختار اسفنج ایجاد کنند. اسپیکیولهایی که عملکرد لنگر مانند و اتصال دهنده به زمین را دارند، ساختار لایه لایه شکلی دارند. با توجه به اینکه نحوه عملکرد اسفنج به این صورت است که اسفنج برای دریافت مواد مغذی از آب، آب دریا را از درون بدن خود پمپ می‌کند. در جریان این فرآیند اسفنج باید بطور مناسبی به کف دریا متصل شده باشد. قسمت‌های غیر متصل و انتهایی اسپیکیول *E.a.* دارای برآمدگی‌هایی است. اسفنج‌ها توانایی ایجاد اسپیکیول در فرم‌های متنوعی را دارا هستند(۴۱). اسپیکیول اسفنج دریایی عناصر اسکلتی هستند که به عنوان لنگر و متصل کننده به زمین علاوه بر دیگر عملکردهایشان، عمل می‌کنند. ساختار لایه لایه و سلسله مراتبی اسپیکیول که از عناصر مختلفی در مقطع تشکیل شده‌است، باعث افزایش مقاومت در برابر شککندگی شده و حالت ارتجاعی اسفنج را در مقابل شرایط متغیر دریا مقاوم می‌کند(۳۴). با کمک مقاومت خمشی موثر در اسپیکیول در این مقطع با شبیه سازی با تیر یکنواختی با همان انحنا و مقطع اسپیکیول می‌توان به تعریف مناسبی برای تیر رسید. هندسه اسپیکیول *E.a.* باعث ارتقای مقاومت خمشی شده که اتصال قوی‌تری با کف دریا ایجاد می‌کند(۴۱). در همین راستا و با کمک بررسی نحوه اتصال به زمین و مقطع اسپیکیول در آن محل، می‌توان به طراحی پایدار و همگام با طبیعت در مقاطعی که تیر نیاز به مقاومت لنگر خمشی دارد، دست یافت.

۲- اسپیکیول اسفنج به مثابه سازه ساختمان

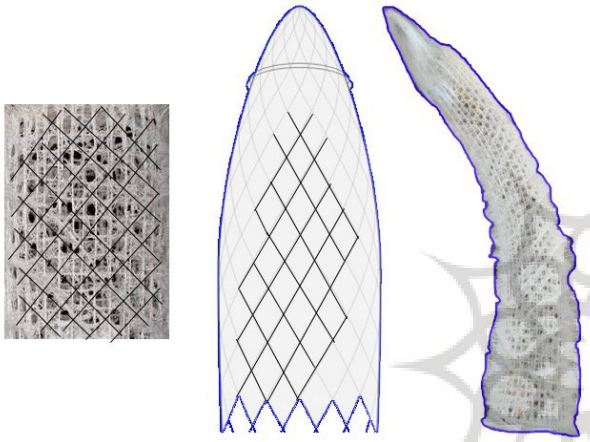
چیدمان نانوساختار بدن اسفنج دریایی یک منبع بی‌انتها برای الهام در زمینه‌های آیرودینامیک، بایونیک، معماری، سازه و ساخت بایومصالح می‌باشد. یکی از چندین ویژگی اسفنج، ساختار اسکلتی اسفنج است که برای مطالعات مهندسی کاربردی است. توسعه روزافزون تکنولوژی در علوم مهندسی می‌تواند مزایای بسیاری با کمک مطالعه بر روی ساختارهای بایولوژیک و طراحی هوشمند بر روی اسفنج‌های دریایی داشته باشد. اسفنج دریایی ساختاری متخلخل و متصل داشته و سیستم آبی آن شبیه ساختار تروبیکیولار شبکه استخوانی است. به واسطه وجود اسپیکیول، برخی اسفنج‌ها ساختار سختی دارند که به آن‌ها سختی و استحکام مناسب در راستای ویژگی‌های مکانیکی یک عضو می‌دهد که برای یک ساختار چارچوبی مناسب است. سختار پیچیده‌ی اسپیکیول ویژگی‌های مکانیکی شگفت‌انگیزی دارد که برای یک مصالح با پایه شیشه بسیار قابل توجه است. انعطاف‌پذیری، مقاومت و سختی بالا، به همراه گسیختگی کم این ترکیب آلی/غیر آلی را بسیار کارامد کرده است. ساختار بدن اسفنج دریایی می‌تواند به عنوان ساختار متخلخل طبیعی که تاکنون با استفاده از استخوان مورد مطالعه قرارگرفته،

مورد استفاده و مطالعه قرار گیرد (۱۲،۱۴). با توجه به این ویژگی‌ها و لایه لایه بودن ساختار اسپیول در اسفنج می‌توان از آن برای ساختار و اسکلت ساختمان دست یافت.

برج گرکین، لندن، انگلیس، (۲۰۰۳)، (30 St Mary Axe A.K.A Gherkin Tower)

این ساختمان در لندن بوده و به ساختمان گرکین یا سوییس ری معروف است و فرم ساختار آن از اسکلت اسفنج دریایی الهام گرفته شده است (۳۹). منبع الهام این ساختمان اسفنج ونوس فلوور بسکت است که این اسفنج در اعماق دریا به کف درای به صورت مناسبی متصل شده که در مقابل جریانات شدید زیر آب مقاومت خوبی دارد و اسکلت خارجی مشبک آن به همراه شکل دایره‌ای می‌تواند در مقابل فشار زیاد ناشی از جریان آب محیط اطراف مقاومت مناسبی از خود نشان دهد. در ساختمان گرکین کنج‌های گرد شده به باد اجازه حرکت راحتی در اطراف ساختمان می‌دهند و در عین حال فشار باد زیادی را به عابران پیاده اطراف ساختمان اعمال نمی‌کند. به این علت که هوا در اطراف یک استوانه نسبت به یک مستطیل که کنجدار است راحت‌تر می‌تواند عبور کند، معمار این ساختمان نرمن فاستر از این ویژگی برای سیستم تهویه طبیعی برای ساختمان بهره برده است. با الهام گرفتن از ساختار شش ضلعی ونوس فلوور بسکت، اسکلت اصلی ساختمان سازه دیاگرید آلومینیومی با روکش استیل است. دیاگرید ارتفاع برج را به مدول‌هایی تقسیم کرده است.

طراحی این برج چند مزیت عمده را داراست. اولا ساختمان کمترین تاثیر منفی را بر عابران پیاده به علت فرم ایرودینامیک خود داراست که باعث می‌شود باد به آرامی از کنار عابرین عبور کند. دومین مزیت آن طراحی و اجرای کارامد گرمایش، سرمایش، تهویه و سیستم روشنایی غیر فعال با کمک دو پوسته کردن نمای ساختمان است. علاوه بر این استفاده از دال‌های کف چرخیده باعث ورود بهتر نور به داخل فضا و تهویه مناسب فضا می‌شود (۳۸). در این ساختمان نحوه الهام‌گیری از ساختمان بصورت فرمی بوده و الهام‌گیری آن از سطوح بایومیمیکری در سطح ارگانیزم یا ساختاری می‌باشد که از فرم ساختار اسپیکیول اسفنج ایده گرفته و به اسکلت مناسب برای ساختمان دست یافته. رویکرد طراحی در آن از رویکرد بالا به پایین (Top-down Approach) می‌باشد، به این صورت که در ابتدا موضوع طراحی مساله طراح بوده، سپس در مرحله بعد به دنبال راه حل عملی در طبیعت برای این صورت مساله جستجو می‌شود. اصول حاکم بر آن سوال مورد بررسی قرار گرفته و مدل مناسبی از طبیعت استخراج می‌شود. در نهایت هم ایده مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفته و راه حل طراحی ایجاد می‌شود.



شکل ۱- ایده فرم کلی و تقسیمات سازه برج گرکین از اسفنج دریایی

۳- ساختار اسفنج به مثابه تامین‌کننده روشنایی و نور روز ساختمان

۳-۱- استفاده از ساختار اسپیکیول برای ساخت فیبر نوری

فیبر نوری که براساس عملکرد اسپیکیول طراحی شده باشد نسبت به فیبرهای سیلیسی شناخته شده مزایای بسیاری از جمله ویژگی مکانیکی بهتر آن‌ها دارد. علاوه بر این مطالعه بر روی فیبرهای نوری می‌تواند ما را در یافتن راه‌حل‌های ساده‌تر در راستای فرآیند تکنولوژیکی پیشرفته امروزه و توسعه‌ی تکنولوژی فیبر نوری یاری رساند(۴۲). از لحاظ مکانیکی، در یک فیبر نوری می‌توان شکل‌گیری پروتئین را با انعطاف‌پذیری و مقاومت سیلیکا ادغام کرد. در مقایسه

با ویژگی نوری فیبر نوری کوارتز دارای انکسار مضاعف ضعیف‌تری هستند. پوشش چند لایه‌ی اسپیکیول اسفنج‌های شیشه‌ای که ساخته طبیعت است، شباهت زیادی با فیبرهای نوری معاصر دارد. قطر هسته و ضخامت لایه‌های خارجی بسیاری از اسپیکیول اسفنج‌های سیلیسی برای کاربردهای نوری در طول موج اینفرارد، نور مرئی و فرابنفش مناسب است.

۲-۳- استفاده از ساختار اسپیکیول به عنوان انتقال دهنده نور در ساختمان

عملکرد انتقال نور در سولارتیوب و فیبر نوری مانند اسپیکیول اسفنج می‌باشد. اسپیکیول‌ها توانایی جمع‌آوری نور بسیار ضعیف را با کمک برآمدگی‌های دایره‌ای /بیضوی خود دارند و نور را از طریق اسپیکیول به بخش‌های داخلی موجود می‌رسانند. اسپیکیول در سطح حیوان همانند جمع‌کننده نور عمل کرده و سپس نور را به کریپتوکروم منتقل می‌کند. به این ترتیب نور از طریق اسپیکیول به داخل انتقال پیدا کرده و از خارج به داخل بدن اسفنج انتقال می‌یابد.

برطبق CIE 173 کمیسیون بین المللی روشنایی، نور طبیعی می‌تواند نیاز ۲۵ تا ۵۰٪ نور معمولی یک فضای اداری را در ساعت اداری تامین کند. نور طبیعی با صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌تواند از طریق اجزایی مانند شیشه پنجره، سیستم لوله‌ای انتقال دهنده نور، ... به روشنایی فضای داخلی از بیرون به داخل ساختمان از طریق اجزای ساختمان انتقال یابد. برای انطباق بهتر با حرکت خورشید، و شدت نور مختلف در ساعات روز، دستگاه‌های مختلفی برای مسیریابی حرکت خورشید با هدف استفاده حداکثری از نور خورشید و کاهش مصرف انرژی ساختمان وجود دارد. در این ساختار روشنایی با فیبر نوری، نور به وسیله‌ی کلکتورهای خارج ساختمان جمع‌آوری شده و سپس به داخل ساختمان از طریق فیبر نوری منتقل می‌شود، در انتها نور منتقل شده به هرگوشه‌ی دلخواه ساختمان منتقل می‌شود. در این راستا شیوه‌های مختلفی برای استفاده از این روش و انتقال نور خورشید به داخل ساختمان وجود دارد که یکی از معمولترین آن‌ها سیستم فیبر نوری آفتابگردان در ژاپن است. این سیستم مجهز به سیستم اتوماتیک ردیابی مسیر خورشید بوده که نیاز به دریافت حداکثری نور خورشید را مرتفع می‌سازد. محققان اثبات کرده‌اند که برگ درختان با عملکرد نورگرایی توانایی جذب ۳۰ تا ۴۰٪ نور بیشتر نسبت به برگ‌های ثابت را دارا هستند. بکارگیری شیوه‌ی مسیریابی خورشیدی کارایی را ۳۰ تا ۳۶٪ در مقایسه با شیوه‌های جمع‌آوری نور در محل ثابت افزایش می‌دهد (۴۳).

راهکار دیگری که در این زمینه می‌توان به آن اشاره کرد، راهکار انعکاس برای انتقال نور به داخل ساختمان است که نور از این طریق به داخل ساختمان نفوذ کرده و عملکردش مانند عبور نور از طریق اسپیکیول می‌باشد. طراحی آتریوم به روشن کردن طبقات ساختمان و آوردن نور روز به داخل ساختمان کمک می‌کند. روش انجام مطالعات بسته به انتخاب نوع منعکس کننده‌ای است که نور روز را به سطوح داخلی ساختمان، به‌وسیله‌ی تحلیل روش‌های متداول، می‌اورد.طراحی با کمک روش‌های پارامتریک در نرم‌افزارهایی مانند Diva در Grasshopper امکان‌پذیر است. سیستم‌های انعکاسی می‌تواند یکی از دو شیوه‌ی انتقال روشنایی روز باشد، اولی استفاده از پنجره‌های بزرگ در نمای جنوبی به عنوان منبع انتشار نور و دومی انعکاس دهنده‌های آینه‌ای آویزان در داخل آتریوم است(۴۴).

٤- ساختار اسفنج به مثابه پوسته دوم ساختمان

با توجه به ویژگی‌های برشمرده در اسفنج و اسپیکیول آن از جمله انعطاف‌پذیری، قابلیت انتقال نور به داخل، استحکام و سختی، هندسه پایدار، ... می‌توان برای ساختمان‌هایی که در پوسته اول خود دارای شفافیت بالایی هستند، به عنوان پوسته دوم ساختمان با توجه به انعطاف‌پذیر بودن و قابلیت تطبیق در شرایط مختلف محیطی اقلیمی از جمله تغییر زاویه تابش در ساعات مختلف روز و در فصول مختلف را دارا باشد. همچنین امکان ایجاد تهویه طبیعی با کمک ایده گرفتن از نحوه عبور و پمپاژ آب از داخل بدن اسفنج را به وسیله‌ی بهینه سازی اندازه و میزان و جهت بازشوها در پوسته دوم

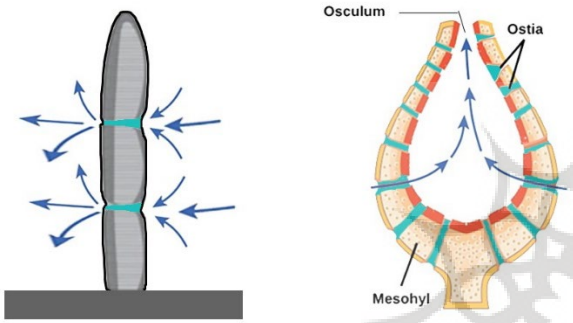
ساختمان وجود دارد. در این راستا می‌توان به کاهش مصرف انرژی ساختمان از طرق مختلف دست یافت.

۵- ساختار اسفنج به مثابه تهویه طبیعی ساختمان

با توجه به ساختار متخلخل اسفنج در سطح بدن که مناسب عبور آب از داخل بدنش بوده و برای بقای موجود ضروری است، می‌توان با در نظر گرفتن تدابیری همزمان با ورود هوای تازه به داخل ساختمان در سطح پوسته، به دریافت آب از رطوبت موجود در هوا پرداخت و آن آب را برای استفاده در بخش‌های تاسیساتی ساختمان مورد استفاده قرار داد. همچنین امکان دیگر این است که با انتخاب مصالح مناسب مانند Sio2 و Zno برای تصفیه هوا و کاهش ذرات معلق در آن همزمان با ورود هوای تازه به داخل ساختمان اقدام نمود. با الهام گرفتن از نحوه عملکرد استیا به عنوان محل‌های ورودی هوای تازه در ساختمان و اسیلیوم به عنوان خروجی یکپارچه هوای داخلی ساختمان می‌توان به عملکرد مناسب و پایداری در طراحی تاسیسات ساختمان دست یافت. در زیر نمونه‌ای از این ایده‌پردازی تا رسیدن به تولید انرژی ذکر شده است:

برج پرل ریور، گوانگژو، چین (۲۰۱۱)، (Pearl River Tower)

برج پرل ریور ساختمانی ۷۱ طبقه بوده که به وسیله اسکیدمور، اوینگز طراحی شده است. طراحان ایده این ساختمان را از اسفنج دریایی گرفته‌اند. آن‌ها از نحوه عملکرد اسفنج در دریا که روزانه گالن‌ها آب به همراه مواد مغذی به داخل بدن خود که موجودات هم‌زیست بسیاری در آن زندگی می‌کنند پمپ کرده و در حین این عمل، این مواد مغذی را به بدن خود و موجودات هم‌زیستش می‌رساند. این فرآیند از این فرآیند برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان در برج پرل ریور مورد استفاده قرار گرفت. در این برج همانند اسفنج حفره‌هایی در بدنه‌اش قرار داده‌اند و چهار توربین بادی در داخل آن قرار دارد. یکی از این توربین‌ها برق برج را در مواجهه با باد شدید منطقه تامین می‌کند(۴۵). در برج پرل ریور با کمک ایده گرفتن از عملکرد اسفنج، علاوه بر امکان استفاده از انرژی پاک برای تامین انرژی ساختمان، با ایجاد حفره در سطح نما به کاهش فشار ناشی از باد به سطح نمای ساختمان می‌توان دست یافت. در این ساختمان نحوه الهام‌گیری از ساختمان بصورت ایده از نحوه عملکرد جانور بوده و چگونگی رفتار جانور برای بقا را مورد تحلیل قرار داده و از آن ایده پردازی کرده و نوع عکس‌العمل جانور نسبت به اتفاقات محیط زیستش و نحوه عبور آب از داخل بدن اسفنج مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد طراحی در آن نیز بصورت بالا به پایین یا "طراحی مبتنی بر مساله با الهام از طبیعت" می‌باشد.



شکل ۲- تهویه طبیعی و تامین انرژی برج پرل ریور با الهام از پمپاژ آب اسفنج دریایی

بحث و نتیجه‌گیری طبیعت در طول عمر خود بهترین راه را برای ادامه حیات وبقا یافته و به عنوان منبع مناسبی برای مهندسی و معماری به شمار می‌رود. اسفنج‌ها در دریا برای میلیون‌ها سال زیست کرده و خود را محیط اطراف و زیستگاه خود تطبیق داده و عملکردش را در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار داده پس منبع مناسبی برای الهام از طبیعت به شمار می‌روند. اسفنج در هم‌زیستی مناسبی با محیط خود، آب را از درون حفره‌هایی داخل بدن خود کشیده و غذا و اکسیژن و مواد مغذی را به خود و موجودات هم‌زیست خود که در درون بدنش قرار دارند می‌رساند. این هم‌زیستی به گونه‌ای است که اسفنج محلی امن برای زیست این موجودات ایجاد کرده و در عوض مواد مغذی از آن‌ها دریافت می‌کند. با توجه به اینکه این موجودات برای انجام

فعالیت‌های خود نیاز به فتوسنتز دارند، اسفنج از طریق اسپیکیول‌هایش که عملکرد ساختاری و اسکلتی برایش دارد، به عنوان عملکرد بعدی نور ضعیف کف دریا را جمع‌آوری کرده و به موجودات هم‌زیست داخل خود می‌رساند. اسپیکیول در اسفنج‌های سیلیسی علاوه بر ایجاد ساختار کلی اسفنج، بصورت تکی در بدنه اسفنج نیز بصورت پراکنده وجود دارد و در اندازه‌ها، مقیاس‌ها، شکل‌ها، تعداد محورها، مقاطع و هندسه‌های متفاوتی بسته به طبقه‌بندی و نوعشان یافت می‌شوند. هر کدام از این انواع، منبع مناسبی برای الهام گرفتن در علوم مختلف از جمله صنعت ساختمان در بخش‌های مختلف از جمله معماری، سازه، تاسیسات الکتریکی و مکانیکی هستند.

نحوه‌ی پمپاژ آب از داخل بدن اسفنج می‌تواند منبع مناسبی برای ایده پردازی در راستای عبور هوا از داخل ساختمان و کاهش فشار باد به نمای ساختمان، همچنین تهویه طبیعی باشد. عملکرد استیا در بدن اسفنج می‌تواند با ورودی هوا به داخل ساختمان و اسیلیوم به مانند خروجی یکپارچه هوا از داخل ساختمان همانند انگاری شود. با توجه به قابلیت تغییرات اسفنج در شکل و ساختار خود بسته به شرایط محیطی و وجود موجودات مجاور، در ساختمان نیز می‌توان با درنظر گرفتن امکان پویا و متحرک کردن پوسته ساختمان و امکان تغییرات در پوسته دوم ساختمان به هماهنگی با تغییرات محیطی از جمله تغییرات آب و هوا، میزان نور دریافتی، باد و دیگر شرایط محیطی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی ساختمان دست یافت. اسپیکول که عضو اسکلتی ساختار اسفنج می‌باشد خود دارای قابلیت‌های گوناگونی برای اقتباس گرفتن از آن در اجزای مختلف ساختمان وجود دارد. با بررسی نوع ساختار و هندسه و نحوه چیدمان اسپیکیول در بدن اسفنج همچنین نحوه و میزان نورگذرانی در گونه‌های مختلف و چگونگی آن در مقطع اسپیکیول امکان استفاده در مقیاس‌های مختلف برای انتقال نور محیطی به داخل ساختمان امکان‌پذیر است.

جدول ۲- الهام گرفتن از اسفنج دریایی در اجزای ساختمانی (ماخذ: نگارندگان)

کاربرد ساختمانی/ نمونه موردی		الهام گرفتن	ایده بایومیمیکری	چگونگی تاثیر بایومیمیکری بر پایداری
تیر		عملکردی	اتصال اسفنج به کف دریا	اسپیکیول‌هایی طره مانند به هم متصل شده تا اتصال مناسب و تکیه گاه محکمی بین کف دریا و ساختار اسفنج ایجاد کنند
سازه ساختمان	برج گرکین	فرم (هندسه)	ا سکلت ا سفنج دریایی ونوس فلوور بسکت	اسکلت ساختمان دیاگرید آلومینیومی پوشیده از استیل
روشنایی ساختمان	فیبر نوری	ساختار	انتقال نور در اسپیکیول	فیبر نوری برپایه اسپیکیول معدنی با ویژگی مکانیکی بهتر و توسعه فیبر نوری با دمای کمتر
	سولار تیوب	ساختار	جمع‌آوری، انتقال و پخش نور در اسپیکیول	جمع‌آوری، انتقال و پخش نور در اعماق ساختمان و بهینه کردن سیستم با کمک استفاده از مسیریاب حرکت خورشید

پوسته دوم ساختمان		عملکردی، فرمی و ساختاری	انعطاف‌پذیری، قابلیت انتقال نور به داخل، استحکام و سختی، هندسه پایدار اسفنج	انطباق پوسته دوم ساختمان با شرایط اقلیمی از جمله تابش آفتاب، دمای هوا، باد و برف و باران
تولید انرژی	برج پرل ریور	عملکرد	پمپاژ آب از داخل بدن اسفنج	برج متخلخل ۴ حفره بزرگ داشته که توربین بادی درون آن تعبیه شده و برق تولید می‌کند
تهویه طبیعی ساختمان	برج گرکین	فرم	اسفنج ونوس فلوور بسکت با اسکلت خارجی مشبک و فرم دایره‌ای (مناسب برای عبور باد)	- گوشه‌های گرد شده کمک به جریان راحت‌تر باد بدون مزاحمت برای افراد پیاده - گرمایش، سرمایش و روشنایی کاراتر با کمک استفاده از پوسته دوم
مصالح ساختمانی		مصالح	اسپیکیول	ساختار پیچیده اسپیکیول که دارای ویژگی‌های مکانیکی مناسب، انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت و سختی بالا است برای ساخت مصالح مختلف منبع مناسبی برای الهام گرفتن است

منابع

1. Hosseini, Seyed Morteza, Masi Mohammadi, Alexander Rosemannb, Torsten Schr◌derc, Jos Lichtenberg, A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review, Building and Environment 153 (2019) 186–204 , https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040
2. Yanez, Andres Fernandez, BIOMIMICRY INSPIRED DESIGNS FOR DAYLIGHTING IN ECUADOR, Welsh School of Architecture - Cardiff University, Master of Science, November 2014
3. Amer, Nihal, Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of ‘Biomimicry in Architecture’ Course, Ain Shams Engineering Journal 10 (2019) 499–506
4. Lopez, Marlén, Ramón Rubio, Santiago Martín, Ben Croxford, How Plants inspire Façades. From Plants to Architecture: biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, 2017, https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.rser.2016.09.018
5. KURU, Aysu, Philip OLDFIELD , Stephen BONSER , Francesco FIORITO , Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings, *Energy & Buildings* (2019), doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544
6. Sabry Aziz, Moheb, Amr Y. El sheriff, Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation,

14. Martins, Eva, Miguel S. Rocha, Tiago H. Silva and Rui L. Reis, Remarkable Body Architecture of Marine Sponges as Biomimetic Structure for Application in Tissue Engineering, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019, DOI: 10.1007/978-981-13-8855-2_2
15. Fang, James K.H., Christine A. Rooks, Cathinka M. Krogness, Tina Kutti, Friederike Hoffmann, Raymond J. Bannister, Impact of particulate sediment, bentonite and barite (oil-drilling waste) on net fluxes of oxygen and nitrogen in Arctic-boreal sponges, Environmental Pollution 238 (2018) 948-958, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.092
16. Hendry, Katharine R., Lucie Cassarino, Stephanie L. Bates, Timothy Culwick, Molly Frost a, Claire Goodwin b, Kerry L. Howell, Silicon isotopic systematics of deep-sea sponge grounds in the North Atlantic, Quaternary Science Reviews 210 (2019) 1e14, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.02.017
17. SANDFORD, FLOYD, Physical and Chemical Analysis of the Siliceous Skeletons in Six Sponges of Two Groups (Demospongiae and Hexactinellida), MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE 62:336–355 (2003), https://doi.org/10.1002/jemt.10400
18. Schoeppler ,Vanessa, Elke Reich, Jean Vacelet, Martin Rosenthal, Alexandra Pacureanu, Alexander Rack, Paul Zaslansky, Emil Zolotoyabko, Igor Zlotnikov, Shaping highly regular glass architectures: A lesson from nature, SCIENCE ADVANCES, October 2017, DOI: 10.1126/sciadv.aao2047
19. Müller, Werner E.G., Xiaohong Wang, Zaklina Burghard, Joachim Bill, Anatoli Krasko, Alexandra Boreiko, Ute Schlomacher, Heinz C. Schrder, Matthias Wiens, Bio-sintering processes in hexactinellid sponges: Fusion of bio-silica in giant basal spicules from Monorhaphis chuni, Journal of Structural Biology 168 (2009) 548–561, doi:10.1016/j.jsb.2009.08.003

Alexandria Engineering Journal (2016) 55, 707–714
7. Martín-Gómez, César, Amaia Zuazua-Ros, Javier Bermejo-Busto, Enrique Baquero, Rafael Miranda, Cristina Sanz, Potential strategies offered by animals to implement in buildings' energy performance: Theory and practice, Frontiers of Architectural Research (2019) 8, 17–31 , https://doi.org/10.1016/j.foar.2018.12.002
8. Aanuoluwapo, Oguntona Olusegun, Aigbavboa Clinton Ohis, Biomimetic strategies for climate change mitigation in the built environment , Energy Procedia 105 (2017) 3868 – 3875 , https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.792
9. Nour ElDin. N, Abdou. A, Abd ElGawad. I. , Biomimetic Potentials for Building Envelope Adaptation in Egypt, Procedia Environmental Sciences 34 (2016) 375 – 386, https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.033
10. Shahd, Merhan M., Mostafa M. Abd Elhafeez, Ashraf A. El Mokadem, Camel's nose strategy: New innovative architectural application for desert buildings, Solar Energy 176 (2018) 725–741
11. Gehan.A.N. Radwan & Arch. Nouran Osama, BIOMIMICRY, AN APPROACH, FOR ENERGY EFFECIENT BUILDING SKIN DESIGN. Procedia Environmental Sciences 34 (2016) 178 – 189, https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.017
12. Ehret, Severin, Biomimetic potential of sponge spicules, An investigation of the optical properties and growth mechanism of sponge spicules and approaches for the improvement of fibre optics and photonics applications, Master Degree Program *"Bionik/ Biomimetics in Energy Systems",* Carinthia University of Applied Sciences, September 10th 2012
13. Müller, Werner E.G., Sergey I. Belikov, Wolfgang Tremel, Carole C. Perry, Winfried W.C. Gieskes, Alexandra Boreiko, Heinz C. Schro¨der, Siliceous spicules in marine demosponges (example Suberites domuncula), Micron 37 (2006) 107–120, doi:10.1016/j.micron.2005.09.003

20. Masse, Sylvie, Andrzej Pisera, Guillaume Laurent and Thibaud Coradin, A Solid State NMR Investigation of Recent Marine Siliceous Sponge Spicules, Minerals 2016, 6, 21; doi:10.3390/min6010021
21. Werner E.G. Mu¨ ller, Xiaohong Wang, Klaus Kropf, Hiroshi Ushijima, Werner Geurtsen, Carsten Eckert, Muhammad Nawaz Tahir, Wolfgang Tremel, Alexandra Boreiko, Ute Schlomacher, Jinhe Li, Heinz C. Schro¨der, Bioorganic/inorganic hybrid composition of sponge spicules: Matrix of the giant spicules and of the comitalia of the deep sea hexactinellid Monorhaphis, Journal of Structural Biology 161 (2008) 188–203, doi:10.1016/j.jsb.2007.10.009
22. Werner, Peter, Horst Blumtritt , Igor Zlotnikov, Andreas Graff, Yannicke Dauphin, Peter Fratzl, Electron microscope analyses of the bio-silica basal spicule from the Monorhaphis chuni sponge, Journal of Structural Biology 191 (2015) 165–174, http://dx.doi.org/10.1016/j.jsb.2015.06.018
23. Müller, Werner E. G., Heinz C. Schröder, Julia S. Markl, Vlad A. Grebenjuk, Michael Korzhev, Renate Steffen, and Xiaohong Wang, Cryptochrome in Sponges: A Key Molecule Linking Photoreception with Phototransduction, Journal of Histochemistry & Cytochemistry 61(11) 814– 832, 2013, DOI:10.1369/0022155413502652
24. Croce, Gianluca, Alberto Frache, Marco Milanesio, Leonardo Marchese, Mauro Causa , Davide Viterbo, Alessia Barbaglia, Vera Bolis, Giorgio Bavestrello, Carlo Cerrano,§ Umberto Benatti, Marina Pozzolini, Marco Giovine, and Heinz Amenitsch, Structural Characterization of Siliceous Spicules from Marine Sponges, Biophysical Journal Volume 86 January 2004 526–534 https://doi.org/10.1016/S0006-3495(04)74131-4
25. Binnewerg, B., M. Schubert, A. Voronkina, et al., Marine biomaterials: Biomimetic and pharmacological potential of cultivated Aplysina aerophoba marine demosponge, *Materials Science & Engineering C* (2019), https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110566
26. Drozdov AL, Andreykin NA, Dorofeev AG, Structure and physico-chemical properties of organosilicon crystal-like composite spicules of the glass sponge *Hyalonema sieboldi*, *Materials Research Bulletin* (2018), https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.05.011
27. URIZ, MARI´A-J., XAVIER TURON, MIKEL A. BECERRO, GEMMA AGELL, Siliceous Spicules and Skeleton Frameworks in Sponges: Origin, Diversity, Ultrastructural Patterns, and Biological Functions, MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE 62:279–299 (2003)
28. Botting, J.P., Muir, L.A., Xiao, S., Li, X. & Lin, J.-P. 2012: Evidence for spicule homology in calcareous and siliceous sponges: biminerallic spicules in Lenica sp. from the Early Cambrian of South China. Lethaia, 2012, Vol. 45, pp. 463–475.
29. PISERA, ANDRZEJ, Some Aspects of Silica Deposition in Lithistid Demosponge Desmas, MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE 62:312–326 (2003)
30. Tang, Qing, Bin Wan, Xunlai Yuan2,3, A.D. Muscente4 & Shuhai Xiao, Spiculogenesis and biomineralization in early sponge animals, NATURE COMMUNICATIONS, 2020, https://doi.org/10.1038/s41467-019-11297-4
31. ZHANG, PENGYU, WEIGUO XU, WEIXIN HUANG, YUFENG ZHU, RUI DAI and DAN LUO, GENERATIVE DESIGN BASED ON SPONGE SPICULES FORMS, *Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017*, 509-519.
32. Nadhira A, Sutton MD, Botting JP, Muir LA, Gueriau P, King A, Briggs DEG, Siveter DJ, Siveter DJ. 2019 Three-dimensionally preserved soft tissues and calcareous hexactins in a Silurian sponge: implications for early sponge evolution. R. Soc. open sci. 6: 190911. http://dx.doi.org/10.1098/rsos.190911
33. Peel, John S. (2019) Sponge spicule assemblages from the Cambrian (Series 2–3)

42. Kul'chin, Yu.N., O.A. Bukin, S.S. Voznesenskiy, A.N. Galkina, S.V. Gnedenkov, A.L. Drozdov, V.G. Kuryavyi, T.L. Mal'tseva, I.G. Nagornyi, S.L. Sinebryukhov, A.I. Cherednichenko, Optical fibres based on natural biological minerals sea sponge spicules, Quantum Electronics 38 (1) 51 ë 55 (2008), DOI:10.1070/QE2008v038n01ABEH013579
43. Yuan, Yanping, Xiaoping Yu, Xiaojiao Yang, Yimin Xiao, Bo Xiang, Yi Wang, Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 74 (2017) 771–787 , http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004
44. Eltaweel, Ahmad, Yuehong SU, Parametric design and daylighting: A literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 73 (2017) 1086–1103, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011
45. Mirniazmandan S, Rahimianzarif E (2017) Biomimicry an Approach toward Sustainability of High-Rise Buildings. J Archit Eng Tech 6: 203. doi: 10.4172/2168-9717.1000203
of North Greenland (Laurentia): systematics and biogeography, GFF, 141:2, 133-161, DOI:10.1080/11035897.2019.1578261
34. Zhang, Yaqi, Bryan W. Reed, Frank R. Chung, Kristie J. Koski, Mesoscale elastic properties of marine sponge spicules. Journal of Structural Biology (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.jsb.2015.11.009
35. Pineda, M.-C. *et al.* Effects of light attenuation on the sponge holobiont-implications for dredging management. *Sci. Rep.* 6, 39038; doi: 10.1038/srep39038 (2016).
36. Sundar, Vikram C., Andrew D.Yablon, John L.Grazul, Micha Ilan, Joanna Aizenberg, Fibre-optical features of a glass sponge, NATURE|VOL 424 | 21 AUGUST 2003, p 899
37. Aizenberg, Joanna, Vikram C. Sundar, Andrew D. Yablon, James C. Weaver, and Gang Chen, Biological glass fibers: Correlation between optical and structural properties, PNAS _ March 9, 2004 _ vol. 101 _ no. 10
38. Nkandu, Mwila Isabel, Halil Zafer Alibaba, Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability, Architecture Research 2018, 8(1): 1-11, DOI: 10.5923/j.arch.20180801.01
39. Kennedy, Emily Barbara, Biomimetic Buildings: The Emerging Future of Architecture, GBER Vol 10 Issue 1 Oct 2016
40. ZHANG, PENGYU, WEIGUO XU, WEIXIN HUANG, YUFENG ZHU, RUI DAI and DAN LUO, GENERATIVE DESIGN BASED ON SPONGE SPICULES FORMS, Protocols, Flows and Glitches, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2017, 509-519.
41. Monn, Michael A., Haneesh Kesari, Enhanced bending failure strain in biological glass fibers due to internal lamellar architecture, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials,* http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.05.032

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی