Journal of Iranian Architecture & Urbanism
(JIAU)
Homepage: https://www.isau.ir/

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Investigating the Evolution of Computation Role in Simulating the Formation Process of Natural Phenomena for Generating Architectural Forms *

Yashar Gharachamani Asl [1], Mohammad Baharvand [2,], Sahar Tofan [3]**

[1] *Ph.D. Candidate in Architecture, Department of Architecture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.*
[2] *Assistant Professor, Department of Architecture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.*
[3] *Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.*

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2020/08/11
Revised 2020/10/01
Accepted 2021/01/09
Available Online 2022/12/31

Keywords:

Biology
Growth Pattern
Differential Growth Algorithm
Computer Form Generation

Use your device to scan and read the article online

Number of References
58

Number of Figures
19

Number of Tables
2

Extended ABSTRACT

BACKGROUND AND OBJECTIVES: Thinking about nature and paying attention to how biological phenomena grow and take shape has a long history and is more valuable than superficial and formal imitation. But more scientific and technical ability is needed to implement it in practice. This may be due to the superficial selection of complex and unambiguous topics due to weaknesses in scientific fields or lack of technical facilities for implementation. Given the technical and scientific developments in recent decades, the possibility of such an inherent approach is not far from the mind. The emergence of new theories and computing methods derived from biological systems over the past few decades has made it possible to deepen the principles and rules of the form production process. The main question is: how can biological growth and formation patterns be used to methodize the process of producing architectural forms? The main purpose of this article is to investigate the modeling and growth processes in biological phenomena to be used in the methodization of the form production process in architecture. One of the patterns in the growth process of biological phenomena is the differential growth pattern.

METHODS: The research method in the present research is descriptive-analytical, and data collection includes library studies and documents. First, the theoretical and practical backgrounds of computing inspired by biological principles and their evolutionary evolution were examined. Then, using a simulation research method with a logical reasoning strategy, different growth patterns were formed. Finally, during the process, the production of the architectural form was tested and examined. In a simulation experiment, a model of the growth pattern was presented in the production of computer forms. In the analytical part of the present study, considering the importance of the role of algorithmic thinking in modeling the growth process and the formation of biological phenomena for the computational production of an architectural form, a logical reasoning strategy was established to provide a logical thinking system for realizing a relationship between biological realities in the growth process. It has been used to form a general conceptual framework in order to describe the subject and formulate growth guidelines using the abstract values of producing architectural form.

FINDINGS: This research started with the classification and analysis of theories in the field of computing inspired by biological processes, according to the time hierarchy of their occurrence, then continued with the introduction of new computing methods inspired by biological principles. Finally, this research was completed using such theories and methods in the production of the digital form. The result is evidence of the historical and evolutionary course of such an approach from theory to practice. For more clarity, theories, methods, and manufacturing processes are presented below with an evolution timeline, which is a new step in this field of research. Achieving the ability to simulate computational theories demonstrates the possibility of modeling growth processes and the formation of biological phenomena in the process of producing an architectural form along a path called computing. In this process, the growth algorithm is programmed

© 2022, JIAU. All rights reserved.

https://dx.doi.org/10.30475/isau.2021.242338.1476

OPEN ACCESS

* This article is derived from the first author`s doctoral thesis entitled "The Convergence of Technology and Nature in Architecture of Third Millennium: Recognising of Natural Phenomenon Formation Patterns in Bio Digital Architecture ", supervised by the second authors and advised by the third, at Islamic Azad University Isfahan (Khorasgan) branch.

** Corresponding Author:
Email: *baharvand12@gmail.com*
Phone: +98(913)3265589

Extended ABSTRACT

within the software environment and then equated. So that all the parameters affecting the formation and growth of the organism are identified and entered into the algorithm, and then the virtual growth process takes place. The result of such an algorithm is the application of the construction method of these organisms to architectural projects and the use of the characteristics of that organism to increase the efficiency of space. In this process, architecture can inherit the qualities that the process of natural products has given to the organism and imitate them in their appearance and form, as well as in their function and behavior..

CONCLUSION: The form of the process is first generated in the virtual environment by entering various environmental parameters as well as various growth patterns. Then, if it responds to the mentioned environmental conditions and parameters, it will be placed in the path of digital manufacturing and built physically. As a result, the presence of such forms in the not-too-distant future in urban environments and architecture is still being determined. Therefore, the direction of research is more in the field of opinion. Nevertheless, attempts have been made in the field of architecture to create a new design logic based on the path of growth patterns. Naturally, this research is the beginning of further research in areas such as biology and algorithms. Subsequent researchers can examine and test other natural patterns, with a wider range of variables, in the algorithmic process, and step into the development of the research literature. The main result is that algorithmic simulation of growth patterns and the formation of biological phenomena through the computer channel can effectively create new methods for the architectural form production process.

.....

HIGHLIGHTS:

- By using algorithms to simulate the growth patterns of biological phenomena on a computer, new ways of making architectural forms can be found.
- By using a set of rules in the form of code, it is possible to produce an architectural form in a self-organizing process.
- Forms are generated in cyberspace with various environmental parameters and patterns. If it responds to the conditions, it will be on the path of digital manufacturing.

ACKNOWLEDGMENTS:
This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-forprofit sectors.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declared no conflicts of interest.

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

HOW TO CITE THIS ARTICLE
Gharachamani Asl, Y.; Baharvand, M.; Tofan, S., (2022). Investigating the Evolution of Computation Role in Simulating the Formation Process of Natural Phenomena for Generating Architectural Forms . *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*., 13(2): 73-88.

https://dx.doi.org/10.30475/isau.2021.242338.1476
https://www.isau.ir/article_127568.html

نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران. دوره ۱۳. شماره ۲. صفحات ۸۸-۷۳. پاییز و زمستان ۱۴۰۱

نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران
(JIAU)
https://www.isau.ir/

مقاله علمی- پژوهشی

بررسی سیر تکوینی نقش رایانش در الگوسازی از فرآیندهای شکل‌گیری پدیده‌های طبیعی در تولید فرم معماری*

یاشار قراچمنی‌اصل [۱]، محمد بهاروند [۲و**]، سحر طوفان [۳]

۱. دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. استادیار، گروه معماری، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۳. دانشیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

مشخصات مقاله

تاریخ ارسال ۱۳۹۹/۰۵/۲۱
تاریخ بازنگری ۱۳۹۹/۰۷/۱۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۰
تاریخ انتشار آنلاین ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

واژگان کلیدی

زیست شناسی
الگوی رشد
الگوریتم رشد دیفرانسیلی
تولید فرم رایانشی

چکیده

ایده تعمیق در طبیعت و توجه به نحوه رشد و شکل‌گیری پدیده‌های زیستی بجای تقلید از لایه‌های سطحی و شکلی، سابقه‌ای طولانی دارد. لیکن در عمل، توانایی علمی و فنی کافی برای اجرای آن وجود نداشته است. شاید بتوان دلیل آن را انتخاب سطحی موضوعات پیچیده و غیر قابل احاطه به لحاظ ضعف در زمینه‌های علمی و یا نبود امکانات فنی برای اجرا دانست. حال با عنایت به تحولات فنی و علمی در چند دهه اخیر امکان‌پذیری چنین رویکرد ماهیتی، دور از ذهن نمی‌باشد. ظهور نظریات و روش‌های رایانشی نوین بر گرفته از سیستم‌های زیست‌شناختی، در طی چند دهه اخیر، تعمیق در اصول و قواعد فرآیند تولید فرم را امکان‌پذیر نموده است. هدف مقاله حاضر بررسی چگونگی الگوسازی از فرآیندهای رشد و شکل‌گیری پدیده‌های زیستی در روشمندسازی فرآیند تولید فرم در حوزه معماری می‌باشد. یکی از الگوهای مطرح در فرآیند رشد پدیده‌های زیستی، الگوی رشد دیفرانسیلی می‌باشد. روش تحقیق در پژوهش پیش‌رو، بصورت توصیفی تحلیلی بوده و اطلاعات از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و اسناد و مدارک، گردآوری شده‌اند. پس از مرور سوابق نظری و عملی رایانشی ملهم از اصول زیست‌شناختی و بررسی سیر تکوینی آن‌ها، با استفاده از روش تحقیق شبیه‌سازی با راهبرد استدلال منطقی، الگوی رشد دیفرانسیلی، در یک فرآیند تولید فرم معماری مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. به نحوی که طی یک آزمایش شبیه‌سازی، مدلی از الگوهای رشد در تولید فرم رایانشی ارایه گردید. نتایج آزمایش‌ها نشانمی‌دهد که شبیه‌سازی الگوریتمیک الگوهای رشد و شکل‌گیری پدیده‌های زیستی از مجرای رایانشی، در خلق روش‌های نوین فرآیند تولید فرم معماری می‌تواند مؤثر واقع گردد.

نکات شاخص

- با استفاده از الگوریتم‌هایی برای شبیه‌سازی الگوهای رشد پدیده‌های زیستی در رایانه، راه‌های جدیدی برای ساخت فرم‌های معماری پیدا می‌شود.
- با استفاده از مجموعه‌ای از قوانین در قالب کُد، می‌توان یک فرم معماری را در یک فرآیند خودسازماندهی تولید کرد.
- فرم‌هایی با پارامترها و الگوهای مختلف محیطی در فضای مجازی تولید می‌شود. اگر به شرایط پاسخ دهد در مسیر ساخت دیجیتال قرار می‌گیرد.

نحوه ارجاع به مقاله

قراچمنی‌اصل، یاشار؛ بهاروند، محمد و طوفان، سحر. (۱۴۰۱). بررسی سیر تکوینی نقش رایانش در الگوسازی از فرآیندهای شکل‌گیری پدیده‌های طبیعی در تولید فرم معماری، *نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران*، ۱۳(۲)، ۷۳-۸۸.

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده نخست با عنوان «همگرایی تکنولوژی و طبیعت در معماری هزاره سوم: بازشناسی الگوهای شکل‌گیری پدیده‌های طبیعی در معماری بیو دیجیتال» می‌باشد که به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) انجام گرفته است.

** نویسنده مسئول
تلفن: ۰۰۹۸۹۱۳۳۲۶۵۵۸۹
پست الکترونیک: baharvand12@gmail.com

مقدمه

توجه به سرشت طبیعت و اکتشاف قوانین حاکم بر آن همواره اذهان دانشمندان و همچنین معماران را در قالب موضوعی بنیادین، به خود مشغول کرده است. شناخت قوانین حاکم بر فرآیند رشد و شکل‌گیری پدیده‌های طبیعی به جای توجه صوری و شکلی به آن، قرن‌هاست که حائز اهمیت است. چنانچه سالیوان همواره بر اهمیت توجه بر نحوه شکل‌گیری فرم در پروسه رشد و حرکت طبیعی تاکید داشته است (Ghobadian, 2009: 65). لیکن به دلیل ضعف در زمینه‌های علمی و یا نبود امکانات فنی لازم در این زمینه حاصل کار تنها به شکل نظریاتی پراکنده باقی مانده و پا به حیطه فراتر ننهاده است (Taraz, 2012).

با توجه به دگرگونی‌های بنیادین علمی و فنی در چند دهه اخیر، شاهد توجه به فرآیندهای طبیعی در تولید فرم معماری از مسیر علمی هستیم (Gharoni, 2015: 53). یکی از بنیادی‌ترین دانش‌ها در این حوزه، علم زیست‌شناسی می‌باشد. به عبارتی بازگشت دوباره به طبیعت، این بار از مسیر زیست‌شناسی محقق خواهد شد (Khabbazi, 2016: 136).

با درک محدوده علمی حرکت انتقالی از حوزه دانش زیست‌شناختی به معماری می‌توان راه را برای طرح موضوعاتی نوین در حوزه معماری گشود که به جای تقلید در سطوح اولیه فرمی و مکانیکی ارگانیسم‌ها به درک لایه‌های عمیقی چون نحوه شکل‌گیری، رشد و توسعه آنها نایل گردید (Kaboli, 2015: 30). مجموع دانشی که در نحوه شکل‌گیری این اجزاء زیستی وجود دارد به حوزه ارزشمند برای تولید الگو تبدیل شده است (Khabbazi, 2014: 147).

این الگوبرداری نوین، در مسیری تحت عنوان طراحی الگوریتمیک یعنی خدمت گرفتن رایانش[1] به عنوان ساختار اصلی فعالیت‌های رایانه، از طریق الگوریتم‌ها و کدها و برنامه‌ها، میسر می‌گردد (Khabbazi, 2016: 6). در مطالعات صورت گرفته، مثال‌ها و نمونه‌های بسیار وسیع در منابع مکتوب ارائه شده‌اند که بدون در نظر گرفتن طبقه‌بندی از نظر روش الگوسازی و همچنین گستره آن از نظر سطح مورد توجه، احتمال مغشوش شدن و سردرگمی در حوزه مطالعات وجود دارد.

مرور ادبیات موضوع تحقیق

از اواسط قرن گذشته تا به امروز نظریه‌ها، روش‌ها و پروژه‌های عملی مختلفی با الهام از فرآیندهای موجود در سیستم‌های طبیعی با همپوشانی دو حوزه رایانش و زیست‌شناسی مطرح گردیده است. با این حال، طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل جامعی در این زمینه وجود ندارد. در اینجا می‌توان اهم موضوعات مطرح در این حوزه را به دو بخش نظری و عملی تقسیم نمود.

پیشینه نظری

این بخش، به ارایه برگزیده‌ای از نظریات رایانشی که با مقایسه شباهت‌های زیست‌شناختی میان فرایندهای رشد و شکل‌گیری الهام گرفته شده از طبیعت بدست آمده است، می‌پردازد. بسیاری از این نظریات بعدها در پیشینه عملی دیده می‌شود.

نظریه اتوماتای سلولی[2]

اولین نظریه مربوط به اتوماتای سلولی در دهه ۱۹۴۰ می‌باشد که یک سیستم ریاضی و رایانشی بوده و توسط جان فون نویمان[3]، استانیسلاو اولام[4]، و نیلز باریسل[5] بسط و توسعه یافت (Frenay, 2008). این سیستم، مدلی ریاضی از سیستم خود سازمانده، از جمله سیستم‌های پیچیده[6] در طبیعت را برای توصیف و تولید مدل‌هایی از طیف گسترده پدیده‌های پیچیده، ارایه می‌دهد که انواع سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی، زیست شناختی را توضیح داده و تولید کنند. این سیستم متشکل از یک شبکه منظم از سلول‌هایی با تعداد محدودی از حالت‌ها از قبیل "باز" و یا "بسته" می‌باشد. حالات سلول از طریق تعدادی از مراحل زمانی بر اساس مجموعه‌ای از قوانین و با توجه به حالات سلول‌های کناری تغییر می‌کند که می‌تواند الگوهای پیچیده غیر قابل پیش بینی تولید کند (Wolfram, 1983: 601-644) (شکل ۱).

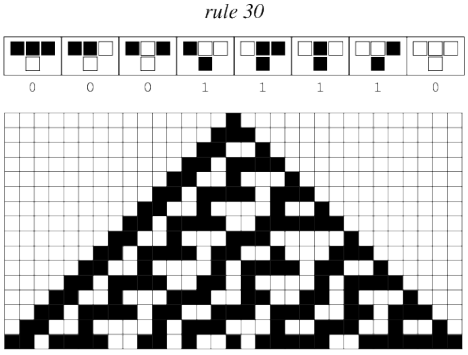

Fig. 1. Rule 30 of Cellular Automation (Wolfram, 1983)

نظریه الگوریتم ژنتیک[7] و رایانش تکاملی[8]

در دهه ۱۹۶۰، جان هلند[9] برای اولین بار ایده الگوریتم ژنتیک و رایانش تکاملی را پیشنهاد نمود. الگوریتم ژنتیک یک روش رایانشی ملهم از تکامل طبیعی، می‌باشد که قابل مقایسه با مفاهیمی از جمله جفت، جفت‌گیری، اشتراک کروموزومی، جهش ژنتیکی، سازگاری و انتخاب طبیعی می‌باشد (Winston, 1992: 505). الگوریتم‌های ژنتیک بر اساس دو مفهوم عمده روند تکامل می‌باشند: انتخاب طبیعی، که بقای اعضای اصلح و سازگار یک جمعیت را مشخص می‌کند، و تولید مثل‌جنسی که ترکیب و باز آرایی ژن‌ها در فرزندان را فراهم می‌کند (Holland, 1992: 66-72). یک برنامه رایانه‌ای حل مسئله[10] با یک الگوریتم زایشی[11] متشکل از مجموعه‌ای از قوانین، با ارزیابی و سنجش افراد اصلح و سازگار، تولید یک جمعیت با صفات مطلوب‌تر می‌نماید (Steadman, 2008: 249).

نظریه ال سیستم[۱۲] (سیستم لیندنمایر)

این سیستم یک الگوریتم سلسله مراتبی می‌باشد که توسط گیاه‌شناسی به نام آریستید لیندنمایر[۱۳] در سال ۱۹۶۸ بازنویسی شد (Prusinkiewicz, 1987: 253). ال سیستم‌ها اصول بنیادین زیست‌شناختی در طراحی زایاشی بر مبنای فرآیند ساختاردهی در حال رشد پدیده‌های گیاهی می‌باشد و می‌تواند پارامترهایی مانند طول و زاویه شاخه، برگ، گل‌ها را با دنباله‌ای از نمادهای اولیه با قابلیت جایگزینی بازگشتی نشان دهد (Steadman, 2008: 257). در حقیقت این سیستم برای شبیه‌سازی رفتار و الگوهای رشد گیاهی ایجاد شده است. این سیستم‌ها براساس بازنویسی دنباله‌های موازی هستند که در آن تمام حروف الفبا در یک زمان واحد بازنویسی می‌شوند. این حروف به شکل درختی و سلسله مراتبی با قوانین جایگزینی شکل می‌گیرد که نمادی از یک سیستم رشد شاخه‌ای می‌باشد (شکل ۲).

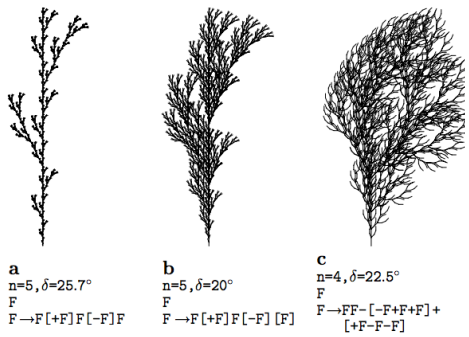

Fig. 2. An example of a growth process in the Lindenmeier system (Lindenmayer & Prusinkiewicz, 1990)

نظریه فراکتال[۱۴]

در سال ۱۹۷۵ نظریه فراکتال، که براساس کار ریاضیدانانی چون فلیکس هاسدورف[۱۵] می‌باشد، برای اولین بار توسط بنوا مندلبرو[۱۶] نامیده شد. فراکتال به این شکل تعریف می‌گردد: "هر فرم بی نظم با تنوع شکلی که هر بخش انتخاب شده از آن هنگام بزرگنمایی و یا کوچک نمایی در ظاهر با بخش معیین بزرگتر و یا کوچکتر آن شبیه باشد". نظریه فراکتال سیستمی را بر پایه مطالعات ریاضی اشکالی با جزییات بی‌پایان، و خود متشابه[۱۷]، برای مدل کردن انواع پدیده‌های طبیعی ارایه می‌دهد که جزء به کل به شیوه‌ای بازگشتی مرتبط است (Bovill, 1996: 3) (شکل ۳).

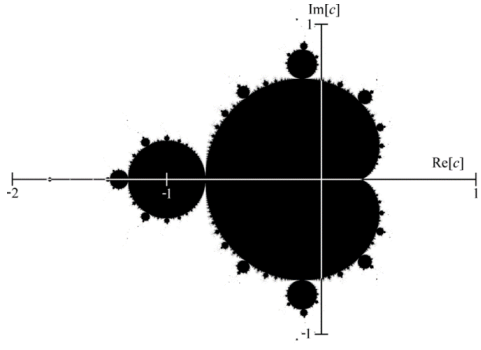

Fig. 3. Mandelbrot Collection (Fractalus, 2017)

پیشینه عملی

با بسط نظریه‌های رایانشی مطرح در دهه ۴۰ تا ۷۰ قرن بیستم، مفاهیم زیست‌شناختی در فرآیند طراحی معماری به شکل رایانشی به کار بسته شد. مایکل هنسل[۱۸]، آخیم منگس[۱۹] و مایکل واینزتاک[۲۰]، از بنیانگذاران و مدیران گروه فن‌آوری‌ها و اصول طراحی در حال ظهور[۲۱] در انجمن معماری لندن، از سال ۲۰۰۴ به اکتشاف مفاهیمی همچون ظهور، مورفوجنسیس[۲۲]، مورفو اکولوژی[۲۳] پرداخته‌اند. آن‌ها ظهور را به این شکل تعریف می‌کنند: فرایندی که توسط آن ساختارها، الگوها و خواص جدید و منسجم از درون سیستم‌های پیچیده ظهور می‌یابند. در نظریات آنها ساختارهای معماری به عنوان سیستم‌های پیچیده‌ای از انرژی و مواد در نظر گرفته می‌شود. در این فرایند، با استفاده از روش‌های رایانشی و عملی اشکال طراحی، رشد و نمو می‌نمایند و به عنوان بخشی از یک محیط رفتار می‌کنند و در ارتباط و همبستگی دائم با سایر سیستم‌های فعال هستند (Hensel, Menges &Weinstock, 2004- 2019) (شکل ۴).

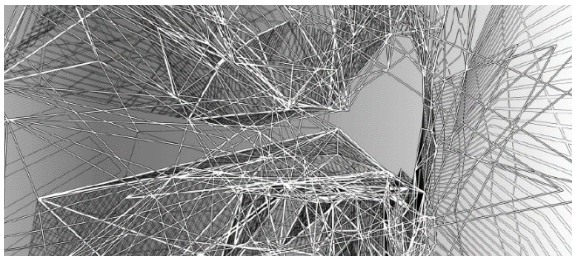

Fig. 4. An example of the emergence process (Hensel & Menge, 2008)

اندرو کودلس[۲۴]، نیز از همان سال ۲۰۰۴ با نام‌گذاری کار خود با عنوان سیستم مواد[۲۵]، بر یکپارچه‌سازی میان فرم، رشد و رفتار، که طبیعت ذاتی همه موجودات زنده و غیر زنده هستند، تمرکز داشت (Kudless, 2018). در این سیستم، فرم در نتیجه رفتار مواد و فرآیندهای ساخت و تولید، ایجاد می‌گردد (Iwamoto, 2009: 84-87). مانیفولد[۲۶]، دیوار پی[۲۷] و دیوار سی[۲۸] از جمله کارهای وی می‌باشد که به بررسی و تحقیق بر روی ساختارهای سلولی به هم پیوسته، الگوریتم ورونویی[۲۹] و سیستم‌های لانه زنبوری[۳۰] می‌پردازد. او با بهره‌گیری از هندسه پیچیده، ساخت و تولید دیجیتال و تکنیک‌های فرآیندی از قبیل نسخه‌نویسی برای ترجمه و تجسد بخشیدن به اطلاعات می‌پردازد (Kudless, 2011) (شکل ۵).

معمار آلمانی، کریس باس[۳۱]، در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش‌های رایانشی برای مطالعه بر روی ساختارهای ارگانیک، به خلق فضاهای معماری پرداخت. وی از تکنیک بهینه‌سازی[۳۲] فرم ارگانیسم به جای طراحی مستقیم فرم، از فرایندی مشابه آنچه که در ارگانیسم‌های طبیعی صورت می‌پذیرد استفاده می‌کند (Bosse, 2019). انعطاف‌پذیری مواد موجب می‌گردد طراحی بر اساس گرانش، تنش

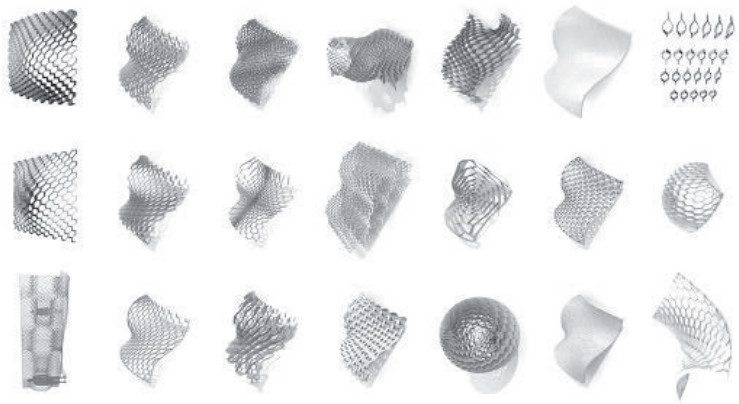

Fig. 5. Form formation process in the material system (Kudless, 2018)

و امکان رشد نیروها امکان‌پذیر باشد و همانند اکوسیستم‌های طبیعی تک تک اجزاء، به منظور خلق محیط خود همزیستی تعاملی داشته باشند (Iwamoto, 2009: 82-83). در پروژه ورودی غرفه بهشت[۳۳]، او به بررسی و تحقیق بر روی فرم و ساختار میکروارگانیسم‌ها با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتر می‌پردازد (Bosse, 2019). در پروژه اوریگامی دیجیتال[۳۴]، باس با تکرارمدول، به کاوش بر روی این فرض که هوش کوچکترین، نظم و ترتیب را برای کل سیستم دیکته می‌کند، می‌پردازد (Schmidt & Stattmann, 2009) (شکل ۶).

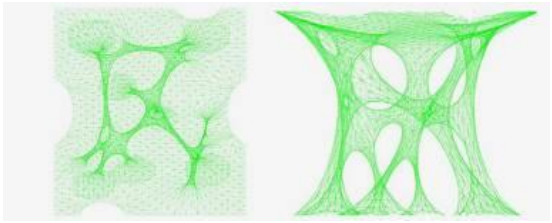

Fig. 6. The process of forming the entrance form of the Paradise Booth (Bosses, 2019)

پروژه‌های معماری مواد نری اوکسمن[۳۵] با نام اکولوژی مواد[۳۶] از سال ۲۰۰۸ بر اساس فرآیندهای زیست شناختی و تعاملات آنها با محیط اطرافشان می‌باشد (Klooster, 2009: 163). او مواد و ساختارهایی را پیش‌بینی می‌کند که می‌توانند سطوح مختلفی از ثبات ساختاری را دریک ماده واحد ایفا نمایند. همزمان درجه شفافیت خود را برای شرایط مختلف نورگیری داخلی تغییر دهند و از طریق منافذ تعبیه شده در سطح تهویه کنند، و در حد ایده‌آل، خودشان بتوانند انرژی ذخیره کرده و عرضه نمایند (Holcim Awards, 2008; Oxman, 2019). او تلاش می‌کند تا ازسیستم‌های طبیعی و خصوصیات آن‌ها از قبیل عملکردهای چندگانه بافت زنده و تحمل بار ساختارها، تقلید نماید (Antonelli & Curator, 2020) (شکل ۷).

همکاری میان جنی‌سابین[۳۷] و پیتر لوید جونز[۳۸] به ترتیب یه عنوان معمار و زیست‌شناس مولکولی از سال ۲۰۰۸ تاکنون با ایجاد پلی ارتباطی میان رشته‌های زیست‌شناسی سلولی و معماری با عنوان آزمایشگاه استودیو[۳۹] (Sabin, 2019) باب تحقیقاتی نوینی را که بر روی نوعی از طراحی میان دانشی بر روی فصل مشترک میان معماری، علم و فن‌آوری می‌باشد گشوده است. حوزه‌های طراحی و ساخت زایشی[۴۰] یکی از روش تحقیق و برنامه‌های کاربردی است که سابین و همکارانش برای مشاهده و اندازه‌گیری سیستم‌های زنده پویا همانند پوسته‌های منطبق[۴۱]، اجتماع مواد[۴۲] در دست دارند (Chernyakova, 2016) در پروژه‌هایی مانند انشعاب از مروفوجنسیس[۴۳] و پلی ترید[۴۴] و ماده بنیادین[۴۵] نمونه‌هایی از فرایند ساخت و تولید غیر خطی[۴۶] و خود سازمانده[۴۷] به عنوان انتزاعی از سیستم‌های زیست شناختی همانگونه که در طبیعت اتفاق می‌افتد، می‌باشند (Schmidt, Stattmann, 2009) (شکل ۸).

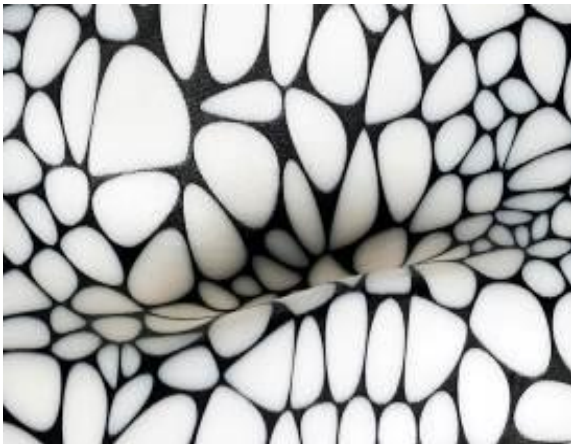

Fig. 7. An example of a Cartesian wax project production process (Oxman, 2019)

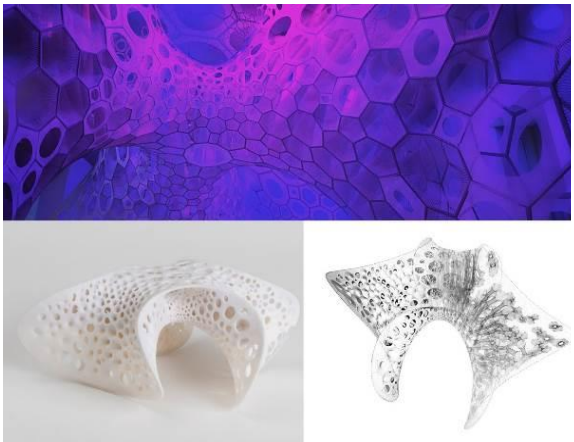

Fig. 8. Polytrid project form production process (Sabin, 2019)

مبانی نظری

رشد زیست شناختی

رشد فرآیندی اصلی در شکل‌گیری فرم پدیده‌های زیستی می‌باشد که در طول آن فرم در یک چارچوب زمانی مشخص و بر مبنای اطلاعات ژنتیکی شکل می‌گیرد. در حقیقت فرم در پدیده‌های زیستی به یکباره ظهور نمی‌یابد و طی مراحل پیچیده‌ای در طول زمان به شکل نهایی خود می‌رسد. بنابراین در طبیعت، فرآیند شکل‌گیری محصول است که بر خود محصول مقدم است. رشد و توسعه، در یک چارچوب زمانی مشخص یک فرد[۴۸] و همچنین یک گونه[۴۹] رخ می‌دهد و منجر به شکل‌گیری تدریجی آن می‌گردد. بعد از این چارچوب زمانی، رشد متوقف شده و فرم نهایی حاصل می‌گردد (شکل ۹).

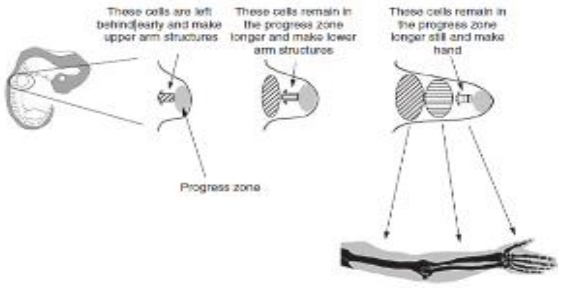

Fig. 9. Scheduled model of arm limb growth
(Davies, 2014)

مکانیسم رشد

رشد و تقسیم: رشد در طبیعت به تقسیم و تفکیک سلولی متکی است. تقسیم سلول‌ها، مونتاژ و ساخت مواد برای موجودات زنده را فراهم می‌نمایند (شکل ۱۰).

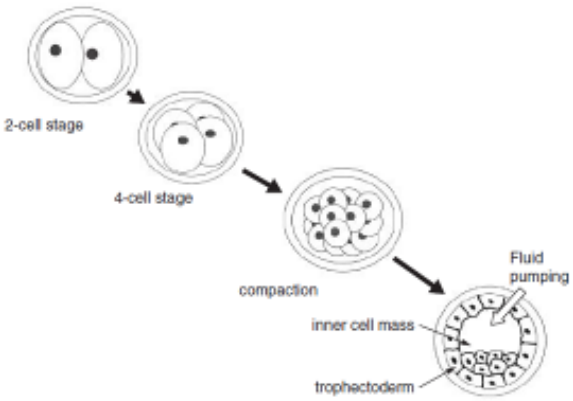

Fig. 10. Stages of cell division of human embryos
(Davies, 2014)

رشد و انحنا: ارگانیسم چند سلولی با استفاده از یک نقشه تعریف‌کننده موقعیت‌های عناصر در فضا، ساخته نمی‌شوند بلکه با استفاده از ریتم‌های رشد و مفاهیم، که از نظر شیمیایی تنظیم می‌شوند، ساخته می‌شود. شکل‌گیری فرم ارگانیک از طریق توزیع و افزودن مواد عرضه شده می‌باشد. در جایی که مواد بیشتر تولید می‌شوند یا رشد سریع‌تر است، کمبود فضا منجر به تولید انحنا و فرم‌های پیچیده هندسی می‌شود (شکل ۱۱).

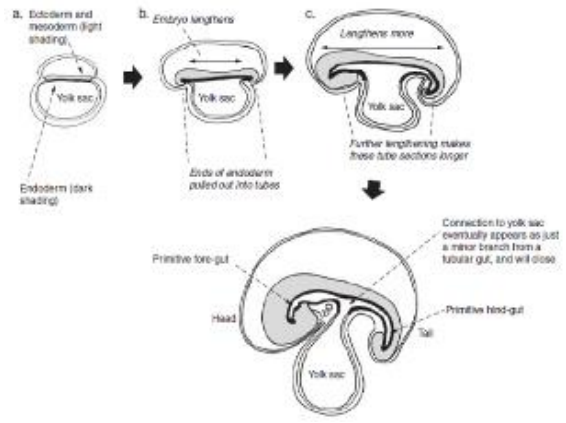

Fig. 11. Increased body length of the human fetus, along with the formation of neural tube (Davies, 2014)

مبنای بیولوژیکی رشد (کد ژنتیکی): ارگانیسم‌ها قادرند از طریق اطلاعات ژنتیکی رشد یابند. پایه بیولوژیکی رشد، دی ان‌ای، اسید دزوسی ریبونوکلئیک ۵۰ است. برنامه‌های وراثتی به شکل دی ان ای۵[۱] همراه با کنترل رشد آر ان‌ای[۵۲] در فرآیند توسعه منجر به تولید یک ارگانیسم می‌شود. در دی ان‌ای یک پلیمر توالی آدنین، تیمین، سیتوزین و گوانین[۵۳]، کد را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۲). در خارج از هسته سلول، اطلاعات ارائه شده توسط آر ان‌ای برای تولید پروتئین استفاده می‌شود که به نوبه خود مسئولیت فرآیندهای خاص و ویژگی‌های فرم ارگانیسم‌ها را به عهده دارند (Smith, 2011).

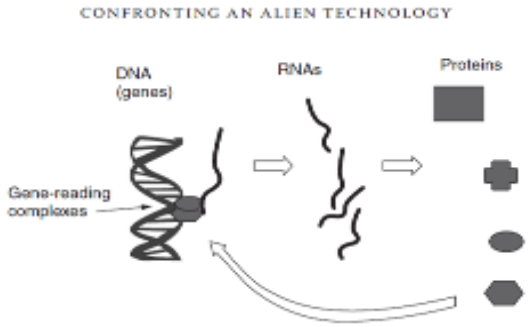

Fig. 12. The nature of the cycle of biological logic
(Davies, 2014)

مورفوجنسیس

در سال‌های اخیر، عمدتاً در قرن بیست و یکم، در بررسی فرآیندهای مسئول رشد حیوانات و گیاهان استفاده از ابزارهای علمی و فنی نوظهور به درک ما از اینکه چگونه سلول‌ها می‌توانند یک "فرمان" را برای تولید و شکل دادن سلول‌های جدید به همان شکلی که خودشان هستند ترجمه کنند، یاری می‌رسانند (شکل ۱۳). به این فرآیند مورفوجنسیس گفته می‌شود (Davies, 2005). کاربرد اصلی آن در زمینه زیست‌شناسی بوده و اولین نمونه‌های ثبت شده در نیمه دوم قرن نوزدهم به وجود آمده است (Rastogi & Sonali, 2017). در ریشه یونانی مورف[۵۵]، به معنی "فرم"[۵۶] و جنسیس[۵۷]، به معنی "خلقت[۵۸]" است. همانگونه که سی اچ وادینگتون[۵۹] تقریباً نیم قرن پیش توضیح داد کلمه "مورفوجنسیس" اغلب

در معنای وسیع برای اشاره به بسیاری از جنبه‌های توسعه و رشد استفاده می‌شود، اما هنگامی که به شکل دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، به معنی مدل‌سازی سلول‌ها و بافت‌ها به اشکال کاملا مشخص می‌باشد (Davies, 2005). درحقیقت مورفوجنسیس طبیعی[۶۰] فرآیندی از توسعه و رشد تکاملی[۶۱] است که باعث می‌شود یک ارگانیسم بتواند شکل خود را از طریق تعامل میان ظرفیت‌های ذاتی سیستم و نیروهای محیط خارجی توسعه دهد (Abdullah, 2019). مورفوجنسیس در مورد چگونگی تولید فرم و ساختارهای زیستی است و در مراتب بالاتر چگونگی اجتماع و شکل‌گیری بافت‌ها در داخل ارگان‌ها و همچنین کل اندام‌های یک ارگانیزم را شامل می‌شود. مورفوجنسیس در زمینه مرتبط با زیست‌شناسی تکاملی با تأکید بر کنترل ژن و سرنوشت سلول‌ها، بررسی می‌کند که چگونه تنظیم و کنترل سرنوشت سلول‌ها به شکل‌گیری فرم و ساختار ارگانیزم و اجزای آن کمک می‌کند (İçmeli, 2014).

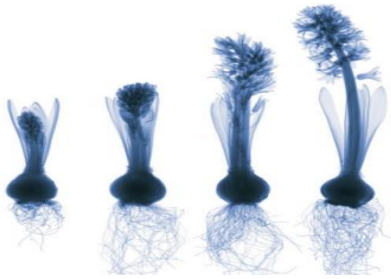

Fig. 13. Ultraviolet rays of 54 spikelets at different stages of growth (Hensel, Menges & Weinstock, 2013, 5)

فرآیند رشد رایانشی در معماری (مورفوجنسیس دیجیتال)

زیست شناسان[۶۲] بیش از پیش با مدل‌های ریاضی و رایانشی[۶۳] که به آن‌ها امکان شبیه‌سازی، درک و پیش‌بینی مکانیزم‌های رشد را می‌دهند، به آزمایش می‌پردازند. این تمایل موجود به مدل‌سازی رایانشی می‌تواند به عنوان یک دستگاه ترجمان میان فرآیندهای مربوط در زیست‌شناسی و معماری به کار برده شود. در این میان مورفوجنسیس می‌تواند در نقش بخش خودکار فرآیند طراحی رایانشی قرار گیرد. رایانه‌ها از برنامه‌نویسی و تنظیمات پیوسته، می‌توانند پیشرفت در فرآیند شکل‌گیری فرم در طراحی را آسان سازند (Roudavski, 2009). در این میان مدل‌های رایانشی و ریاضی[۶۴]، به دلیل مکانیسم پیچیده حاکم بر رشد مورفوژنتیک[۶۵] زیست شناختی، می‌تواند به عنوان یک ابزار در تولید فرم معماری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند برای ایجاد فرآیند رشد و شکل‌گیری فرم معماری همانگونه که در طبیعت موجود است، می‌توان از الگوریتم‌هایی استفاده کرد که معادل ژنوم دستورالعمل رشد را کنترل می‌کنند. این نوع الگوریتم‌ها در حقیقت از فرایندهای طبیعی الهام گرفته شده‌اند که به موجب آن طرح‌های زایشی به عنوان متغیرهای ژنتیکی ایجاد می‌شوند (Sheppard, 2016) (شکل ۱۴).

رشد دیفرانسیلی

رشد فرآیندی پر اهمیت در شکل‌گیری فرم پدیده‌های زیستی می‌باشد که در طول آن فرم در یک چارچوب زمانی مشخص و بر مبنای اطلاعات ژنتیکی در قالب یک دستور عمل برای انجام تفکیک و تمایز سلولی شکل می‌گیرد. حال سوال اساسی اینجاست که چگونه موجود زنده از سلولی واحد به ساختار متمایز پیچیده‌ای تبدیل می‌شود؟ اگر واحدهای سلولی تقسیم و نرخ رشد یکنواختی داشتند، فرم‌های موجود در طبیعت حاصل نمی‌گردید. در حقیقت فرم در پدیده‌های زیستی به یکباره ظهور نمی یابد و طی مراحل پیچیده‌ای در طول زمان، با توجه به نرخ‌های گوناگون رشد، به شکل نهایی خود می‌رسد. بنابراین در طبیعت، این فرآیند شکل‌گیری محصول است که بر خود محصول مقدم است (Davies, 2014). درحقیقت باید گفت رشد یکنواخت نیست، بلکه دیفرانسیلی است. به بیان ساده، برخی از نواحی نسبت به نواحی دیگر رشد بیشتری دارند، و این موضوع منجر به تشکیل اشکال پیچیده می‌شود. در حقیقت رشد دیفرانسیلی، سطحی را شرح می‌دهد که با نرخ‌های مختلف در مکان‌های مختلف رشد می‌کند. در نتیجه از طریق چنین مکانیسمی سیستم‌های زیست‌شناختی می‌توانند اشکال پیچیده‌ای از برهم‌کنش ویژگی‌های فیزیکی سطح و کنترل‌های ساده‌ی نرخ رشد با گذر زمان به وجود آورند. رشد دیفرانسیلی ابتدا در

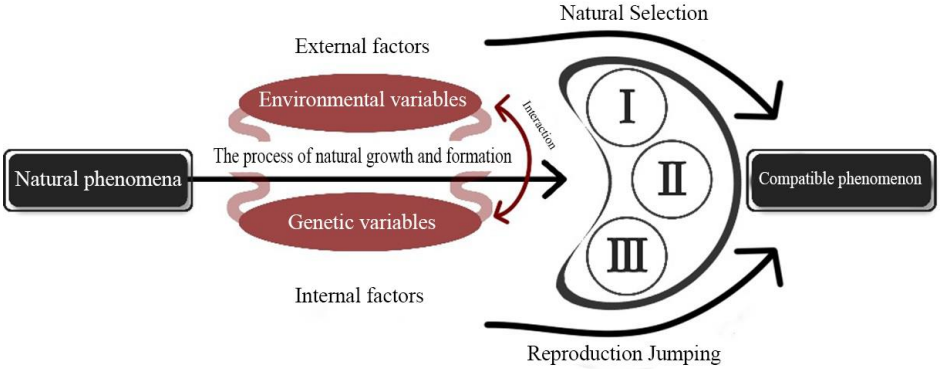

Fig. 14. Diagram of the relationship between genetic factors (internal factor) and environmental factors (external factor) in the growth process (Guidera, 2011)

زیست شناسی و در حوزه‌های گوناگون آن از قبیل منحنی‌های دیفرانسیلی رشد میکروبی برای مطالعه تأثیرات محیط‌های کشت، ژنتیک، و تنش حاصل بر رشد جمعیت میکروبی و همچنین در رشد گیاهان و شکوفایی گل‌ها و نیز در کشف رشد دیفرانسیلی در سیستم عصبی با الهام از پژوهش لکشمینارایانان ماهادیوان انجام شد (Tonner et al., 2016) (شکل ۱۵). چنین فهم نوینی از مکانیسم رشد، زمینه پژوهشی مناسبی در حوزه‌های گوناگون از جمله معماری در راستای تولید الگوهای نوین فرم‌یابی با توجه به اهمیت فرآیند رشد در شکل‌گیری فرم‌های پیچیده طبیعی و تبدیل آن به یک الگوریتم شبیه‌سازی فراهم می‌نماید. با عنایت به این موضوع در بخش بعدی، با تدوین نمونه‌ای از الگوریتم رشد دیفرانسیلی، تولید فرم معماری بر اساس الگوریتم مذکور، مورد آزمایش قرار گرفته شده است.

Fig. 15. Left: Examples of plant differential growth; Right: Examples of differential growth of microbial populations (Tonner et al., 2016)

روش تحقیق

نوع روش تحقیق در بخش نظری پژوهش حاضر به صورت توصیفی- تحلیلی و روش گردآوری اطلاعات مطالعات کتابخانه‌ای و اسناد و مدارک علمی می‌باشد. بدین گونه که پس از بررسی نظریه‌های زیست شناختی مطرح در حوزه رایانش از آغاز تا کنون و متعاقب آن روش های حاصل از این نظریات در فرآیند رایانشی تولید فرم، ، یک چارچوب زمانی جامع از سیر تکوینی نظریات، ارایه گردیده است. در گام بعدی، الگوی رشد دیفرانسیلی به عنوان نمونه موردی انتخاب و مکانسیم حاکم بر آن، بررسی و سپس در قالب یک الگوریتم رایانشی تحلیل و بازشناسی شده است.

در بخش تحلیلی پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت نقش تفکر الگوریتمیک در الگوبرداری از فرآیند رشد و شکل‌گیری پدیده‌های زیستی برای تولید رایانشی فرم معماری، از راهبرد استدلال منطقی جهت برقراری یک نظام فکری منطقی در برقراری رابطه‌مندی میان واقعیت‌های زیستی موجود در فرآیند رشد با ارزش‌های انتزاعی تولید فرم معماری، در جهت شکل‌گیری یک چارچوب مفهومی کلی در راستای تشریح موضوع و تدوین دستورالعمل رشد، استفاده شده است. بعد از شکل‌گیری چنین نظام منطقی، جهت غنای بیشتر آن، روش شناسی شبیه‌سازی ابزاری را فراهم نموده است تا بتوان موضع‌گیری نظری شکل گرفته توسط راهبرد استدلال منطقی در یک آزمون تجربی، تایید گردد.

لذا نحوه بازشناسی الگوی رشد در فرآیند تولید فرم معماری در قالب یک الگوریتم رشد دیفرانسیلی و با استفاده از روش تحقیق شبیه‌سازی با راهبرد استدلال منطقی می‌باشد. ابتدا با استفاده از راهبرد استدلال منطقی داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و یک چارچوب منطقی شکل گرفته است. سپس در راستای اعتبار سنجی چارچوب منطقی مذکور، الگوی رشد از طریق روش شبیه‌سازی در قالب یک الگوریتم رایانشی برای تولید فرم بکار گرفته شده است. به طور کلی تحقیق شبیه‌سازی هم در تدوین نظریه و هم در آزمون نظریه کاربرد دارد. بدین صورت که وقتی یک نظام منطقی تحلیلی شکل گرفت، تحقیق شبیه‌سازی می‌تواند مکمل آزمون باشد و نظام مفهومی تحقیق را تجربی کند (Grout & Wang, 2005). در حقیقت تحقیق شبیه‌سازی، شامل همانندسازی کنترل شده شرایط یا رویدادهای واقعی، برای مطالعه‌ی تعامل‌های پویا در محیط آن شرایط یا رویدادها است (Clipson,1993). به عبارتی نظریه از استدلال منطقی حاصل می‌شود و چارچوب مفهومی آن در یک سامانه منطقی شکل می‌گیرد. سپس مدل بدست آمده در چارچوب شبیه‌سازی، زمینه‌ی مقایسه آگاهانه را فراهم می‌آورد. در نتیجه با توجه به اینکه تحقیق شبیه‌سازی حاصل توجه انسان به تکرارپذیری واقعیت‌های جهان هستی است لذا شکل‌دهی مجازی به فرآیند رشد پدیده‌های طبیعی به جای توجه به محصول نهایی می‌تواند در روش تولید فرم معماری تحولات بنیادین حاصل نماید. لذا در پژوهش حاضر هدف نهایی ارایه مدلی

از رشد در فرآیند تولید فرم معماری می‌باشد. به این صورت که الگوهای رشد در یک الگوریتم زایشی قرار می‌گیرد و قوانین و دستورالعمل‌های تعریف شده به صورت خود سازمانده به تولید محصول که همانا فرم معماری است، می‌پردازد. فرایند الگوریتمیک به عنوان ابزاری پژوهشی در تجزیه تحلیل داده‌ها، اجازه می‌دهد که پژوهشگران بر محدودیت‌های سنتی در شبیه سازی غلبه کنند و به سطحی از پیچیدگی و کنترل دست یابند (Tedeschi, 2014). در پژوهش حاضر جهت انجام آزمایشات شبیه‌سازی، از نرم‌افزارهای راینوکراس[۶۶] و نرم افزونه گراسهاپر[۶۷] و پلاگین‌های مربوطه استفاده گردیده است.

تحلیل داده‌ها

شبیه‌سازی الگوریتم رشد دیفرانسیلی[۶۸] در فرآیند تولید فرم معماری

همانطور که گفته شد، رشد دیفرانسیلی بر اساس تفاوت تدرجی و اندک نرخ رشد در میان اجزا ایجاد می‌شود که در اثر تکرار آن، در فرآیندی تجمعی، منجر به تفاوت کامل میان سلول‌ها، ارگانیسم‌ها و اندام‌ها با سلول و ارگانیسم اولیه می‌شود. در این پژوهش نیز با توجه به این موضوع، الگوریتمی تعریف شده است که در آن، تفاوت تدریجی و تغییر طول میان نقطه‌ها توامان با جلوگیری از برخورد آن‌ها در فاصله‌ای مشخص از یکدیگر موجب رشد هر کدام از نقاط روی سطح مورد نظر می‌شود. این توسعه طول منطبق بر نیاز بیشتر برای جذب منابع بر روی یک سطح اتفاق می‌افتد که نوعی خودساماندهی را شکل می‌دهد. مراحل انجام آزمایش شبیه‌سازی الگوریتم رشد دیفرانسیلی برای تولید فرم معماری در ادامه توضیح داده شده است (شکل ۱۶).

گام اول: ایجاد قیود

- مش[۶۹]: در مرحله اول مش مینیمال سرفیس جیروید[۷۰]، ابتدا به کمک فرمول ریاضیاتی مربوطه و سپس به کمک مش با چند ضلعی محدود[۷۱] ساخته شد که به عنوان یکی از محدودیت‌ها[۷۲] یا شرایط اولیه[۷۳] برای رشد مورد نظر قرار می‌گیرد. در روش اول صفحه دقیق‌تری از نظر هندسه تحلیلی به دست می‌آید و در روش دوم مشی با پیکربندی[۷۴] مشخص و کنترل شده وجود دارد که برای استخراج کرو در مرحله بعد امکانات زیادی را در اختیار قرار می‌دهد.

- کرو[۷۵]: در مرحله بعد به کمک انتخاب نقاطی خاص بر روی مش و طی کردن مسیری بر روی پیکربندی مش می‌توان نقاطی روی منحنی‌های خاص و مهم بر روی مش را به عنوان نقاط شروع رشد برگزید. سه نوع کرو به عنوان نمونه برگزیده شده که متعاقباً در ماتریس زایش مورد بررسی واقع شده است. این کروها بین نقاط میانی و حاشیه‌ای خوشه‌های مختلف در مش انتخاب شده‌اند.

گام دوم: ایجاد مؤلفه‌های شبیه‌سازی

در مرحله پردازش، تمامی متغییرها بر روی نقاط بدست آمده از تقسیم مساوی منحنی از تقسیم مساوی منحنی‌ها نقاطی بدست می‌آید. در مرحله پردازش قوانینی برای رشد تعیین می‌شود که در الگوریتم پیش‌رو به شامل سه دسته است. دسته اول تمام نقاط را بر روی مش اولیه حفظ می‌کند. دسته دوم طول اضلاع میان نقاط را افزایش می‌دهد و دسته سوم مانع از تداخل کره‌ای حول نقاط از فاصله تعیین شده می‌شود که منتج به عدم تقاطع منحنی با خودش خواهد شد. پس از آماده کردن شرایط شبیه‌سازی، به صورت تدریجی طول فاصله و شعاع تداخل زیاد شده و منحنی بر روی سطح مش پیچ و تاب می‌خورد.

گام سوم: ایجاد پویا نمایی و نمایش

در بخش نهایی الگوریتمی برای تصویرسازی و تولید هندسه مش فرآیند رشد و فرآیند پویانمایی و حرکت دوربین، توسعه یافت.

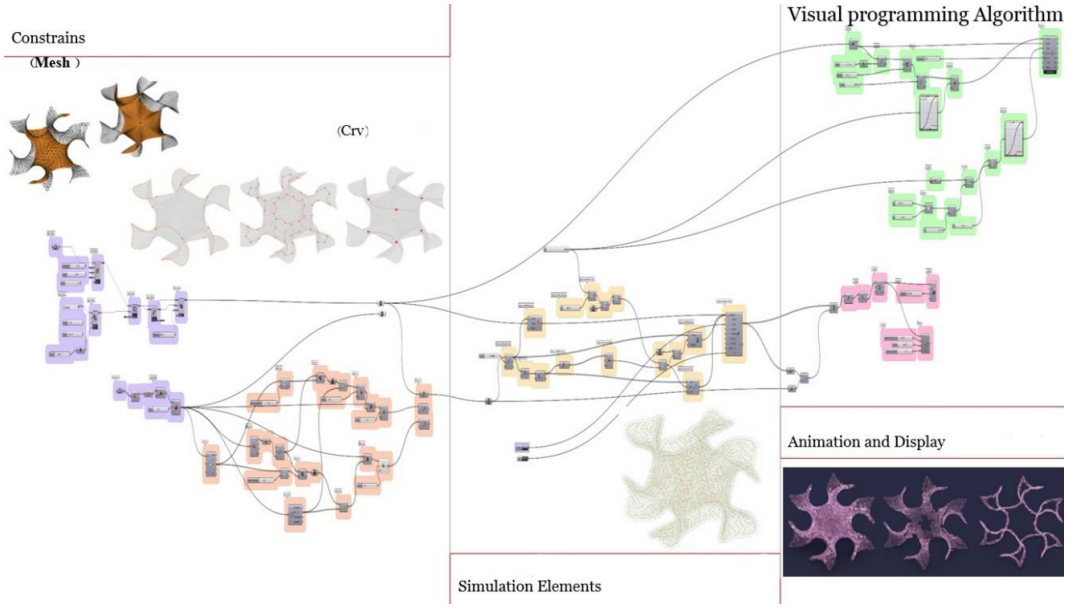

Fig. 16. Visual programming process of differential growth algorithm in producing architectural form

شبیه‌سازی بر اساس یافته‌های پژوهش

مراحل یک فرآیند شبیه‌سازی شده رشد که در یک بازه زمانی انجام شده است، در شکل ۱۷، نشان داده شده است. نتیجه این است که شکل‌گیری فرم معماری براساس پدیده رشد خودسازمانده، همانگونه که در فرم‌یابی پدیده‌های طبیعی رخ می‌دهد، براساس مفهوم مورفوجنسیس زیست‌شناختی در طراحی زایشی در مسیر رایانش امکان‌پذیر می‌باشد. همان گونه که در طبیعت، فرآیندهای گوناگون رشد و شکل‌گیری فرم پدیده‌ها، تابع کُد ژنتیکی می‌باشند، در فرآیند انجام شده در پژوهش حاضر نیز کدنویسی و برنامه‌نویسی در الگوریتم رشد، جایگزین توجه به محصول نهایی، گردیده است. در نتیجه در فرآیند خلق فرم معمار به جای توجه مطلق به فرم نهایی، فرآیند شکل‌گیری فرم را به شکل دستورالعمل‌های رشد تدوین می‌نماید. در نهایت محصول چنین فرآیندی به صورت خودسازمانده و براساس مفهوم رشد، شکل می‌پذیرد. چنانچه فرم الگوریتمیک حاصل از فرآیند رشد دیفرانسیلی پژوهش حاضر نیز در یک فرآیند ساخت و تولید دیجیتال در پروژه‌های معماری و شهرسازی جایگاه نوین و خلاقانه خود را بدست خواهد آورد. این امر مستلزم استفاده از تکنیک‌ها و ابزارهای ساخت و تولید دیجیتال همانند پرینترهای سه بعدی و دستگاه‌های برش سه بعدی و سایر ابزارهای نوین ساخت و تولید دیجیتال می‌باشد. چنانچه در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، فرم حاصل را می‌توان در جایگاه یک پاویلیون نمایشگاهی معماری در نظر گرفت.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش، با دسته‌بندی و تحلیل نظریات مطرح در حوزه رایانش ملهم از فرآیندهای زیست شناختی، با توجه به سلسله مراتب زمانی وقوع آن‌ها، آغاز گردید، سپس با ارایه روش‌های نوین رایانشی ملهم از اصول زیست شناختی ادامه یافت و نهایتا با کاربرد چنین نظریات و روش‌هایی، در ساخت و تولید فرم دیجیتال، خاتمه یافت. نتیجه حاصل، گواهی بر سیر تاریخی-تکاملی چنین رویکردی از سمت تئوری به سوی عمل می‌باشد که به جهت وضوح بیشتر، در زیر یک چارچوب زمانی از سیر تکوینی نظریات، روش‌ها و فرآیند ساخت و تولید ارایه می‌گردد که در نوع خود گامی نو در این حوزه پژوهشی محسوب می‌شود.

هر دوره زمانی ده ساله نشان می‌دهد، نظریه‌های زیست‌شناختی مطرح در حوزه رایانش از دهه ۴۰ قرن بیستم آغاز گردیده و تا کنون ادامه داشته و در حال تکوین است. ولی تا دهه نود، چنین نظریاتی هنوز وارد حوزه رایانشی به صورت روشمند نشدند و ساخت هیچ فرم معماری بر اساس آن‌ها، مشاهده نمی‌گردد. جدول ۱، جدول زمانی طراحی رایانشی و ساخت فرم معماری ملهم از زیست شناسی، را نشان می‌دهد.

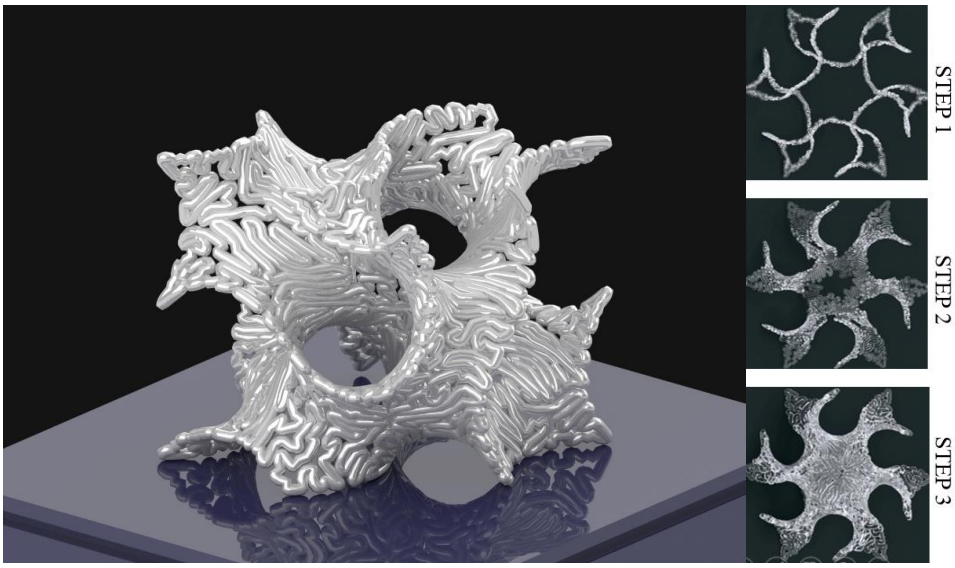

Fig. 17. Growth process of the architectural form generated based on the differential growth algorithm in the third experiment

Fig. 18. Hypothetical exhibition booth form from the differential growth process of simulation experiments

از دهه نود میلادی به بعد تا شروع هزاره جدید، تکوین سریع چنین روش‌های رایانشی در حوزه زایش فرم مشاهده می‌گردد ولی در اینجا نیز همچنان جای خالی ساخت و تولید فرم، محسوس است که در جدول زیر به رنگ قرمز مشخص گردیده است. در نهایت، طی یک دهه آخر تا کنون، شاهد ادغام و یکپارچگی عمیق میان هر سه حوزه زایش رایانشی فرم، ساخت و تولید و حتی ساخت و ساز خود فرم معماری می‌باشیم. در طی این دهه تلاش برای کاربردی ساختن نظریات مذکور درحوزه تولید فرم رایانشی معماری باعث عملکرد گرایانه شدن این حوزه گردیده است. خالی بودن نظریات عمده در این بخش نشان از این موضوع دارد (جدول ۲).

حصول توانایی در شبیه‌سازی نظریات رایانشی، نشان از امکان پذیری الگوسازی فرآیندهای رشد و شکل‌گیری پدیده‌های زیستی در فرآیند تولید فرم معماری در مسیری تحت عنوان رایانش دارد. در این فرآیند، الگوریتم رشد در فضای رایانه‌ای برنامه‌ریزی و معادل‌سازی می‌شود به طوریکه کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر شکل‌گیری و رشد ارگانیزم شناسایی شده، تا در الگوریتم وارد شوند و سپس فرآیند رشد مجازی صورت گیرد. نتیجه چنین الگوریتمی اعمال روش ساخت این ارگانیزم‌ها بر پروژه‌های معماری و بهره‌گیری از ویژگی‌های آن ارگانیزم برای افزایش کارایی فضاست. معماری در این فرآیند می‌تواند کیفیت‌هایی را که فرآیند تولید طبیعی به ارگانیزم بخشیده است به ارث ببرد و در ظاهر و فرم آن و در کارکرد و رفتار آن از ارگانیزم طبیعی الگوبرداری نماید. لازم به ذکر است در پژوهش‌های انجام شده در سال‌های گذشته، بخصوص در سال‌های اخیر بیشتر بر برقراری رابطه‌مندی میان سیستم‌های رایانشی با اصول زیست‌شناسی تأکید می‌شود و بر چگونگی کاربردی‌سازی الگوهای زیستی در یک فرآیند رایانشی و در نتیجه روشمندسازی تولید فرم معماری تأکید کمتری شده است. چنین الگو برداری از پدیده‌های زیستی دامنه وسیعی را در بر می‌گیرد.

تأکید پژوهش حاضر بر اهمیت مکانیسم رشد در شکل‌گیری فرم به عنوان مهم‌ترین دستورالعمل زیست شناختی در ایجاد گوناگونی فرم‌های زیستی می‌باشد. در یک فرایند رشد، با استفاده از روش‌های رایانشی، اشکال طراحی، رشد و نمو می‌نمایند در نتیجه با بکارگیری مجموعه‌ای از قوانین یا همان الگوریتم به شکل کد می‌توان تولید فرم معماری را در یک فرآیند خود سازمانده میسر نمود. در چنین فرآیندی، الگوریتم رشد در فضای رایانه‌ای برنامه‌ریزی و معادل‌سازی می‌شود به طوری که

Table 1. Timeline of computer design and construction of a biology-inspired architectural form from 1940 to 1990

	1940s 1950s	1950s 1960s	1960s 1970s	1970s 1980s	1980s 1990s
Theory	Artificial Neural Network Warren McCulloch, Walter Pitts 1943 Cellular automata Von Neumann	Bionic Jack E. Steele 1958 Biomimetics Otto Schmitt 1950	L-system Aristid Lindenmayer 1968 Genetic Algorithm Evolutionary Computation John Holland 1960	Meme(tic) Richard Dawkings 1976 Fractal Theory Benoit Mandelbrot 1975 Allometry and Architecture Form Ranko Bon 1972	Swarm Intelligence Gerado Beni, Jing wang 1989 A-Life Christopher Langton 1986
Fabrication					
Computational Form Generation	There had not been overcome practical methods during these years				
Form					

Table 2. Timeline of computer design and construction of biology-inspired architectural form from 2011 to 2019

	1990 2000	2000	2019
Theory	Biomimicry Jenine Benyus 1997	The application of the former theories in subsequent sections is noticeable	
Fabrication	There has not been organized methods		EMERGENT/Tom Wiscombe Prototype I-III 2009 Dragonfly 2007 Jenny Sabin and Peter Llord Jones, Lab Studio 2008 Neri Oxman Materilecology 2007 Chris Bosse, Digital Origami, Entry Paradise Pavilion 2007 Matsys/ Andrew Kudless C-Wall 2006 Honeycomb Wall 2006 Emergent Technologies and Design Michael Hensel, Achim Menges 2006
Computational Form Generation	Michael Rosenman and John Gero 1996 Fractal Geometry in Architecture & Design Carl Bovill 1996 Induction Design Makoto Watanabe 1995 Evolutionary Design John Frazer 1995	Dennis Dollens 2005 Genre 8 Una-May O'Reilly, Martin Hemberg, Peter Testa 2001	
Form	Eugene Tsui 1999 Greg Lynn 1995	Federation Square Lab Architecture Studio 2002	

کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر شکل‌گیری و رشد ارگانیزم شناسایی شده، تا در الگوریتم وارد شوند و سپس فرآیند رشد مجازی صورت گیرد. به عبارتی در چنین سیستمی مشخصا خود محصول طراحی نمی‌گردد، در عوض مشخصه سطح بالاتری طراحی می‌گردد که «ساخت» محصول یا روش طراحی را رمزگذاری کرده و با این کار منطق شکل‌گیری فرم را مقدم بر خود فرم می‌شمارند که این امر حاکی از یک تغییر اساسی از سمت مدل‌سازی یک شی از پیش طراحی شده به سوی مدل‌سازی منطق حاکم بر طراحی است. ولی آنچه این پژوهش را متمایز می‌سازد ساخت و تدوین نوعی از منطق رشد و شکل‌گیری فرم بر پایه الگوریتم رشد دیفرانسیلی، در راستای روشمندسازی تولید فرم معماری می‌باشد.

رشد دیفرانسیلی نوعی از الگوریتم‌های رشد می‌باشد که علی رغم توجه زیست شناسان به آن، در حوزه معماری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با برنامه‌نویسی دستورالعمل رشد دیفرانسیلی، مدلی از رشد شکل گرفت که در آن، فرآیند رشد، به صورت غیر مستقیم و خود سازمانده منجر به شکل‌گیری فرم معماری شد فلوچارت زیر نشان‌دهنده منطق حاکم بر فرآیند تولید فرم معماری در شبیه‌سازی الگوریتم رشد دیفرانسیلی آزمایش انجام شده می‌باشد (شکل ۱۹).

فرم حاصل از چنین فرآیندی ابتدا در محیط مجازی با وارد کردن پارامترهای گوناگون محیطی و همچنین الگوهای گوناگون رشد، تولید می‌شود. سپس در صورت پاسخگو بودن به شرایط و پارامترهای محیطی مذکور، در یک مسیر ساخت دیجیتال قرار گرفته و به شکل فیزیکی ساخته می‌شود. در نتیجه، حضور چنین فرم‌هایی در آینده نه چندان دور در محیط‌های شهری و معماری درو از ذهن نمی‌باشند. بدیهی است مسیر پژوهش صورت گرفته بیشتر در حوزه نظر بوده و سعی در ایجاد یک منطق طراحی نوین از مسیر الگوهای رشد در حوزه معماری شده است و امید است در عمل نیز بر طبق پیشنهادهای داده شده در راستای ساخت و تولید دیجیتال گام‌هایی توسط پژوهشگران بعدی برداشته شود. طبیعتا این پژوهش شروعی برای پژوهش‌های بعدی در حوزه‌هایی چون زیست‌شناسی و الگوریتمیک بوده و پژوهشگران بعدی می‌توانند سایر الگوهای طبیعی را با دامنه وسیع‌تری از متغییرها در فرآیند الگوریتمیک مورد بررسی و آزمایش قرار داده و در بسط ادبیات موضوع تحقیق گام بردارند.

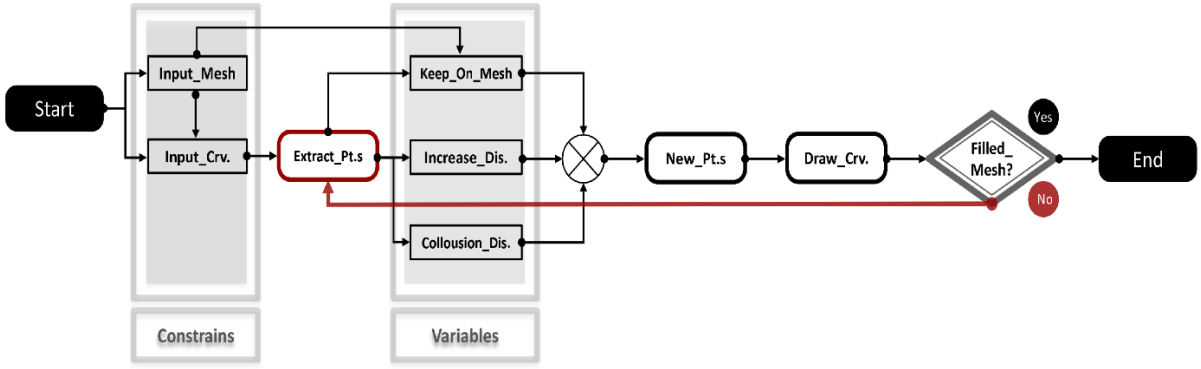

Fig. 19. Logic governing the differential growth algorithm in the process of producing the architectural form of the third experiment

پی‌نوشت

۱. Computation: رایانش به هرگونه فرایند محاسباتی ریاضی و منطقی از طریق الگوریتم‌ها اطلاق می‌شود که در آن داده‌های ورودی توسط رایانه و ابزارهای دیجیتال بر اساس قواعد تعریف شده‌ای در راستای تولید اکتشافی یک فرم به عنوان خروجی، پردازش می‌شوند.

2. Cellular Automaton
3. John von Neumann
4. Stanislaw Ulam
5. Nils Barricelli
6. Complex Systems
7. Genetic Algorithm
8. Evolutionary Computation
9. John Holland
10. Problem-Solving

۱۱. Generative Algorithm: الگوریتم مجموعه مشخصی از دستورات به زبان رایانه است که اطلاعات را به عنوان ورودی دریافت کرده، پردازش می‌کند و پاسخ آن را در خروجی به ما ارائه می‌دهد. در این راستا الگوریتم‌های زایا در معماری، الگوریتم‌هایی هستند که توان تولید پاسخ‌های متعدد طراحی را از طریق تکثیرعناصرتکرار شونده با روش‌های الگوریتمیک را دارند .

12. L-system (the Lindenmayer System)
13. Aristid Lindenmayer
14. Fractal Theory
15. Felix Hausdorff
16. Benoit B. Mandelbrot
17. Self-Similar
18. Michael Hensel
19. Achim Menges
20. Michael Weinstock
21. Emerging Design Principles
22. Morphogenesis
23. Morpho-Ecology
24. Andrew Kudless
25. Material Assemblies

۲۶. Manifold: این پروژه تحقیقاتی، برمبنای گسترش و توسعه یک سیستم لانه زنبوری است که از طریق سیستم طراحی زایا با محاسبه پارامترهای دخیل در شکل‌گیری هندسه در مواد شکل گرفته است.

۲۷. P_ Wall: پروژه دیوار پی، بر مبنای تاثیر عوامل محیطی در شکل‌گیری فرم مواد، به تولید واحدهای سلولی با شکل‌های متنوع می‌پردازد که در کل به یک سیستم واحد تبدیل می‌شوند.

۲۸. C_Wall: یک پروژه تحقیقاتی در مورد تجمیع واحدهای سلولی در یک سیستم سازه‌ای با استفاده از الگوریتم ورونویی می‌باشد.

29. Voronoi Algorithm
30. Honeycomb System
31. Chris Bosse

32. Optimization Technique
33. Entry Paradise Pavilion Project

۳۴. Digital Origami: این پروژه در دانشگاه فناوری سیدنی توسط کریس باس، در سال ۲۰۰۷ با هدف آزمایش تاثیر هوش کوچکترین واحد بر کل سیستم در تولید فرم‌های طبیعی همانند صخره‌ها در اکوسیستم که در آن اجزای منفرد در همزیستی با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و ایجاد یک سیستم سازمانی بزرگتر و پایداری آن به هوش آن‌ها بستگی دارد، صورت پذیرفت. در این پروژه از ۳۵۰ واحد تشکیل دهنده استفاده شده است.

35. Neri Oxman
36. Materialecology
37. Jenny Sabin
38. Peter Lloyd Jones
39. Labstudio

۴۰. Generative Design: طراحی زایشی به کارگیری مجموعه‌ای از قوانین یا همان الگوریتم برای تولید یک طرح یا آنچه می‌تواند به عنوان فرم معماری نامیده شود، می‌باشد. طوری که در طول فرایند طراحی، طراح به جای تعامل مستقیم با محصول، با منطق حاکم بر تولید محصول سرو کار دارد.

41. Adaptive Building Skins
42. Material Assemblies

۴۳. Branching Morphogenesis: این پروژه نمونه‌ای از انتقال اطلاعات مربوط به داده‌های زیست‌شناسی برای تولید هندسه و فرم معماری می باشد که در قالب فعالیت پژوهشی مشترک میان معماری و زیست‌شناسی توسط جنی سابین به عنوان معمار و پیتر لوید جونز به عنوان زیست‌شناس صورت پذیرفته است. در این اثر، روابط جزء به کل شبکه‌بندی ایجاد شده در سلول‌های عروقی ریه به وسیله تصویربرداری از آن‌ها بررسی شده و دریک فرآیند تولید فرم، به صورت ۵ لایه بهم پیوسته با بیش از ۷۵۰۰۰ اتصال کابلی ساخته شده است.

۴۴. Poly Thread: پلی ترید در یک فرآیند اکتشافی ساخت و تولید رایانشی دیجیتال از طریق نرم‌افزار های پارامتریک بر پایه مدل‌سازی ریاضی و با الهام از شبکه‌بندی‌های موجود در طبیعت در سال ۲۰۱۶ انجام گرفته است و در حال حاضر در موزه هنر سن خوزه به نمایش گذاشته شده است.

۴۵. Ground Substances: این پروژه بر پایه طراحی سطوح، توسط جنی سابین و اندرو لوسیا به عنوان معمار با همراهی پیتر لوید جونز و آنت فیرو به عنوان زیست‌شناس در قالب یک پژوهش تجربی تولید هندسه سطح از طریق مدل‌سازی دیجیتال و با استفاده از فن‌آوری پیشرفته در چاپ سه‌بعدی، رفتار سطوح را در سیستم‌های زیست‌شناختی بررسی می‌کند. مدل نهایی از ۱۴۶ قطعه چاپ سه‌بعدی متصل به هم با میله‌های آلومینیومی و کابل تشکیل شده است.

46. Nonlinear Fabrication
47. Self-Assembly
48. Individual
49.Type

۵۰. Deoxyribonucleic Acid: اسید دزوسی ریبونوکلئیک نام کامل دی ان ای می باشد.

۵۱. DNA: دی ان ای، به عنوان پایه بیولوژیکی تکامل و رشد، یک پلیمر طولانی است که ساختار آن شباهت به یک نردبان دارد که برای ایجاد مارپیچ دوگانه خم شده است. دستور عمل رشد از طریق دی ان ای به پروتئین‌ها ترجمه شده و اجرا می‌گردد.

۵۲. RNA: در طول فرایند انتقال اطلاعات، ارتباط میان جفت پایه‌ها باز می‌شود و قطعه ویژه‌ای به نام آر ان ای کپی می‌شود. در خارج از هسته سلول، اطلاعات ارائه شده توسط آر ان ای برای تولید پروتئین استفاده می‌شود که به نوبه خود مسئولیت فرآیندهای رشد در ارگانیسم‌ها را به عهده دارند.

۵۳. Adenine, Thymine, Cytosine and Guanine: ستون فقرات دی ان ای از مولکول‌های شکر و فسفات تشکیل شده است که چهار جفت پایه اتصال را حمل می‌کنند. توالی این واحدها، یعنی آدنین، تیمین، سیتوزین و گوانین، کُد را تشکیل می‌دهد.

54. Hyacinth
55. Morph
56. Form
57. Genesis
58. Creation
59. C.H. Waddington
60. Natural Morphogenesis
61. Evolutionary Development and Growth
62. Developmental Biologists
63. Mathematical and Computational Models
64. Computational and Mathematical Models

۶۵. Morphogenetic Growing: در زیست‌شناسی، کلمه مورفوجنسیس در معنای وسیع کلمه اغلب جهت اشاره به بسیاری از جنبه‌های رشد و مکانیسم حاکم بر آن به کار می‌رود، الگوگیری از این فرآیند می‌تواند در مدل‌سازی پدیده‌ها بکار گرفته شود.

۶۶. Grasshopper: گراسهاپر یک زبان و محیط برنامه‌نویسی بصری است که در داخل برنامه راینو اجرا می‌شود. این برنامه توسط دیوید روتن در رابرت مک نیل و همکاران ایجاد شد که در درجه اول برای ساخت الگوریتم‌های زایا استفاده می شود.

۶۷. Rhinoceros: برنامه طراحی سه‌بعدی رایانه‌ای که افزونه گراسهاپر بر روی آن قابلیت نصب و اجرا دارد. این برنامه توسط دیوید روتن ایجاد شده است.

68. Differential Growth
69. Mesh

۷۰. Morphogenetic Growing: جیروئید یکی از انواع سطوح حداقلی می‌باشد که به شکل تکرار شونده سه‌گانه از بینهایت سطوح بهم پیوسته می‌توانند حاصل گردد که توسط آلن شوئن در سال ۱۹۷۰ کشف شد.

71. Lowpoly
72. Constrains
73. Initial Statement
74. Topology
75. Crv

تشکر و قدردانی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

تاییدیه‌های اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که کلیهٔ اصول اخلاقی انتشار اثر علمی را براساس اصول اخلاقی COPE رعایت کرده‌اند و در صورت احراز هر یک از موارد تخطی از اصول اخلاقی، حتی پس از انتشار مقاله، حق حذف مقاله و پیگیری مورد را به مجله می‌دهند.

منابع مالی/ حمایت‌ها

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

مشارکت و مسئولیت نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌دارند به‌طور مستقیم در مراحل انجام پژوهش و نگارش مقاله مشارکت فعال داشته و به طور برابر مسئولیت تمام محتویات و مطالب گفته‌شده در مقاله را می‌پذیرند.

References

1. A & Prusinkiewicz, P. (1990). The Algorithmic Beauty of Plants. New York: Springer-Verlag
2. Abdullah, A.A., (2019), Computational Approach and Morphogenesis; Role of Nature in Concept Generation Processes in Design and Architecture, Journal of Design Studio, V.1, N.1, pp 22–28.
3. Antonelli, P. Curator, S. (2020). Neri Oxman: Materialogy. New York: The Museum of Modern Art, New York
4. Avalaible from: http//: fractalus.com [Accessed 3 January 2017]
5. Beni, G. (2004). From swarm intelligence to swarm robotics. Paper presented at the International Workshop on Swarm Robotics.
6. Bonabeau, E., Dorigo, M. & Theraulaz, G. (1999). Swarm intelligence: from natural to artificial systems (No. 1). Oxford University Press.
7. Bosse, C. 2020. Available from: http://www.chrisbosse.com [Accessed 23 April 2020]
8. Bovill, C. (1996). Fractal geometry in architecture and design.
9. C. 1993. Simulation for planning and design. New York: Springer Science + Business Media
10. Christos Stergiou and Dimitrios Siganos, "Neural Networks, " Surprise 96 (London: Imperial College of Science, Technology, and Medicine).
11. Farahani, F. (2016). Man, nature, design: the reflection of nature in art and architecture. Isfahan: Publication of Gofteman-e-Andishe-ye-Moaser. [In Persian]
12. Frazer, J. (1995). An evolutionary architecture. London: Architectural Association Publications.
13. Frazer, J. H., Frazer, J. M., Liu, X., Tang, M. X. & Janssen, P. (2002). Generative and evolutionae ry techniques for building envelope design. 5th International Generative Art Conference.
14. Frenay, R. (2008). Pulse: The coming age of systems and machines inspired by living things. Lincoln: University of Nebraska Press.
15. Ghobadian, V. (2009). Principles and Concepts in Contemporary Western Architecture (12th edition). Tehran: Cultural Research Office. [In Persian]
16. Golabchi, M. (2012). Interaction between technology and architecture: a review and critique of Norman Foster's works. Tehran: University of Tehran Press. [In Persian]
17. Graph-Grammars and Their Application to Computer Science 291 (1987)
18. Grout, L., & Wang, d. (2005). Research Method in Architecture, (Translator: Einifar, AR), Tehran: University of Tehran. Publishing Institute. [In Persian]
19. Gruber, P. (2016). Bionic architecture (Biological Patterns in Architecture)., (Translator: Zare, M.), Tehran: University Jihad, Publishing Organization. [In Persian]
20. Guidera, S. (2011). Conceptual Design Exploration in Architecture Using Parametric Generative Computing: A Case Study. Connecting Concepts in Sustainable Design and Digital Fabrication: A Project-Based Learning Case Study (pp. 2728–2748). Bowling green: American Society for Engineering Education.
21. Hemberg, M. 2009. Genr8. Avalaible from: http: // projects. csail. mit .edu/emergentDesign/genr8 [Accessed 5 February 2017]
22. Hensel, M. & Menges, A. (2008). Versatility and Vicissitude: An Introduction to Performance in Morpho-Ecological Design. Architectural Design, 2 (78): 6-11.
23. Hensel, M. (2014). Performance-oriented architecture: rethinking architectural design and the built environment. John Wiley & Sons.
24. Hensel, M. U. (Ed.). (2008). Versatility and vicissitude: performance in morpho-ecological design. Wiley.
25. Hensel, M., Menges, A. & Weinstock, M. (2013). Emergent technologies and design: towards a biological paradigm for architecture: Routledge.
26. Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. Scientific American, 267: 66-72.
27. Ichmeli, M, (2014), Digital Morphogenesis in Architectural Design, Gediz University, Architecture Department.
28. Iwamoto, L. (2009). Digital fabrications: architectural and material techniques. Princeton Architectural Press.
29. Jamie, A. (2015). Mechanisms of Morphogenesis Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK, Elsevier Academic Press.
30. Kaboli, M.H. & Khandan, E. (2015). 101 Biomimicry Propositions in Architecture. Tehran: First and last Publications. [In Persian]
31. Khabbazi, Z. (2014). Digital design processes. Mashhad: Kasra Library. [In Persian]
32. Khabbazi, Z. (2016). Algorithmic architecture paradigm. Mashhad: Kasra Library. [In Persian]
33. Khabbazi, Z. (2016). Digital material leakage. Mashhad: Kasra Library. [In Persian]
34. Klooster, T. (2009). Smart surfaces–and their application in architecture and design. Germany: Birkhauser.
35. Klooster, T. Boening, N. Davis, S. & Seeger, A. (2009). Smart surfaces: and their application in architecture and design Vol. 85 Birkhäuser Basel.
36. Kudles, A. 2020. Matsys. Avalaible from: https: //www.matsys.design [Accessed 24 Mrach 2020]
37. Kudless, A. Bodies in Formation: The Material Evolution of Flexible Formworks (2011). California College of the Arts.
38. Leach, N. (2015). Digital cities. Architectural Design, 4 (79): 6–13.
39. Mairopoulos, D. (2015). M-Cell assembly. Doctoral dissertation. Massachusetts Institute of Technology (MIT)
40. Massachusetts Institute of Technology School of Architecture. 2020. Available from: http://www.architecture.mit.edu [Accessed 3 January 2019]

41. Oxman, N. (2012). Toward a material ecology. In 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), San Francisco.
42. Oxman, N. 2020. Materialecology. Avalaible from: https: //www.neri.media.mit.edu [Accessed 10 January 2019]
43. Prusinkiewicz, P. (1986). Applications of L-systems to computer imagery. Paper presented at the International Workshop on Graph Grammars and Their Application to Computer Science.
44. Qaruni Isfahani, F. (2015). Bionic architecture, nature's design. Tehran: Moallef. [In Persian]
45. Rastogi, Manit., Rastogi, Sonali., (2017). Morphogenesis: The Indian Perspective. The global context Images Publishing Dist Ac, India
46. Robert, A. W. & Frank, K. (2012). The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences.
47. Rosenman, M. & Gero, J. (1999). evolving designs by generating useful, complex gene structures. Evolutionary design by computers: 345.
48. Sabin, J. 2020. Jenny Sabin Studio. Available from: https://www.jennysabin.com [Accessed 8 February 2020]
49. Sabin, J.E., Lloyd Jones, P. (2017). LABSTUDIO: Design Research Between Architecture and Biology. London & New York: Routledge Taylor & Francis.
50. Schmidt, P. Stattmann, N. (2009). UNFOLDED: Paper in Design, Art, Architecture, and Industry: Birkhäuser.
51. Steadman, P. (2008). The Evolution of Designs: Biological Analogies in Architecture and the Applied Arts Routledge.
52. Steadman, P. (2008). The Evolution of Designs: Biological Analogies in Architecture and the Applied Arts Routledge.
53. Taraz, M. (2012). Bionic architecture (bio-industry), design of science and technology park. Master Thesis. Tehran: University of Tehran, Fine Arts Campus, Faculty of Architecture. [In Persian]
54. Tedeschi, A. (2014). AAD, algorithm-aided design: parametric strategies using Grasshopper. Le Penseur publisher.
55. Tonner, P.D, Darnell, C.L, Engelhardt, B.E, Schmid, A.K. (2016). Detecting differential growth of microbial populations with Gaussian process regression. Program in Computational Biology and Bioinformatics, Duke University, Durham, NC27708, USA.
56. Turani, A.R. (2014). Theoretical foundations in third millennium architecture. Tehran: First and last publications.
57. Wilson, R. A. & Keil, F. C. (2001). The MIT encyclopedia of the cognitive sciences. MIT press: 37-39.
58. Winston. Patrick H. (1992). Artificial Intelligence. [In Persian]