Philosophy of Science, Institute for Humanities and Cultural Studies (IHCS)
Biannual Journal, Vol. 14, No. 1, Spring and Summer 2024, 253-286
https://www.doi.org/10.30465/ps.2025.51556.1775

From Nature to Technological Architecture:

An Epistemological Framework

Mahdi Motamedmanesh*

Abstract

This article offers a critical reassessment of the dominant narrative in architectural historiography, challenging the myth of the "heroic architect" as the sole originator of structural innovation. Through a three-phase framework—from intuitive imitation to analytical abstraction and finally mutual interplay—it argues that modern structural breakthroughs were not products of isolated genius but the result of a sustained intellectual, philosophical, and experimental tradition. Nature, in this context, functioned not merely as aesthetic inspiration but as an epistemological and procedural partner in design thinking. The widespread use of small-scale models in the twentieth century architecture is examined as a pivotal tool for generating architectural knowledge. By revisiting the works of prominent figures of tectonic architecture, the study demonstrates how architectural form emerged from interdisciplinary discourse and cultural continuity rather than rupture. Ultimately, innovation is recast as a collective and cumulative process, embedded within a deeper heritage of dialogue between human reason and natural order.

Keywords: Innovation, Biomimicry, Architectural Epistemology, Small-scale Modeling.

* Assistant Professor of Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, m.motamed@modares.ac.ir
Date received: 29/03/2023, Date of acceptance: 23/04/2023

فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
دوفصل‌نامهٔ علمی (مقالهٔ پژوهشی)، سال ۱۴، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳

از طبیعت تا معماری فناورانه؛
چارچوبی معرفت شناختی

مهدی معتمدمنش*

چکیده

این مقاله با بازخوانی انتقادی روند تاریخی نوآوری در معماری، روایت رایج از «معمار قهرمان» را به چالش می‌کشد و نشان می‌دهد که نوآوری‌های معماری و سازه‌ای مدرن، نه زاده نبوغ فردی، بلکه نتیجه تداوم سنتی معرفتی، فلسفی و تجربی در تعامل با طبیعت بوده‌اند. با تکیه بر تحلیل سه‌مرحله‌ای—از تقلید شهودی تا انتزاع تحلیلی و نهایتاً تعامل متقابل—مطالعه حاضر نشان می‌دهد که طبیعت، نه تنها الهام‌بخش زیباشناختی، بلکه شریک روشی و شناختی در فرآیند طراحی بوده است. در این چارچوب، مدل‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس به‌عنوان ابزارهای تولید دانش و آزمایش فرم، جایگاهی کلیدی در معماری قرن بیستم یافتند. مقاله با بررسی معماری چهره‌های برجسته معماری فناورانه، روند شکل‌گیری زبان سازه‌ای مدرن را بر بستری فلسفی و میان‌رشته‌ای بازمی‌خواند و در نهایت، نوآوری را نه به‌مثابه گسستی قهرمانانه، بلکه به‌عنوان امتدادی جمعی در میراث فرهنگی معماری تبیین می‌کند.

کلیدواژه‌ها: نوآوری، زیست‌الهام، معرفت‌شناسی معماری، مدل‌سازی کوچک‌مقیاس.

۱. مقدمه

در حالی که معماری و مهندسی مدرن فراوان مورد ستایش قرار گرفته‌اند، فرآیندهای ژرف‌تری که امکان نوآوری را فراهم می‌سازند—یعنی مسیرهای فکری، فرهنگی و روش‌شناختی—کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. پرسش‌هایی چون «خاستگاه نوآوری‌های طراحی

* استادیار معماری، دانشگاه تربیت مدرس، m.motamed@modares.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۳

کجاست؟» یا «دانش معماری چگونه تولید می‌شود؟» به ندرت به‌طور نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حالی‌که واکاوی این ابعاد برای درک چگونگی پیدایش ایده‌های دگرگون‌کننده ضرورت دارد. تنها با گذر از توجه صرف به محصول نهایی و پرداختن به چگونگی شکل‌گیری نوآوری‌ها است که می‌توان به ساختارهای پنهان تفکر خلاقانه و مکاشفات فنی پی برد.

مطالعات تاریخی ما را قادر می‌سازند تا نوآوری را نه به‌مثابه رخدادی فردی، بلکه در قالب برآیند نیروهای گسترده فرهنگی، تلفیقی از علم، فلسفه، زیبایی‌شناسی و عمل فیزیکی (material practice) درک کنیم. این موضوع به‌ویژه در معماری صدق می‌کند، جایی که طراحی اغلب با آمیزه‌ای از استدلال تجربی و شهود خلاقانه پیش می‌رود. بسیاری از نظام‌های سازه‌ای (structural systems)که سیمای معماری مدرن را شکل دادند—نظیر صفحات ورق تاشده (folded plates)، سازه‌های فضاکار (space frames)، پوسته‌های بتنی و سازه‌های غشایی (membrane structures)—در دورانی پدید آمدند که ابزار تحلیل ریاضی دقیق یا اصلاً وجود نداشت یا در مراحل اولیه توسعه بود. در چنین شرایطی، معماران و مهندسان نمی‌توانستند صرفاً به محاسبات نظری تکیه کنند. آن‌ها در نتیجه به روش‌های بدیل روی آوردند—روش‌هایی تجربی، ملموس و عمدتاً مبتنی بر مدل‌سازی فیزیکی.

مدل‌های کوچک مقیاس از پروژه‌های ساختمانی این امکان را فراهم می‌آوردند تا چالش‌های طراحی از طریق فراتر رفتن از محدودیت‌های تحلیل نظری، حل‌وفصل شوند. این مدل‌ها صرفاً نقش نمایشگر یا نمادین نداشتند، بلکه به‌مثابه ابزارهایی قیاسی عمل می‌کردند که منطق سازه‌ای (structural logic) نیروهای طبیعی را در خود نهفته داشتند. سادگی‌شان آن‌ها را بدل به نوعی آزمایشگاه قابل‌دسترس برای طراحی می‌کرد. در غیاب محاسبات رایانه‌ای یا نرم‌افزارهای پیشرفته مهندسی، معماران با استفاده از این مدل‌ها رفتار سازه‌ای پیچیده را شبیه‌سازی می‌کردند، ویژگی‌های مصالح را بررسی و قابلیت اجرایی فرم‌های نوین را ارزیابی می‌نمودند (Cowan 1958: 21). نقش پررنگی که این مدل‌های مینیاتوری در فرآیند خلق آثار بدیع معماری داشته‌اند نه تنها در کتب پایه تاریخ مهندسی ساختمان تاکید شده (Cowan 1978: 72, 83; Addiss 2007: 488, 501, 551, 556; Saint 2007: 373-375, 423) ، بلکه در آثاری که معماران این سازه‌ها تالیف نموده‌اند نیز بطور مشخص به دامنه کاربرد مدل‌ها برای اجرایی شدن ایده‌های نوآورانه طراحان اشاره شده است (Nervi 1965: 49, 63, 110; Torroja 2010: 179, 301; Otto, 2010: 76-80, 96-100)

در این بستر، طبیعت نه‌تنها الهام‌بخش زیبایی‌شناختی، بلکه راهنمای کارآمدی، صرفه‌جویی و پایداری بود؛ اصولی که قابل مشاهده، مطالعه و انطباق بودند. معمارانی چون آنتونی گائودی

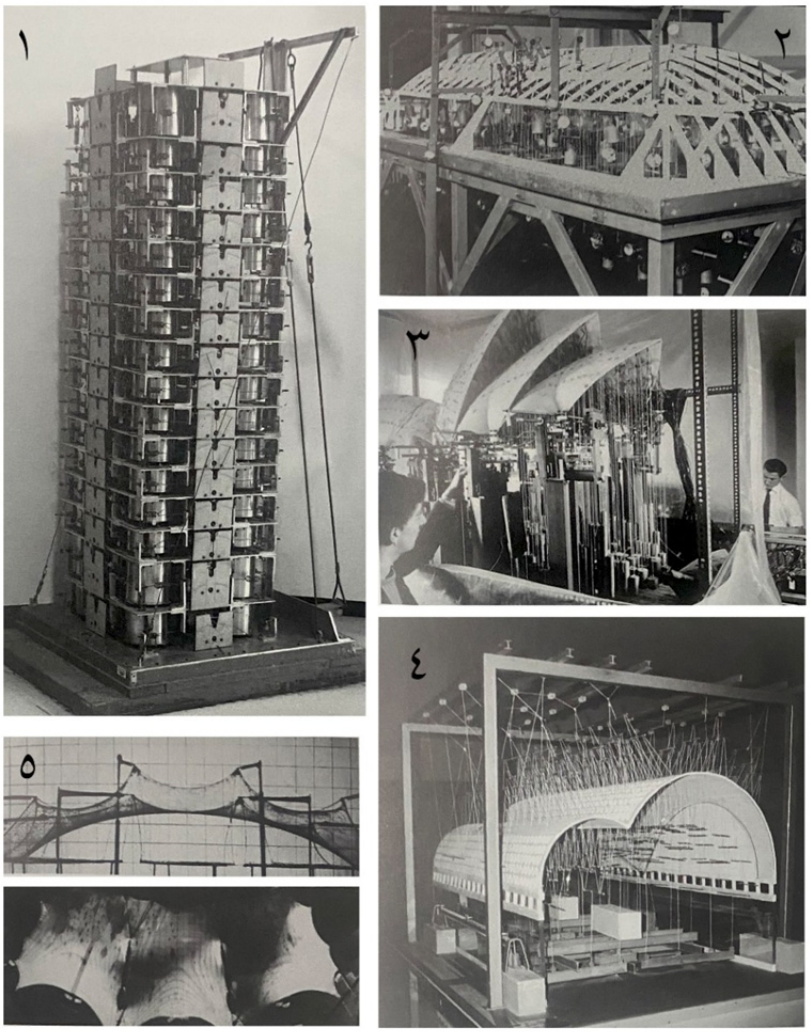
(Antoni Gaudi)، ادواردو تروخا (Eduardo Torroja)، فرای اوتو (Frei Otto) و پیر لوییجی نروی (Pier Luigi Nervi) تنها فرم‌های ارگانیک را تقلید نمی‌کردند، بلکه فرآیندهای طبیعی را به‌مثابه چارچوبی برای نوآوری معماری به کار می‌گرفتند. مدل‌سازی در مقیاس کوچک به‌تدریج جایگاه ویژه‌ای در ابزار طراحی معماری یافت؛ نقشی واسط میان نظریه و عمل، رسانه‌ای برای آزمون، پالایش و تحول ایده‌ها (Addiss 2013: 25-26). به‌ویژه در نیمه قرن بیستم، این مدل‌ها به سکوی کاوش‌های سازه‌ای بدل شدند—ابزارهایی برای تولید دانش و نه صرفاً بازنمایی آن. از خلال آزمایش‌های فیزیکی، فرهنگی نوین در طراحی شکل گرفت که در آن ساخت مدل، هم‌ارز با ساخت معماری تلقی شد (c.f. Addiss 2007: 490-503) .

با وجود نقش بی‌بدیل مدل‌ها در شکل‌گیری زبان معمارانه مدرن، تاریخ معماری و مهندسی کمتر به شیوه‌هایی پرداخته که این ابزارهای سودمند به‌طور نظام‌مند در فرآیند طراحی فرم معماری و جزئیات سازه به کار گرفته شده‌اند. اگرچه در ادبیات معماری، بارها به استفاده از مدل‌های کوچک‌مقیاس در طراحی آثار شاخصی همچون کلیسای خانواده مقدس (Sagrada Familia)، اپرای سیدنی (Sydney Opera House)، استادیوم المپیک مونیخ (Munich Olympic Stadium) اشاره شده است، اما مسیر فکری و عملی‌ای که معماران این پروژه‌ها را به بهره‌گیری از چنین ابزارهایی رهنمون ساخته، هنوز به‌درستی شناسایی و تحلیل نشده است. این خلأ معرفتی، اغلب به تقویت این تصور انجامیده که تنها نبوغ فردی معماران در اتخاذ این راه‌حل‌های خلاقانه نقش داشته است—تصوری که با انتزاع فناوری از بسترهای معرفتی، تجربی و میان‌رشته‌ای‌اش، تنها به ساده‌سازی روندهای پیچیده تولید دانش در معماری منجر می‌گردد. در همین راستا، رابطه معماری با طبیعت—منبعی که به کمک آن سازه‌های کوچک مقیاس ساخته می‌شدند—نیز غالباً در سطحی زیباشناختی یا استعاری تحلیل شده و کمتر به‌مثابه یک تعامل مفهومی-روشی مورد واکاوی قرار گرفته است. این غفلت، مانع از درک نقش طبیعت به‌عنوان یک شریک در فرآیند طراحی و خلاقیت معمارانه شده است.

برای توضیح این مسئله و بازشناسی تاریخی این رویه تاثیرگذار از معماری معاصر، مقاله حاضر چارچوبی مفهومی را پیش می‌نهد که تحول دانش معماری و رابطه آدمی با طبیعت را در سه مرحله متمایز دنبال می‌کند: نخست، تقلید شهودی، که در آن معماران اولیه با الهام مستقیم از مشاهدات طبیعی، فرم‌هایی مؤثر را بازتولید می‌کردند. دوم، انتزاع تحلیلی، که ابزارهایی چون هندسه و تناسب و سپس نظریه‌های مکانیکی عصر روشنگری به آن راه یافتند—هرچند اغلب از واقعیت مادی ساخت‌وساز گسسته بودند. و سوم، تعامل متقابل، که از

اواخر قرن نوزدهم آغاز و در دوره مدرنیسم تبلور یافت؛ جایی که مدل‌های فیزیکی به رسانه‌ای برای درک و بازآفرینی اصول طبیعی بدل شدند. تعامل متقابل فرآیندی بر پایه تجربه و آزمایش بود که در آن مدل‌ها به ترجمان‌هایی تبدیل شدند که مستقیما نیروهای طبیعی را به فرم تبدیل می‌کردند. زنجیرهای آویزان گائودی، غشاهای حباب صابون که اوتو می‌ساخت، و پوسته‌های معکوس ایزلر (inverted plaster shells) همگی بیانگر چرخشی معرفتی به‌سوی یک الگوی نوین طراحی بودند. این الگوی طراحی که پیشتر در تاریخ معماری سابقه نداشت، تنها یک ژست تبلیغاتی نبود، بلکه یک روند دقیق طراحی بود که بر مبنای «هوش پنهان طبیعت» شکل گرفته بود. این هوشمندی این همان عاملی است که سازه‌های خلق شده توسط طبیعت را در غایت بهینگی در مصرف مصالح و انرژی می‌سازد (Hildebrandt and Tromba, 1996: 213-267). اینگونه، معماران از خلال مدل‌سازی استراتژی‌های ساختمانی نوینی پدید می‌آوردند که همزمان کارآمد و زیبا بودند (تصویر ۱).

در پژوهش حاضر، نویسنده مدل کوچک مقیاس را نه ابزاری موقتی در نبود نظریه یا فناوری، بلکه به‌عنوان یک استراتژی طراحی پیشرفته و خلاقانه بازمی‌خواند. با ردیابی نحوه به‌کارگیری این روش توسط چهره‌های کلیدی قرن بیستم، این مطالعه بر تعامل پویای میان آزمایش‌های فیزیکی (توسط مدلسازی کوچک‌مقیاس) و تحول مفهومی در رابطه انسان و طبیعت تأکید می‌ورزد. این پژوهش همچنین با رد افسانه نبوغ فردی، بر سنتی دیرپا از دانش ضمنی، تکنیک‌ها و ابزارهایی تمرکز دارد که از هندسه‌های باستانی و فلسفه طبیعت تا تجربه‌گرایی علمی و فرهنگ مهندسی مدرن امتداد یافته‌اند.



تصویر ۱. نمونه مدل‌های کوچک‌مقیاس برای طراحی سازه‌های شاخص عصر مدرن.
۱. مدلسازی برای شناخت نیروی لرزه‌ای در یک برج در سانفرانسیکو.
۲. مدلی که نروی برای آشیانه‌های هواپیما پیش از جنگ دوم جهانی ساخت.
۳. مدلسازی عملکرد سازه در خانه اپرای سیدنی.
۴. مدل یک استادیوم ورزشی که تروخا در مادرید طراحی کرد.
۵. نمونه آزمایشات اوتو با حباب صابون برای طراحی سازه‌های غشایی.
منبع (Addiss 2007)

افزون بر آن، تحلیل حاضر با دغدغه‌های معاصر—از جمله طراحی پایدار، زیست‌الهامی و آزمایش‌های تجربی—پیوندی وثیق دارد. در عصری که تجرید دیجیتال و اضطرارهای زیست‌محیطی[1] طراحی را احاطه کرده‌اند، بازخوانی شیوه‌هایی که پیشگامان معماری فناورانه از طریق تعامل مستقیم با ماده و فرم طبیعی به قواعد ساختاری دست می‌یافتند، همچنان حائز اهمیت است. مدل‌های کوچک‌مقیاس، با تمام سادگی و شکنندگی‌شان[2] (fragility)، بینش‌هایی بنیادین و درس‌هایی پرشمار درباره فرایند «ساختن» فراهم می‌کنند: از جمله کشف رفتارهای تنش و فرم، دریافت محدودیت‌های مصالح تحت بارهای مختلف، آزمون شهودی پایداری، و خلق فرم‌های کارآمد در تعادل با نیروهای طبیعت. این بینش‌ها نشان می‌دهند که نوآوری در طراحی، بیش از آن‌که از تجزیه و تحلیل انتزاعی ناشی شود، محصول رابطه فعال ذهن، دست و ماده در بستری از آزمون و تجربه است.

ساختار پژوهش حاضر به این قرار است. بخش ۲ نشان می‌دهد که اغلب مطالعات موجود، رابطه میان معماری و طبیعت را صرفاً در سطحی زیباشناختی و نمادین بررسی کرده‌اند، کمتر به ابعاد روش‌شناختی آن در فرآیند طراحی توجه داشته‌اند. بخش ۳ به معرفی چارچوب مفهومی پژوهش می‌پردازد که روند تحول رابطه انسان و طبیعت را در قالبی سه مرحله‌ای صورت‌بندی می‌کند. این چارچوب در بستری تاریخی و با رویکرد توصیفی–تحلیلی، به معرفی جریان‌ها، افراد، و اندیشه‌هایی می‌پردازد که بر شکل‌گیری این سیر تأثیرگذار بوده‌اند. در مرحله نخست (۳–۱)، به تجربه زیسته انسان در جوامع اولیه اشاره می‌شود که با مشاهده مستقیم طبیعت، به تولید فرم‌هایی هماهنگ با محیط و ساختارهای طبیعی می‌پرداختند؛ رویکردی شهودی، تجربی و بدون تئوری‌پردازی صریح. مرحله دوم (۳–۲) به دوره‌ای اختصاص دارد که در آن، طبیعت به موضوعی تحلیلی بدل شد؛ در این مرحله، مدل‌های طبیعی منابعی برای استخراج اصول کارکردی و ساختاری بودند. در نهایت، مرحله سوم (۳–۳) بازتاب‌گر نقطه عطفی است که در آن، طبیعت نه‌تنها الهام‌بخش، بلکه شریک فعال در فرآیند طراحی تلقی می‌شود؛ جایی که مدل‌های کوچک‌مقیاس فیزیکی نقش ابزاری تجربی و روشمند در آزمون و بسط ایده‌های فضایی و سازه‌ای ایفا می‌کنند.

۲. پیشینهٔ تحقیق

علیرغم حضور مداوم طبیعت به‌عنوان منبع الهام در نظریه و عمل معماری، بخش عمده‌ای از ادبیات علمی در این زمینه، رابطه مزبور را تنها به‌طور سطحی مورد بررسی قرار داده است.

پژوهش‌های موجود عموماً بر بازنمایی‌های زیباشناختی یا استعاریِ فرم‌های طبیعی در معماری تمرکز دارند و کمتر به چارچوب‌های مفهومی و روش‌شناختی عمیق‌تری می‌پردازند که چنین تشابهاتی را به ابزارهای مولد طراحی تبدیل کرده‌اند. در نتیجه، دربارهٔ تعامل دوسویه میان اصول طبیعی و نوآوری‌های معماری کمتر نظریه‌پردازی شده است. بیشتر پژوهش‌ها بر شباهت‌های بصری میان فرم‌های آلی و سازه‌های ساختمانی تأکید دارند، در حالی‌که از فرآیندهای شناختی و روش‌های تجربی که طبیعت را به شریک مفهومی و فرایندی در طراحی بدل می‌سازند، غفلت می‌ورزند.

تاریخ‌نگاران معماری اغلب بر «واردات زیباشناختی استعاره‌های زیستی» تمرکز داشته‌اند (Peters, 1996: 356). این رویکردها می‌کوشند نشان دهند که ژست‌های طراحی بیومورفیک چگونه مفاهیمی چون هماهنگی، سرزندگی و کارآمدی را القا می‌کنند، اما اغلب فرم را از روش جدا می‌سازند و طبیعت را به مرجعی نمادین تقلیل می‌دهند. پیشگامان فناوری‌های نوین ساختمانی نیز با وجود دستاوردهایشان، معمولاً خاستگاه نوآوری‌های خود را پنهان کرده‌اند. چهره‌هایی چون اوتو، فولر و نروی بیشتر بر مزایای عملکردی فرم‌های طبیعی تأکید کرده‌اند تا فرآیندهای فکری یا تجربی که الهام را به نوآوری تبدیل کرده است. آن‌ها به‌ندرت در مورد بهره‌گیری از مدل‌های کوچک‌مقیاس به‌مثابه ابزارهای مولد ایده توضیح داده‌اند. این عدم شفافیت روش‌شناختی، درک ما از چگونگی بهره‌گیری از طبیعت به‌عنوان شریکی معرفتی و عملی در فرایند طراحی را محدود ساخته است.

برای نمونه، تروخا در کتاب *فلسفه سازه‌ها*، علیرغم عنوان پرطمطراقی که انتخاب نموده و با وجود پرداختن به فرم و روش‌های ساخت، از شرح تفکر تجربی منتهی به آثار شاخص خود پرهیز می‌کند (Torroja, 1958). اوتوی آلمانی، علی‌رغم شهرتش در سازه‌های کششی زیست‌الهام، به‌ندرت چارچوب ذهنی‌ای را افشا می‌کند که آزمایش‌هایش با حباب صابون را به کاربردهای معماری در مقیاس بزرگ مرتبط ساخت. حتی زمانی‌که از او در مورد تأثیرات فکری دوران شکل‌گیری‌اش پرسیده شد، او این سؤالات را بی‌اهمیت دانسته و تمرکز خود را بر ویژگی‌های مادی مصالح معطوف داشت (Otto & Songel, 2010: 35, 54–55). با آن‌که باک‌مینیستر فولر امریکایی بیشترین ادعاها را در نسبت‌دادن چشم‌انداز طراحی خود به طبیعت داشته است، وی از ارائه شرحی روشن درباره چگونگی ترجمه درگیری ذهنی‌اش با طبیعت در فرآیند طراحی پرهیز می‌کرد. او اغلب به رویدادهای شخصی زندگی‌اش، مانند مرگ دخترش، به‌عنوان نقاط عطفی در شکل‌گیری جهان‌بینی‌اش اشاره می‌کرد (Fuller, 1978; Fuller, 1963)، اما

این تأملات به‌ندرت به منطق طراحی ساختارمند یا قابل‌تکرار منتهی می‌شود. فولر همچنین به پدیده‌های طبیعی ساده، همچون اثر دنباله کشتی‌ها بر سطح آب، اشاره می‌کرد که حس کنجکاوی‌اش را برمی‌انگیخت (Fuller, 1965: 71)، ولی این اشارات نیز بیشتر جنبه الهام‌بخش داشتند تا تحلیلی ساختاریافته.

در نقطه مقابل، نروی ایتالیایی رویکردی بسیار صریح‌تر نسبت به نقش آزمایش‌گری اتخاذ کرد. او آشکارا به نقش محوری آزمون مدل‌ها در فرایند طراحی‌اش اذعان داشت، به‌ویژه در دورانی که روش‌های تحلیلی قابل‌اعتماد برای سازه‌های نوآورانه در دسترس نبود (Huxtable, 1960: 24–25). نروی پژوهش تجربی را تنها راه معتبر برای شناسایی قوانین طبیعی سازه‌ای می‌دانست—مسیری که می‌تواند طراحان را به سوی «سبکی راستین» هدایت کند (Nervi, 1965: 165–66; 1965a: 101). در همین راستا، الادیو دیسته (Eladio Dieste) پاراگوئه‌ای نیز در اظهارات خود به مفهومی با عنوان «اقتصاد کیهانی» اشاره کرده است—مفهومی که فرایند ساخت‌وساز را با نظمی عمیق‌تر و بنیادین‌تر در جهان هستی همسو می‌سازد. از دیدگاه دیسته، طبیعت نه فقط منبعی الهام‌بخش، بلکه به‌مثابه راهنمایی برای طراحی و ساخت تلقی می‌شود (Anderson, 2004: 186). این رویکردها نشان می‌دهند که برخلاف گرایش‌های نمادین یا روایت‌محور، برخی معماران و مهندسان ساختارگرا کوشیدند تا از طریق ابزارهای تجربی و بررسی‌های نظام‌مند، طبیعت را به‌مثابه یک همکار مفهومی و روش‌شناختی در فرآیند طراحی بازشناسند، اما آنان از روش رسیدن به راه میانبری که به منجر به موفقیتهای چشمگیرشان گردید سخنی به عمل نمی‌آورند.

این غفلت از کنه رابطه طبیعت، آدمی و معماری، به‌ویژه هنگامی‌که در چشم‌انداز تاریخی قرار گیرد، نمود برجسته‌تری می‌یابد. از دوران باستان، اندیشه معماری نه فقط برای مدل‌های نمادین یا زیباشناختی، بلکه برای درک مفاهیمی بنیادین چون تناسب، هندسه و ساختار به طبیعت رجوع می‌کرد. بااین‌حال، عمق تفسیر این رابطه در طول تاریخ دچار نوسان بوده است. پیتر کالینز در کتاب دگرگونی آرمان‌ها در معماری مدرن یکی از جامع‌ترین مرورهای تاریخی بر تأثیر زیست‌شناسی در طراحی مدرن را ارائه، و بر تشابهات مورفولوژیک میان موجودات زنده و ساختمان‌ها تأکید می‌کند. او با معرفی مفهوم «زوال و پیشرفت فرم‌ها» (Collins, 1965: 153)، به ظرفیت معماری برای بهره‌گیری از ایده‌های تکاملی جهت بهینه‌سازی طراحی اشاره دارد. هرچند کالینز نمونه‌هایی ارزنده از قیاس میان زیست‌شناسی و معماری ارائه می‌دهد، کار او در پایبندی نظری یکپارچه باقی نمی‌ماند؛ وی اغلب مثال‌ها را به‌عنوان مواردی «جالب‌توجه»

ارائه می‌کند، نه به‌مثابه بخش‌هایی از نظریه‌ای منسجم در خصوص اعتبار یا کارآمدی قیاس‌های زیستی در نوآوری معماری. این رویکرد به‌نوعی مانع از شکل‌گیری دستگاه نظری واحدی درباره نسبت میان زیست‌شناسی و طراحی شده و تأثیر طبیعت بر معماری را در سطحی توصیفی و غیرنظام‌مند نگه می‌دارد (Steadman 2008: 5). در نتیجه، اگرچه اثر کالینز سهم مهمی در گشودن مسیر این بحث داشته، اما از دیدگاه نظری، دستاورد وی بیشتر به تجمیع نمونه‌ها نزدیک است تا توسعه چارچوبی تحلیلی برای تبیین نقش طبیعت در تحول معماری. در کتاب *مطالعاتی در فرهنگ تکتونیک*، کنث فرامپتون معروفترین نظریه‌پرداز معاصر معماری نیز آثار طبیعت‌محور را در چارچوب سنت فناورانه تحلیل می‌کند، اما از پرداختن به چارچوب‌های فلسفی یا علمی که به طراحی آن آثار شکل بخشیده‌اند پرهیز می‌کند (Frampton, 1995). برای نمونه، سهم اندیشه‌های رمانتیک، یا مکاتبی مانند طبیعت‌فلسفی (Naturphilosophie) آلمانی در نحوه درک طبیعت به‌عنوان عاملی فعال در معماری، در پژوهش او نادیده گرفته شده است.

استثنایی درخور توجه در این زمینه، کتاب *تکامل طراحی‌ها* نوشته فیلیپ استدمن (منتشر شده اول بار در ۱۹۷۹) است. وی نخستین بار با بهره‌گیری از قیاس تاریخی میان تکامل زیستی و طراحی، به لزوم مطالعه فرآیندهای تولید دانش طراحی، در کنار محصولات آن، اشاره می‌کند. هرچند تمرکز اصلی او بر نظریه تکامل است تا مدل‌سازی فیزیکی، اما دعوت او به رویکردی تبارشناختی و میان‌رشته‌ای، شالوده‌ای مفهومی برای مطالعه حاضر فراهم می‌آورد (Steadman, 2008).

فراتر از گفتمان معماری، نظریه‌های فلسفی نیز چارچوب‌هایی تفسیری فراهم می‌سازند که به نظر می‌آید می‌توانند در شناسایی غالب مورد نیاز برای درک پدیده‌های مورد توجه در این پژوهش کاربرد داشته باشند. یوهان هویزینگا (Johan Huizinga) در کتاب انسان بازیگر مفهوم «بازی فرهنگی» را نیرویی تمدن‌ساز معرفی می‌کند (Huizinga, 1957). با تمایز میان انسان سازنده (Humo Faber)، انسان خردمند (Humo Sapien) و انسان بازیگر (Humo Luden)، وی بر نقش بداهه‌پردازی و تجربه‌گرایی در خلاقیت انسانی تأکید می‌ورزد؛ رویکردی که با منطق مدل‌سازی در طراحی هم‌راستاست. در امتداد این ایده، میتوان به توماس کوهن (Thomas Kuhn) و ساختار انقلاب‌های علمی او اشاره داشت، که الگویی برای فهم تغییرات معرفتی در نوآوری‌های معماری قرن بیستم ارائه می‌دهد. نظریه تحول پارادایمی او—از مرحله پیشاپارادایمی تا علم عادی و در نهایت تغییرات بنیادین (Kuhn, 1996)—می‌تواند به‌طور موثری بر فرهنگ تجربه‌گرای معماری در بازه زمانی ۱۹۳۵ تا ۱۹۶۵ میلادی منطبق شود. در این بازه،

پیشرفت‌هایی در سازه‌های نوین معماری نه از دل نظریه ناب برای تحلیل سازه‌ها، بلکه از طریق آزمون‌های قیاسی، شهود طراحی و بازخوانی قراردادهای موجود حاصل شد (Motamedmanesh, 2019: 218-220)

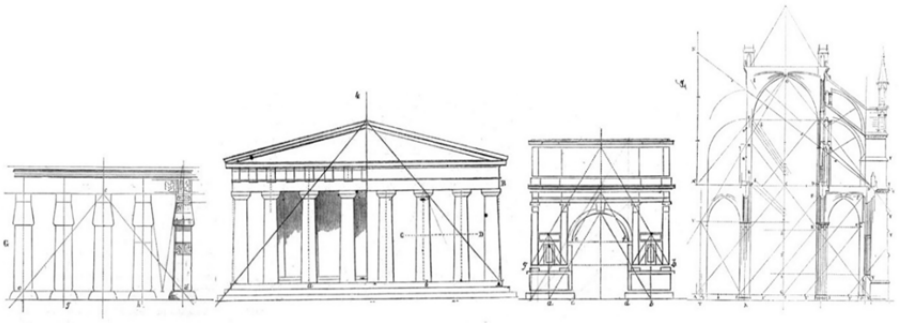
پژوهش حاضر، با تکیه بر این پیوند میان نظریه طراحی، فلسفه علم، و تاریخ معماری، چارچوبی سه‌مرحله‌ای برای رابطه معماری و طبیعت پیشنهاد می‌دهد: از تقلید شهودی، به انتزاع تحلیلی، و سرانجام به تعامل متقابل. این چارچوب نه‌تنها بازتابی از سیر تحول علم—استدلال قیاسی ارسطویی، تا تجربه‌گرایی، و در نهایت عقلانیت نظام‌مند است—بلکه با روایت کوهن درباره رشد معرفت علمی نیز هم‌خوانی دارد. در نهایت، اگرچه پژوهش‌های پیشین بینش‌های ارزشمندی درباره جنبه‌های زیباشناختی و نمادین طبیعت در معماری ارائه کرده است، اما شکافی بنیادین در فهم نقش مدل‌سازی کوچک‌مقیاس به‌عنوان پلی میان الهام طبیعت‌محور و نوآوری معمارانه باقی مانده است. این مطالعه با برجسته ساختن این نقطه کور و پیوند آن با تحولات تاریخی و معرفتی، در پی ارائه نگاهی یکپارچه‌تر به فرآیندهایی است که در آن نیروهای طبیعی نه‌فقط بازنمایی، بلکه کشف و آزموده شده، و نهایتا به زبان ساختاری ترجمه شده‌اند. چنان‌که تاریخ‌نگار برجسته دانش مهندسی بیل آدیس (Addis, 2007: 480; 2013: 12) خاطرنشان کرده، مدل‌سازی نقش بنیادینی در مهندسی مدرن ایفا کرده است—نقشی که تا امروز کمتر شایستگی‌اش مورد توجه قرار گرفته است.

۱.۲ شهود و تقلید؛ گام نخستین مواجهٔ انسان خردمند و طبیعت

طبیعت از دیرباز مرجعی برای نوآوری‌های معماری بوده است. در جوامع نخستین، سازندگان به‌طور مستقیم از محیط پیرامون خود الهام می‌گرفتند—از تنه‌های درخت برای ایجاد گذرگاه بر روی رودخانه‌ها بهره می‌بردند، غارها را به‌منظور پناه‌گیری بازسازی کرده و با مشاهده فرم‌های طبیعی، به ساماندهی مصالح می‌پرداختند. این راهبردهای شهودی، هرچند فاقد نظریه‌پردازی بودند، اما زمینه‌ساز درکی عمیق و تجسم‌یافته از ساختار و فضا شدند (Mainstone, 2001: 327). گذار نوسنگی به زندگی یک‌جانشینی، وابستگی انسان به نظام‌های طبیعی را افزایش داد و منجر به رشد تدریجی آگاهی نسبت به الگوها و تناسبات محیطی شد. این مشاهدات تجربی، به‌تدریج به انتزاع‌های هندسی انجامید. آنچنانکه آثار باستانی شهادت می‌دهند، تمدن‌هایی همچون بین‌النهرین و مصر باستان، به نظام‌مند کردن دانش فضایی پرداختند و بدین‌سان، هندسه نه‌تنها به‌عنوان ابزاری برای محاسبه، بلکه به‌مثابه ابزاری برای بیان منطق

سازه‌ای طبیعت پدید آمد. می‌توان اذعان داشت که هندسه از «تلاش‌های نخستین انسان برای درک فضای جهان پیرامون و قابل‌فهم‌ساختن آن برای اندیشه و عمل» برآمد (Engel, 1997: 330).

فلسفه یونان باستان رابطه میان هندسه و طبیعت را عمق بیشتری بخشید؛ اندیشمندانی چون تالس و فیثاغورس جهان‌شناسی‌هایی را معرفی کردند که در آن، عدد و تناسب صرفاً ابزارهای سنجش نبودند، بلکه تجلی نظمی متافیزیکی به‌شمار می‌رفتند (Gelernter, 1995: Eves, 1976: 57; 46). افلاطون، هندسه را پلی میان جهان محسوس و جهان والا می‌دانست و تناسب را واسطه‌ای میان ماده و معنا می‌انگاشت (Hejazi, 2005: 14–17). در این چشم‌انداز، نسبت طلایی (Golden Ratio) به‌مثابه ثابتی کیهانی در دل فرم‌های طبیعی و آرمان‌های معماری جای داشت (تصویر ۲).



تصویر۲. هندسه مقدس نسبت طلایی در بناهای تاریخی.

منبع (Viollet-le-Duc, 1863)

مهندسی در عهد باستان، به‌شدت تحت تأثیر احترامی بود که نسبت به منطق ساختاری طبیعت وجود داشت و عمل مهندسان تلاش برای شناخت روابط آن دانسته می‌شد (فرشاد، ۱۳۷۵: ۳۳۶). از هندسه‌های مقدس تا فرم‌های نمادین، معماران و سازندگان اولیه در تلاش بودند تا با معرفی الگوهایی تکرارپذیر به هم‌نوایی با قوانین طبیعی دست یابند. رساله‌های معماری، از *ده کتاب در معماری* اثر ویترویوس (Vitruvius) گرفته تا متون گوتیک قرون میانه، این رویه‌ها را به نظام‌هایی از تناسب تبدیل کردند و بدین‌سان، هندسه جایگاه خود را به‌عنوان چارچوبی زیباشناختی و اخلاقی تثبیت کرد.

با این‌حال، این روش‌های شهودی و نمادین، از دقت تجربی لازم برخوردار نبودند. طی قرون متمادی، شکست‌های مکرر سازه‌ها نشان داد که تقلید صرف از طبیعت، بدون پشتوانه

آزمون و تحلیل، محدودیت‌های بنیادینی دارد (Mark, 1996). این تنش میان حکمت موروثی و پیش‌فرض‌های اثبات‌نشده، زمینه‌ساز یک دگرگونی معرفتی شد—مرحله‌ای که در آن، کاوش علمی و عملی، و آزمایش‌گری جایگزین انحصاری هندسه به‌عنوان ابزار شناخت در طراحی معماری گردید.

۲.۲ از ریاضیات تا مکانیک: در جست‌وجوی هماهنگی پنهان جهان

مرحله دوم در تکوین تاریخی رابطه انسان و طبیعت، با ظهور دانش علمی به‌مثابه ابزاری برای رمزگشایی از جهان هستی تعریف می‌شود. این دوران نمایانگر تحولی بنیادین است—گذار از نگاهی رازآلود به طبیعت به‌عنوان قلمرو نیروهای فرامادی، به درکی عقلانی از طبیعت به‌مثابه سامانه‌ای قانون‌مند و قابل‌فهم. برخلاف مواجهه‌های نمادین یا اسطوره‌ای پیشین با طبیعت، رویکرد نوین با ظهور تفکر منطقی، آزمایش‌گری و صورت‌بندی‌های ریاضی مشخص می‌شود. این دگرگونی نه ناگهانی بود و نه یکنواخت؛ بلکه طی قرون متمادی، در پرتو تحولات دینی، فلسفی، هنری و فناورانه شکل گرفت و درک انسان از هستی و جایگاه خود در آن را بازتعریف کرد. در این مرحله، علم تنها به تبیین چگونگی عملکرد عناصر طبیعت نمی‌پرداخت، بلکه در پی پاسخ به چرایی ظهور الگوها و فرم‌های مکرر در جهان بود.

ریشه‌های اندیشه علمی را می‌توان در مشاهده الگوهای تکرارشونده طبیعت یافت—مارپیچ در صدف‌ها و شاخ‌ها، تقارن در برگ‌ها، و الگوی انشعابات شاخه‌ها—که این تصور را برانگیخت که این نظم‌های مشهود تحت سیطره قوانینی نادیدنی و بنیادین هستند. فیثاغورث از نخستین کسانی بود که این ایده را صورت‌بندی کرد؛ او با معرفی مفهوم «هارمونی افلاک» به تطابق نسبت‌های عددی با پدیده‌های کیهانی و موسیقایی اشاره داشت (Hildebrandt and Tromba, 1996: 48). این نخستین تلاش برای بهره‌گیری از الگوهای ریاضی در تبیین واقعیت‌های متافیزیکی بود. باور فیثاغورث به نظمی عددی در سراسر هستی، به سنگ‌بنای پژوهش علمی بدل شد و این فرض را قوت بخشید که پدیده‌های پیچیده ممکن است تابع قوانینی ساده باشند.

درحالی‌که اندیشه فیثاغورث بر خلوص متافیزیکی اعداد تأکید داشت، فیلسوفان بعدی مانند افلاطون و ارسطو دیدگاه‌های تفکیک‌پذیرتری ارائه کردند؛ افلاطون ریاضیات را قلمرو حقیقت‌های انتزاعی می‌دانست و پدیده‌های طبیعی را سایه‌هایی از صور عالم مثال می‌پنداشت. در مقابل، ارسطو با تأکید بر مشاهده و استنتاج منطقی، شناخت طبیعت را از مسیر علیت،

روابط، و تجربه مادی ممکن می‌دانست (Dossey, 1992: 40). این جهت‌گیری ارسطویی، شالوده روش‌شناسی علمی‌ای شد که مشاهده را با منطق در هم آمیخت و زمینه‌ساز علم تجربی مدرن گردید.

این چارچوب‌های فلسفی با افول تمدن‌های کلاسیک از میان نرفتند، بلکه از طریق متفکرانی همچون سن آگوستین (Saint Augustine) و بوئتیوس (Boethius) در الهیات مسیحی جذب و بازتفسیر شدند (Addis, 1990: 57). اما در حقیقت این ساختار یکتاپرستانه ادیان ابراهیمی بود که تأثیر عمیق‌تری بر رابطه انسان و طبیعت نهاد. با اعطای منزلت برتر به انسان— به‌عنوان «جانشین خدا در زمین» (سوره بقره، ۳۰؛ The Book of Genesis, Chapter 1, 26)—این ادیان دیدگاهی انسان‌محور ایجاد کردند که سلطه بشر بر طبیعت را امری مشروع و حتی مقدس تلقی می‌کرد (تصویر ۳). بدین ترتیب، انگیزه بهره‌برداری از طبیعت تقویت شد و نگرانی‌های اخلاقی در مورد برهم‌زدن نظم طبیعی—که پیش‌تر در اسطوره‌ها و باورهای جاندار انگاری (Animatism) پدیده‌های طبیعی نهفته بود—به حاشیه رانده شد. با گسترش ایدئولوژی‌های یکتاپرستانه، طبیعت بیش‌ازپیش در قالب ابزاری قابل تسخیر درک شد. نگرش‌های عرفانی و انیمیستی که زمانی بر برقراری تعادل با طبیعت تأکید داشتند، جای خود را به جهان‌بینی عقلانی دادند که بر مطالعه، شناخت و کنترل طبیعت تمرکز داشت. این دگرگونی، بنیان شناختی قرون وسطی را دگرگون ساخت و از موضعی منفعلانه، به سوی کاوش فعالانه پدیده‌های طبیعی سوق داد.

گرچه اغلب قرون وسطی را با رکود فکری همراه می‌دانند، اما این دوران در توسعه روش‌شناسی علمی نقش کلیدی داشت. تا قرن دوازدهم، فعالیت علمی بیشتر بر گردآوری و تفسیر دانش کلاسیک متمرکز بود (Addis, 2007: 80)، اما در قرن سیزدهم میلادی، رابرت گراستست (Robert Grosseteste) با معرفی روش فرضیه‌ای-استنتاجی، گامی مهم در تفکیک علم از فلسفه صرف برداشت؛ او هندسه را در تحلیل پدیده‌های طبیعی به‌کار گرفت و راه را برای کاربرد صورت‌بندی‌های ریاضی در تبیین قانون‌مند طبیعت گشود (همان). در این دوره، علم اغلب با مفهومی به‌نام «سحر طبیعی» همراه بود. سحر طبیعی نه با خرافات، بلکه با تطبیق کنش‌های انسانی با نظم پنداشته‌شده در طبیعت سروکار داشت (Leiss, 1998: 36–39). این رویکرد، گونه‌ای نیمه‌علمی از جست‌وجوی معرفت بود که می‌کوشید از رهگذر تناظرهای رمزی و ریاضی، رازهای هستی را آشکار سازد. به‌جای آن‌که در تقابل با طبیعت قرار گیرد، درصدد بود تا در چارچوب قوانین آن عمل کند؛ رویکردی که نگرش‌های تجربی سده‌های بعد

را از پیش نوید می‌داد. بدین‌سان، بذرهای فکری علم مدرن، هرچند در قالب‌هایی که هنوز به‌صورت دقیق علمی شناخته نمی‌شدند، در حال جوانه‌زدن بودند.

تصویر ۳.

چپ: مدل شماتیک از یک سامانه استخراج معدن مربوط به سده شانزدهم میلادی، بازتاب‌دهنده نگرش رایج آن دوران به بهره‌برداری از طبیعت.

منبع: (نویسنده، موزه تاریخ هنر وین).

راست: پیمان توردسیلاس، سده پانزدهم میلادی، که سرزمین‌های تازه کشف‌شده را میان اسپانیا و پرتغال تقسیم می‌کرد

منبع: (دایرةالمعارف بریتانیکا).

رنسانس اروپا بار دیگر معرفت کلاسیک را احیاء کرده، عقلانیت، زیبایی و تناسب به‌عنوان نمودهای نظم الهی مورد توجه قرار گرفتند. از دیگرسو، انسان در مرکز توجه قرار می‌گیرد (اومانیسم). نظریه‌پردازان معماری همچون فرانچسکو دی جورجیو (Francesco di Giorgio) میان کالبد انسان و سازه‌های معماری قیاس‌هایی بنیادین برقرار می‌کردند، به‌گونه‌ای که ساختمان همچون پیکری زنده در نظر گرفته می‌شد که اجزای آن باید در هماهنگی عملکردی و فرمی با یکدیگر باشند. در همین راستا، لئوناردو داوینچی با انجام مطالعات کالبدشناختی دقیق، اصول مکانیکی نهفته در بدن انسان را کشف و تحلیل نموده، این اصول را به قلمرو هنر و معماری

گسترش داد. بررسی‌های او درباره مفاصل، عضلات، نسبت‌های اندامی و مرکز ثقل بدن، به وی امکان داد تا ساختارهای طبیعی را به زبان مهندسی ترجمه، از آن‌ها در خلق فرم‌های متعادل و سازه‌های کارآمد بهره گیرد. این پیوند میان فیزیولوژی انسانی و سازمان فضایی، نقش مهمی در شکل‌گیری درک نوینی از معماری به‌مثابه بدن ایفا کرد؛ نگرشی که در دوره رنسانس، پیوند میان زیبایی، کارایی و نظم طبیعت را در طراحی معماری بازتعریف نمود (Steadman, 2008: 16–17; Hughes & Lynton, 1962: 49). با گذار از هندسه مقدس به طبیعت‌گرایی انسان‌مدار، تمرکز بر تعادل، هماهنگی و زیبایی پدید آمد.

رنسانس در ایتالیا با نگرشی تازه نسبت به عقل، تجربه و زیبایی همراه بود. بورکهارت (Burckhardt, 1961: 148–149) خاطرنشان می‌کند که این احیای فکری، به‌ویژه در ایتالیا پررنگ بود؛ جایی‌که کلیسا رویکردی نسبتاً مداراگرانه نسبت به علوم و حتی شبه‌علوم اتخاذ کرده بود. انباشت ثروت، گسترش حس کنجکاوی طبیعی، و حمایت نهادهای حامی هنر و علم، فرهنگی پدید آورد که مشاهده تجربی و کاوش مستقیم را گرامی می‌داشت. بااین‌حال، رنسانس صرفاً جنبشی پیش‌رونده نبود. انسان‌گرایی، علی‌رغم تأکید بر تجربه فردی، اغلب پژوهش متنی را بر آزمایش تجربی ترجیح می‌داد و به‌همین‌سبب، ظهور کامل روش‌های استقرایی را به تأخیر انداخت.

رهایی علم از قیود اسکولاستیک در سده‌های شانزدهم و هفدهم با اندیشمندانی همچون دکارت (René Descartes) و بیکن (Francis Bacon) شتاب گرفت. دکارت با تفکیک دوگانه ذهن و ماده، تفسیری مکانیکی از طبیعت ارائه کرد که در آن، جهان مادی به‌صورت مستقل از مفاهیم روحانی یا اخلاقی قابل مطالعه بود. بیکن به‌مثابه «منشی طبیعت»، روش تجربی را بنیاد نهاد و انسان را ارباب محیط زیست معرفی کرد (Leiss, 1998: 45). مجموع این تحولات، طبیعت را از یک نظام مقدس به موضوعی برای تحلیل، تسخیر و کنترل تبدیل کرد.

در همین بازه زمانی، ارتباطات علمی و فرهنگی با جهان اسلام—از طریق ترجمه متون علمی و تبادلات هنری—افق فکری اروپا را گسترش داد. هنر اسلامی با بازنمایی‌های انتزاعی از طبیعت، و فلسفه اسلامی با تأکید بر طبیعت به‌عنوان نشانه‌ای از نظم الهی، مدل‌هایی بدیل برای پیوند میان زیبایی‌شناسی و دانش عرضه کردند (نصر ۱۳۷۸) (Gelernter, 1995: 80). برخلاف برخی سنت‌های مسیحی که طبیعت را آلوده یا شبهه‌برانگیز می‌دانستند، مکاتب اسلامی تأمل در طبیعت را به‌مثابه بازتابی از خرد الهی ترغیب می‌کردند (Carlson, 2002: 3). این تعاملات، فهمی چندلایه‌تر از طبیعت و دانش علمی در اروپا پدید آورد.

در عصر رنسانس تمثیل میان بدن انسان و معماری به سطحی قابل توجه از ظرافت رسید. تحت تأثیر آثار زیستی ارسطو، اندیشمندان رنسانسی نظریه‌های کلاسیک را از منظر مکانیکی بازخوانی کردند. دستاوردهای ارسطو در کالبدشناسی و فیزیولوژی، بعدها مبنای اندیشه مکانیکی نوین را شکل دادند (Becchi, 2009). برای مثال، لئون باتیستا آلبرتی (Leon Batista Alberti) ساختمان را موجودی زنده تلقی می‌کرد که همچون بدن، از اجزایی چون استخوان، گوشت و عصب ساخته شده است. لئوناردو داوینچی نیز با ترسیمات و دست‌نوشته‌های خود، به‌طور مستقیم، مفاهیم کالبدشناسانه را در مطالعه مکانیک و تعادل به‌کار گرفت. این هم‌نشینی مفهومی نه‌تنها به غنای نظریه معماری افزود، بلکه شالوده‌ای برای شکل‌گیری مکانیک سازه‌ای فراهم ساخت. گالیله در اثر مهم خود، *گفت‌وگو درباره دو علم نوین* (Dialogues Concerning Two New Sciences) در اواسط قرن هفدهم مشاهدات تجربی را با مدل‌سازی ریاضی درآمیخت و اصولی چون مقاومت مصالح و رابطه مقیاس را صورت‌بندی کرد (Addis, 1990: 55). این تلاش‌ها در *اصول ریاضی فلسفه طبیعی* نیوتن (Principia Mathematica) که اواخر همان قرن انتشار یافت، به اوج رسید؛ اثری که با اتکا بر روش‌های استنتاجی و تجربه‌گرایانه، قوانین حرکت و جاذبه را تبیین، و زمینه‌ساز مکانیک به‌عنوان دانشی دقیق شد.

با گسترش افق‌های علمی، نیاز به ابزارهای محاسباتی دقیق‌تر نیز افزایش یافت. نظام عددنویسی رومی و مدل‌های ابتدایی اعشاری، پاسخگوی محاسبات پیچیده نظریه‌های نوین نبود. معرفی نظام عددی هندو–عربی، که از طریق آثار خوارزمی در اروپا رواج یافت، انقلابی در محاسبات پدید آورد (Woods, 2000: 45). اختراع جداول لگاریتمی توسط نپیر (Napier) در ۱۶۱۴ و خط‌کش محاسبه گانتر (Gunter) در ۱۶۲۴ فرآیندهای محاسبه را تسهیل کرد (Addis, 2007: 169). اما دگرگون‌سازترین تحول، اختراع حساب دیفرانسیل و انتگرال بود. هرچند این دستاورد اغلب به نیوتن و لایبنیتس نسبت داده می‌شود، اما پشتوانه آن به متفکرانی چون کاوالیری (Cavalieri)، فرما (Fermat) و والیس (Wallis) بازمی‌گردد (Allen, 1997). حساب دیفرانسیل و انتگرال امکان مدل‌سازی عددی تغییرات فیزیکی پیوسته را فراهم ساخت و شالوده‌ای نظری برای علومی چون کشسانی، آیرودینامیک و مکانیک سیالات پدید آورد (Hildebrandt and Tromba, 1996: 27). حساب تغییرات (Calculus)، که به‌دست برادران برنولی (Bernoulli)، و اویلر (Euler) توسعه یافت، مفهوم شرایط بهینه را معرفی کرد—یعنی بازنمایی ریاضی از رفتار بهینه سامانه‌های طبیعی (Gelfand et al., 2000: 3). نقطه اوج این پیشرفت نظری در مکانیک تحلیلی لاگرانژ (۱۷۸۸) نمود یافت؛ اثری که اصل کمینه‌سازی کنش مائوپرتویس

(Maupertuis) را با ابزارهای ریاضی نوین فرمول‌نویسی مجدد کرد (Gabbey, 2003: 504). این چارچوب، سازوکارهایی را برای توضیح بهره‌وری انرژی و مصالح در سامانه‌های طبیعی فراهم ساخت؛ مفهومی که به‌طور مستقیم در طراحی سازه‌ها نیز قابل‌کاربرد بود.

توانایی محاسبه فرم‌های بهینه، تنها به حوزه فیزیک نظری محدود نماند؛ این توانمندی به‌تدریج طرز تفکر مهندسان و معماران درباره پایداری، کارایی و طراحی را دگرگون ساخت. یکی از نخستین کاربردهای عملی این نگرش، در سال ۱۷۴۲ و در ارتباط با گنبد کلیسای جامع سن‌پیترز در رم رخ داد. با توجه به نگرانی‌های عموم درخصوص وجود ترک در سازه گنبد، جیووانی پولنی (Giovanni Poleni) مسئول بررسی و تحلیل این پدیده شد. این دانشمند با بهره‌گیری از تمثیلی میان زنجیرهای آویخته و فرم‌های منحنی، نشان داد که فرم‌های طبیعی می‌توانند به‌مثابه مدل‌هایی برای پایداری سازه‌های معماری مورد استفاده قرار گیرند (Mainstone, 2001: 321; Straub, 1975: 152). این رویداد از نخستین نمونه‌های مستند از به‌کارگیری محاسبات ریاضی در تشخیص‌های ساختاری به‌شمار می‌رود.

این منطق تازه طراحی ریشه در تلفیقی از مشاهده تجربی و تأمل نظری داشت. اگرچه در دوران رنسانس برقراری تشبیهات میان بدن و ساختمان رایج بود، اما در عصر روشنگری، این مقایسه‌ها به سطحی از دقت مکانیکی رسیدند. انجام آزمایش در مقیاس یک به یک به‌تدریج میان معماران و مهندسان پذیرفته شد؛ مصالح برای مقاومت کششی، فشار، و خمش آزموده می‌شدند. از اوایل دهه ۱۶۹۰، لاهیر (La Hire) روش‌هایی ابتدایی برای تحلیل قوس‌ها ارائه کرد (Timoshenko, 1953: 63) و این روش‌ها در قرن بعد به‌گونه‌ای تکامل یافتند که در طراحی پل‌ها، سازه‌های مشبک، و سیستم‌های ترکیبی به‌کار گرفته شدند. با وجود این نوآوری‌ها، شکافی دیرپا میان نظریه علمی و ساخت‌وساز عملی باقی ماند. استادکاران همچنان بر روش‌های هندسی سنتی و قواعد تجربی مبتنی بر نقل قول‌های سینه به سینه تکیه داشتند. بعبارتی، دانش علمی اغلب همچون داده‌ای خام تلقی می‌شد که هنوز به دستورالعمل‌های عملی بدل نشده بود (Addis, 1990: 12). تنها در قرن نوزدهم بود که مکانیک سازه به‌طور نظام‌مند وارد پروژه‌های ساخت شد و طراحی پل‌های خرپایی به‌عنوان نقطه عطفی در این فرایند محسوب گردید (Timoshenko, 1953: 186).

عصر روشنگری، علاوه بر تشویق آدمی به مطالعه ساختارمند، درک وی از طبیعت را نیز دگرگون ساخت. در قرن هجدهم، نخبگان فرهنگی طبیعت را نه همچون نظمی ایستا بر مبنای تناسبات، بلکه به‌مثابه سامانه‌ای پویا از جریان‌ها و دگرگونی‌ها درک می‌کردند. بهره‌وری دیگر

صرفاً به معنای دستیابی به فرم‌های هندسی ایده‌آل نبود، بلکه به توانایی برای تغییر، سازگاری و پویایی اطلاق می‌شد (Picon, 1996: 41). سکون با زوال یکسان تلقی می‌شد، درحالی‌که حرکت نشانه‌ای از حیات و پیشرفت به‌شمار می‌رفت. این تغییر نگرش به طبیعت، آثار گسترده‌ای بر معماری، علم و جامعه بر جای گذاشت. تأکید عصر روشنگری بر پویایی، هم‌زمان با رشد سرمایه‌داری، لیبرالیسم سیاسی و فروپاشی موانع سنتی در برابر نوآوری بود. در این بستر فرهنگی، مهندسان دیگر صرفاً تکنسین نبودند، بلکه به‌عنوان نمایندگان اصلاح اقتصادی و اخلاقی شناخته می‌شدند. توانایی آنان در مهار نیروهای طبیعی بازتابی از پویایی ملی و رفاه عمومی قلمداد می‌شد (Ibid: 42).

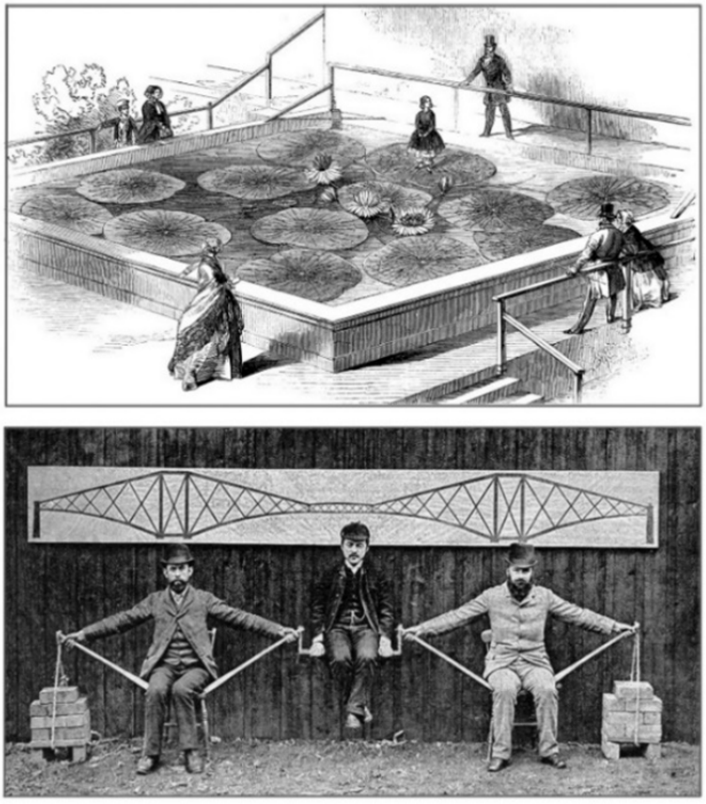
در این چارچوب فکری و مقبولیت اجتماعی حادثه برای مهندسی، مرز میان علوم طبیعی و فرم معماری به‌تدریج رنگ باخت. جهان مادی دیگر تنها به‌مثابه منبعی خام تلقی نمی‌شد، بلکه مشارکت‌کننده‌ای فعال در فرآیند طراحی بود. دانش مکانیک سازه با پذیرش اصولی که در سامانه‌های طبیعی مشاهده می‌شد—همچون بهره‌وری و سازگاری—و ترجمه آن‌ها به زبان ریاضی، کم‌کم به ابزاری مؤثر برای طراحی بدل شد. این نگرش، معماران و دانشمندان را به جست‌وجوی راه‌حل‌های فنی در دل طبیعت سوق داد؛ مسائلی که پیش‌تر حل‌ناپذیر می‌نمودند، اکنون با تکیه بر اصول طبیعی قابل بررسی بودند.

هم‌زمان، ظهور دانش تاریخ طبیعی در قرون هجدهم و نوزدهم، شناخت علمی از فرم و عملکرد را تعمیق بخشید. پیشگامانی چون کارل لینه (Carl Linnaeus) و کنت دو بوفون (Comte de Buffon) با طبقه‌بندی گونه‌های گیاهی و جانوری، پایه‌های زیست‌شناسی تکاملی را پی‌ریزی کردند. ژرژ کوویه (Georges Cuvier)، طبقه‌بندی کالبدی را معرفی کرد و داروین و لامارک (Jean-Baptiste Lamarck) بر مفهوم تطبیق‌پذیری و تحول در طبیعت تأکید داشتند (Steadman, 2008: 21–98). این تحولات، بر هم‌بستگی میان بهره‌وری ساختاری، فشارهای محیطی، و فرم زیستی تأکید می‌کرد. در اندیشه تاریخ طبیعی، فرم‌ها—چه زیستی و چه مصنوعی—در پاسخ به الزامات عملکردی پدید می‌آیند. مفهوم «هم‌بستگی اجزاء» به تعامل ساختاری عناصر اشاره دارد و مفهوم «تبعیت ویژگی‌ها» بر استانداردسازی و ثبات در طراحی تأکید می‌ورزد (Steadman, 2008: 64). این اصول به‌خوبی در معماری و مهندسی قابل‌اعمال‌اند؛ جایی‌که هم‌خوانی اجزاء و صرفه‌جویی در مصالح، دغدغه‌هایی اساسی هستند.

نظریه تکامل داروین با آن‌که برداشت‌های سنتی دینی را به چالش کشید، اما در خود طنین باور الهی را حفظ کرد. این نظریه، طبیعت را واجد منطقی مولد معرفی می‌کرد که خداوند را نه

خالق مستقیم، بلکه منبع توانمندی در انتخاب طبیعی بازتصور می‌کرد (Steadman, 2008: 74–75). طنین معنوی نظریه تکامل، امکان نفوذ آن به حوزه‌هایی فراتر از زیست‌شناسی را فراهم ساخت و عرصه‌هایی همچون الهیات، فلسفه و زیبایی‌شناسی را تحت تأثیر قرار داد. در این تعامل میان‌رشته‌ای، این ایده که طبیعت از اصولی قابل‌فهم تبعیت می‌کند، میل علمی به بازتاب آن اصول در طراحی‌های آدمی را تقویت نمود.

در پایان قرن هجدهم جدایی حرفه‌ای میان مهندسی سازه و معماری آغاز شد (Picon, 1996). با این‌حال، حتی با تشدید روند تخصص‌گرایی، قدرت استعاری و کاربردی طبیعت همچنان به‌عنوان زبانی وحدت‌بخش باقی ماند. در این دوران مفهوم تقلید از طبیعت ابزاری تفسیری و ارتباطی قدرتمندی بود که به معماران و عموم جامعه امکان می‌داد تا اصول علمی را از طریق استعاره‌های بصری و طبیعی درک کنند (Becchi, 2009). این سنت بهره‌گیری از طبیعت، نه‌تنها کاربرد دانش نوبنیان سازه را تداوم بخشید، بلکه بنیانی برای طراحی زیست‌الهام در دوران مدرن فراهم آورد. با الگوبرداری از ویژگی‌های منحصربفرد طبیعت در طراحی سامانه‌های مصنوع، مهندسان و معماران به‌سنتی ادامه دادند که هارمونی طبیعی را به فرم‌های ساخته‌شده تبدیل می‌کرد. در حالی‌که نظریه‌های علمی به‌تدریج انتزاعی‌تر و پیچیده‌تر می‌شدند، طبیعت چارچوبی ملموس، قابل درک و معنادار برای تجسم این مفاهیم فراهم ساخت (تصویر ۴).



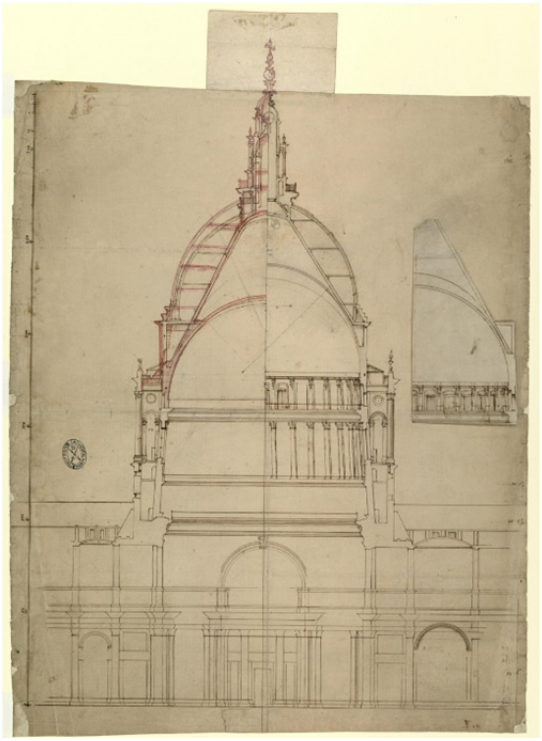
تصویر ۴. بالا : نمایش ژوزف پاکستون از استحکام نیلوفر آبی غول‌پیکر با ایستادن دخترش بر روی آن. ساختار باربر کاخ کریستال از ساختار این گیاه الهام گرفت.
پایین: در جریان یک سخنرانی در انجمن سلطنتی بریتانیا در سال ۱۸۸۷، بنجامین بیکر از یک مدل انسانی برای توضیح اصل طراحی طره‌ای که در پل فورث به‌کار رفت استفاده کرد.

۳.۲ تعامل متقابل—به‌سوی طراحی هم‌زیستانه میان انسان و طبیعت

مرحله سوم در تاریخ تحول رابطه انسان و طبیعت در تلاقی میان بینش علمی و دگرگونی فرهنگی پدیدار می‌شود—نقطه‌ای تعیین‌کننده که در آن نگاه انسان به طبیعت، از مشاهده‌ای منفعلانه به کنشی دوسویه و دیالکتیکی تبدیل شد. درحالی‌که در دوران‌های پیشین، طبیعت یا به‌مثابه نمایشی الهی درک می‌شد، یا آنکه منبعی برای بهره‌برداری تلقی می‌گردید، در این مرحله، طبیعت به شریکی در تفکر و طراحی تبدیل گردید. در این چارچوب، طبیعت نه صرفاً موضوع تقلید، بلکه مرجع فعالی برای هدایت فرم‌های معماری، ارزش‌های زیبایی‌شناختی و

حتی آرمان‌های اجتماعی شد. معماری به‌ویژه به عرصه‌ای ممتاز برای بروز این تعامل بدل شد—جایی‌که اندیشه‌های زیست‌شناسی، هندسه، فلسفه و فناوری، در زبانی مشترک از فرم و عملکرد با یکدیگر درآمیختند.

آغاز این تحول در عصر مدرن را می‌توان در طراحی گنبد کلیسای جامع سنت پل در لندن جست‌وجو کرد؛ جایی‌که یک معماری شاخص بر پایه تحلیل علمی پدیده‌های طبیعی شکل گرفت. رابرت هوک (Robert Hooke) و کریستوفر رن (Christophrt Wren) با بهره‌گیری از نظریات فیزیک‌دانان و ریاضی‌دانانی چون برادران برنولی، لایبنیتس و هویگنس (Huygens)، از مکانیک زنجیرهای آویخته—به‌ویژه زنجیره طنابی معکوس—برای طراحی گنبد باربر کلیسا استفاده کردند (Mainstone, 2001: 345). این به‌کارگیری قوانین فیزیکی در طراحی سازه، گسستی بنیادین از سنت‌های تجربی پیشین بود، که در آن گنبدهایی نیم‌دایره همچون سن‌پیتر، صرفاً بازتابی از الگوهای روم باستان چون پانتئون بودند. طراحی رن، بیانگر سنتزی نو بود: قانون طبیعت به منطق معماری تبدیل شده بود. بااین‌حال، به‌دلیل فشارهای اجتماعی و فرهنگی، این نوآوری ساختاری در لایه‌ای پنهان میان گنبدهای درونی و بیرونی مخفی ماند (تصویر ۵). با وجود پنهان‌ماندنش، منطق معماری سنت پل سرآغاز نوعی منطق‌گرایی ساختاری بود—گذار از فرم‌های موروثی به فرم‌هایی برآمده از مشاهده تجربی و دقت علمی. این رویکرد، نقش طبیعت را از یک استعاره به روشی طراحی‌محور ارتقاء داد.



تصویر ۵. مقطع کلیسای جامع سنت پل در لندن. منبع سایت رسمی کلیسا

در مسیر رسیدن بشریت به این نقطه عطف، فلسفه نقشی کلیدی در ارتقاء نگرش او ایفا کرد. سنت آلمانی طبیعت‌فلسفی که از دل روشنگری و رمانتیسم برآمده بود، نوعی از جهان‌بینی را تبیین کرد که در آن، خلاقیت انسانی و فرم طبیعی، در هم تنیده و تفکیک‌ناپذیر بودند. ایمانوئل کانت با تأکید بر جایگاه طبیعت در استدلال نظری (Carlson, 2002: 4) زمینه را برای فیلسوفانی چون هگل و شلینگ فراهم کرد. هگل، زیبایی را حاصل سنتز فرم و روح می‌دانست (Frampton, 1995: 62) و شلینگ طبیعت را نه ماده‌ای منفعل، بلکه نیرویی پویا و خودسازمان‌گر معرفی کرد. در نگاه گوته، این تمایزها بی‌معنا بود؛ خلاقیت انسان چیزی نبود جز تجلی طبیعت از خلال ذهن و دستان هنرمند. این تحول مفهومی از طریق معماران آلمانی چون کارل فریدریش شینکل (Karl Friedrich Schinkel) و گاتفرید سمپر (Gottfried Semper) وارد گفتمان معماری شد. شینکل، با تأثیرپذیری عمیق از دیدگاه جامع‌نگر الکساندر فون هومبولت، حکمت طبیعت را در طراحی شهری و مذهبی خود نهادینه کرد (De Zurko, 1957: 197). سمپر نیز با

طرح روش تطبیقی—مطالعه هم‌زمان طبیعت و تاریخ—در پی کشف حقیقت‌های ساختاری عمیق‌تر در معماری بود (Bergdoll, 2007: 46–51). او تأکید داشت که قوانین معماری با طبیعت هم‌راستاست، اما الزاماً از آن تقلید نمی‌کند؛ الهام از طبیعت یعنی ترجمه اصول، نه تکرار ظواهر.

اما این دیدگاههای آرمانی با ظهور مدرنیته صنعتی به چالش کشیده شدند. پس از انقلاب فرانسه، ایده‌های ژان ژاک روسو درباره بازگشت به طبیعت الهام‌بخش جنبش‌های سیاسی و زیبایی‌شناختی گوناگون شد. ژاکوبن‌ها در پی آن بودند تا هر حوزه‌ای—از سیاست و اقتصاد تا روابط عاطفی—را با ایده «طبیعت‌گرایی» هم‌ساز کنند (Hermand, 1997: 37). بااین‌حال، این آرمان خیلی زود در برابر منطق سرمایه‌داری و تولید مکانیکی رنگ باخت. جریان سن‌سیمونی (Saint-Simonian movement) طبیعت را نه شریکی برابر با انسانیت‌گرایی، بلکه موضوعی برای تسلط برآن به کمک علم و صنعت می‌دانست (Leiss, 1998: 82). اینگونه طبیعت تبدیل به موضوعی برای حل شدن، و نه هدیه‌ای برای همنوایی با آن تبدیل گشت. انقلاب صنعتی این گسست آدمی از طبیعت را تسریع کرد. فناوری‌هایی چون موتور بخار، قطار و کارخانه‌های مکانیزه، انسان را از چرخه‌های طبیعی چون باد، جریان آب و فصل‌ها جدا ساختند. با معرفی زمان جهانی استاندارد و نظام متریک، سنجه‌های بومی و خورشیدی جای خود را به مقیاس‌های انتزاعی دادند (Peters, 1996: 15–28). این جدایی، گسستی فرهنگی به بار آورد: پیوند ارگانیک میان انسان و محیط از هم گسست و هنر، که زمانی ریشه در ارتباط با مکان داشت، به امری فردی و جدا از زمینه اجتماعی و بوم‌شناختی بدل شد (Burckhardt, 2006: 103–105).

بااین‌حال، حتی در دل این منطق مکانیکی، صداهایی برای دفاع از نقش طبیعت در فرهنگ برخاستند. در فرانسه، معمارانی چون آنری لابروست (Henry Labrouste) و ویوله‌لو-دوک (Eugène Viollet-le-Duc) بر طبیعت به‌عنوان مرجع الهام و اقتدار طراحی تأکید ورزیدند (Leiss, 1998: 51). در بریتانیا، نظریه‌پردازان با تکیه بر تجربه‌گرایی و زیبایی‌شناسی مناظر، بر «بی‌غرضی» در مواجهه زیبایی‌شناختی با طبیعت تأکید می‌کردند. مثلا معمار اسکاتلندی جمیز فرگوسن (James Fergusson) بر سبکی از معماری تاکید داشت که با رهایی از قید تاریخ، اصول طبیعی را مبنای عمل قرار دهد (Fergusson 1891, vol. 1: 3). جان راسکین نیز با نقد آثار مخرب صنعتی‌شدن، علاقه عمومی به ارزش‌های اخلاقی و بصری صنایع دستی پیشاصنعتی را احیا می‌کرد. در آمریکا، اندیشمندانی مانند رالف والدو امرسون (Ralph Waldo Emerson) و هوراشیو گریناف (Horatio Greenough) فلسفه طراحی ارگانیکی را تبیین کردند که در آن، اندیشه‌های

مکتب تعالی‌گرایی (Transcendentalist) با یک هویت ملی در حال شکل‌گیری ترکیب می‌شد (Nadenicek, 1997: 64–65).

این جریان‌های متنوع در نهایت در مفهوم نوینی به‌نام بیوتکنیک (Biotechnics) به یکدیگر پیوند خوردند—رویکردی طراحی‌محور که در طبیعت نه‌تنها زیبایی، بلکه نقشه‌ای ساختاری می‌دید. اواخر قرن نوزدهم دوره‌ای سرنوشت‌ساز بوده است؛ زمانی‌که متون تاریخ طبیعی آغاز به ترسیم قیاس‌هایی میان اختراعات انسانی و ساختارهای ارگانیک کردند، روندی شروع شد که به تدریج منجر به مهندسی الهام‌گرفته از زیست‌شناسی شد (Steadman, 2008: 153–156). این گرایش با انتشار آثار علمی و گرافیکی برجسته‌ای چون *فرم‌های هنری طبیعت* اثر ارنست هکل (Kunstformen der Natur, Ernst Haeckel, 1899)، *وحدت هارمونیک طبیعت* اثر ساموئل کولمن (Nature's Harmonic Unity, Samuel Colman 1912)، *منحنی‌های حیات* اثر توماس کوک (The Curves of Life, Thomas Cook, 1914) و *رشد و فرم* اثر دارسی تامپسون (On Growth and Form, D'Arcy W. Thompson 1917) به اوج رسید. این منابع نشان دادند که منطق ریاضیاتی زیرساختی در مورفولوژی ارگانیک وجود دارد؛ دانشی که طراحی را از تقلید ظاهری به درک عمیق ساختار سوق می‌داد (Whyte, 1968: x).

تجلی معمارانه این بصیرت‌ها را می‌توان در جنبش‌هایی چون هنر نو (آرت نوآ) و اکسپرسیونیسم مشاهده کرد. در شهرهای اروپایی طراحانی چون ویکتور هورتا (Victor Horta)، هکتور گویمار (Hector Guimard)، چارلز رنی مکینتاش (Charles Rennie Mackintosh)، و هرمان اوبریست (Hermann Obrist) بناهایی با نقوش گیاهی، هندسه منحنی، و سازه‌هایی اسکلت‌وار خلق کردند. با آن‌که بسیاری از طراحان این عصر صرفاً فرم‌های طبیعی را بازتاب دادند، اما برخی، از جمله آنتونی گائودی، پا را فراتر گذاشتند (Huerta, 2006: 325). آثار گائودی، به‌ویژه در کلیسای کولونیا گوئل (Colònia Güell church) و ساگرادا فامیلیا، مبتنی بر مدل‌سازی‌های آویخته سه‌بعدی بود که سازه و معماری را در هم ادغام می‌کرد. روش او، که مبتنی بر آزمایش‌های فیزیکی و احترام ژرف به قوانین طبیعت بود (تصویر ۶)، نمونه‌ای بی‌سابقه از زیست‌الهام در تاریخ معماری به‌شمار می‌رود (Collins, 1963: 89). بااین‌حال، گرچه طراحی‌های گائودی رادیکال و نوآورانه بود، اما در زمان خود با پذیرش عمومی گسترده‌ای مواجه نشد. در حالی‌که سلیقه اروپایی به‌سمت انتزاع هندسی و وضوح فرمی—در قالب جنبش‌هایی چون کوبیسم، آرت دکو و مدرنیسم اولیه—حرکت می‌کرد، زیبایی‌شناسی ارگانیک گائودی مغایر با

جریان غالب تلقی می‌شد. بااین‌وجود، میراث او پایه‌ای شد برای گسترش آینده طراحی ساختارمندِ زیست‌محور و محاسباتی.

در آغاز قرن بیستم، معماران مدرنیستی مانند لوکوربوزیه و هوگو هرینگ (Hugo Häring)، طبیعت را نه به‌مثابه منبعی برای سبک، بلکه به‌عنوان مدلی برای وضوح عملکردی بازخوانی کردند. نظریه هرینگ با نام «ساختمان‌های ارگانیک» (Organische Bauen) بر این اصل استوار بود که فرم‌ها باید از نیازهای فضایی درونی و رشد تدریجی بیرون بیایند، درست همان‌گونه که ساختارهای زیستی از عملکرد و تحول ناشی می‌شوند (Steadman, 2008: 238). در همین راستا، مدرسه باوهاوس نیز علوم طبیعی را وارد آموزش طراحی کرد؛ چهره‌هایی چون موهولی–ناگی (Moholy-Nagy)، مفهوم «کارکردگرایی در طراحی» را مبتنی بر بهره‌وری ارگانیک مطرح ساختند (Otto & Songel, 2008: 28). بدین ترتیب، معماری که روزگاری از بستر محیطی گسسته شده بود، اکنون می‌کوشید تا فرآیندهای زایشی سامانه‌های زنده را شبیه‌سازی کند.

تصویر ۶. مدل کوچک مقیاس گائودی برای طراحی کلیسای ساگرادا فامیلیا،

منبع؛ نویسنده.

سال‌های میان‌دوجنگ جهانی، زمینه را برای بازنگری‌های بنیادین فراهم ساخت. در اثر معروف خود *شهرهایی در حال تحول*، پاتریک گدس دوره «پالئوتکنیک» را به‌خاطر ویران‌گری‌های زیست‌محیطی‌اش محکوم و در مقابل، خواستار ظهور عصری «نئوتکنیک» شد که بر تعادل بوم‌شناختی و باززایش اجتماعی استوار باشد (Geddes, 1915: 60, 73). دیدگاه گدس، که در جنبش طراحی باغ‌های طبیعی بازتاب یافت، بعدها در اندیشه‌های لوییس مامفورد در قالب «شهرگرایی زیست‌فناورانه» تجلی یافت (Mumford, 1937: 270). در میانه قرن بیستم، این ایده‌ها در پروژه‌هایی که مرز میان فرم‌های مصنوع و طبیعی را کمرنگ کرده بودند، به منصه ظهور رسیدند.

در دوران پس از جنگ، علاقه دانشگاهی و حرفه‌ای به مورفولوژی دوباره شکوفا گردید. مدارس معماری به آموزش «مورفولوژی عمومی» و مطالعات فضایی با تکیه بر نظریه گشتالت پرداختند (Whyte, 1968: x–xi). این چرخش، معماری را از روش‌های تقلیل‌گرایانه به‌سوی تفکر نظام‌مند و کل‌نگر سوق داد و با پیشرفت‌هایی چون کشف DNA و نظریه‌های سیستمی در علم همراه شد (Ursprung, 2007: 183).

در میان همه این تحولات، هیچ شخصیتی چون اوتو تجسم عینی این چشم‌انداز نبود. او با الهام از گائودی و شناخت ژرف از زیست‌شناسی، سازه‌های کششی و غشایی مدرن را برپا کرد که برداشت‌های مرسوم از پایداری و فرم را به چالش کشیدند. همکاری او با زیست‌شناس یوهان–گرهارد هلمکه (Johann-Gerhard Helmcke) منجر به تأسیس گروه پژوهشی زیست‌شناسی و ساختمان در برلین و سپس انستیتو سازه‌های سبک در اشتوتگارت (ILEK) شد (Otto, 2001). او با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و محاسبه قیاسی (analog computing)، که از فرایندهای خودسازمان‌گر طبیعت الهام گرفته شده بودند، دامنه واژگان معماری را به قلمرویی تازه گسترش داد. میراث اوتو به‌روشنی نشان می‌دهد که پژوهش میان‌رشته‌ای می‌تواند به نوآوری‌هایی در معماری منجر شود که نه از سبک، بلکه از اصول حیات و طبیعت سرچشمه می‌گیرند (Addis, 2014: 42; Spuybroek, 2012).

در نهایت، این مرحله بیانگر تحولی پارادایمی است: گذار از سلطه‌گری به گفت‌وگو، از طبیعت به‌عنوان پس‌زمینه، به طبیعت به‌مثابه نقشه طراحی. خلاقیت انسانی به ظرفی برای ظهور هوشمندی طبیعت تبدیل شد، و طراحی—که زمانی ابزاری برای کنترل تلقی می‌شد—به کنشی برای هماهنگی و هم‌نوا شدن با جهان مبدل گشت. پیشرفت‌های فکری، زیباشناختی و

فنی این دوره، طبیعت را در مقام هم‌کار–آفریننده تثبیت کردند و زمینه‌ساز طراحی‌های زیست‌محور و پایدار در معماری معاصر شدند.

تحول نگرش نسبت به طبیعت از یک مرجع نمادین و استعاری به یک شریک مفهومی و روشی در فرآیند طراحی، به تدریج بستر را برای به‌کارگیری گسترده مدل‌های کوچک‌مقیاس در معماری فراهم ساخت. این مدل‌ها که در ابتدا ابزاری شهودی برای تقلید از فرم‌های طبیعی به‌شمار می‌رفتند، در مرحله سوم از تعامل انسان و طبیعت به جایگاهی معرفت‌شناختی ارتقا یافتند؛ جایی که طراحی از مسیر طولانی مشاهده صرف یا تحلیل نظری، به کنشی بالنسبه سریع از تجربه‌گرایی و قیاس تبدیل شد. معمارانی همچون گائودی، اوتو، نروی و ایزلر با استفاده از مدل‌های آویزان، غشاهای حباب صابون، و پوسته‌های معکوس، نه‌تنها فرم‌هایی نو خلق کردند، بلکه از طریق آزمایش‌های فیزیکی، منطق درونی طبیعت را به زبان سازه ترجمه کردند. این دگرگونی مفهومی، که در بستر ایده‌هایی چون طبیعت‌فلسفی آلمانی و بیوتکنیک شکل گرفته (و در انطباق با نظریه پارادایم توماس کوهن می‌باشد) موجب شد مدل‌سازی فیزیکی از ابزاری موقتی در فقدان نظریه، به استراتژی‌ای پیچیده و تولیدگر تبدیل شود؛ روشی که با عبور از مرز میان نظریه و عمل، به تولید دانش معماری انجامید و نقشی کلیدی در شکل‌گیری نوآوری‌های سازه‌ای قرن بیستم ایفا کرد.

۳. نتیجه‌گیری

روایت مسلط بر تاریخ نوآوری‌های معماری، سال‌ها تحت سلطه نوعی اسطوره‌سازی قهرمانانه بوده است؛ روایتی که در آن، برخی طراحان خاص—اغلب به‌عنوان نوابغی منزوی و مستقل—عامل دگرگونی‌های بنیادین در تاریخ طراحی معرفی شده‌اند. بااین‌حال، بازخوانی انتقادی روند تاریخی که در این پژوهش دنبال شد، تصویری بسیار پیچیده‌تر، زمینه‌مندتر و مستندتر از این فرآیند ارائه می‌دهد. به‌واقع، پیشگامان فناوری‌های نوین ساختمانی، نه در خلأ فرهنگی، بلکه در دل سنتی فکری، علمی و زیباشناختی رشد یافتند که طبیعت را نه صرفاً پس‌زمینه یا منبع الهام، بلکه هم‌سخنی پویا در فرآیند آفرینش معماری تلقی می‌کرد.

از ظهور فرم‌های سازه‌ای مبتنی بر شواهد تجربی—همچون گنبد کلیسای جامع سنت پل در لندن—تا تعمق‌های فلسفی در طبیعت‌فلسفی دنیای آلمان زبان، مواجهه معماری با طبیعت همواره به‌عنوان پدیده‌ای فرهنگی و تدریجی در حال تکامل بوده است. چهره‌هایی چون هوک، رن، گوته، و هگل آغازگرانی انقلابی و منزوی نبودند، بلکه در چارچوب‌هایی فکری فعالیت

می‌کردند که پیشاپیش رابطه‌ای نظام‌مند میان قانون طبیعت، زیبایی‌شناسی و منطق سازه‌ای برقرار کرده بودند. تبیین زیبایی به‌عنوان سنتز فرم و روح، درک هنر به‌عنوان طبیعت دوم، و نگرش ارگانیستی به فرم معماری نزد متفکرانی چون شلینگ و سمپر همگی حاکی از تداوم سنتی فرهنگی است که بر هم‌آوایی میان طبیعت و ساخته انسانی تأکید داشته است.

این سنت، چنان‌که در این نوشتار نشان داده شد، صرفاً در ساحت انتزاع فلسفی باقی نماند، بلکه در محیط مصنوع، از طریق بازپیکربندی‌های پی‌درپی در معماری، متجلی شد. نوآوری‌های تکنیکی گائودی، هرچند از منظر اجرایی بی‌سابقه بودند، ولی بر بنیانی استوار بودند که ریشه در پژوهش‌های ریاضیاتی و مورفولوژیکی سده‌های پیش از وی داشت. استفاده او از مدل‌های آویخته و هندسه سهمی‌وار، نه تنها عمل نبوغ فردی، بلکه نقطه اوج مسیری تاریخی بود که در قرن هفدهم آغاز و از خلال عقلانیت سازه‌ای عصر روشنگری و رمانتیسم بلوغ یافته بود. به‌همین ترتیب، ظهور سازه‌های سبک و اشکال زیست‌الهام در آثار اوتو را نیز نمی‌توان صرفاً به ذهنیتی فردی نسبت داد، بلکه باید آن را محصول زیرساخت‌های آموزشی و علمی دانست—زیرساخت‌هایی که در نهادهایی مانند بائوآکادمی و باوهاوس شکل گرفتند و به‌طور نظام‌مند، همکاری میان معماران، مهندسان و زیست‌شناسان را تشویق کردند.

در سده‌های نوزدهم و بیستم، این تبار فرهنگی از طریق تغییراتی گسترده‌تر در نگاه به طبیعت حفظ شد؛ تغییراتی که طبیعت را به‌مثابه مدل و راهنمای روشی در طراحی تثبیت کردند. از بازکشف نسبت طلایی گرفته تا انتشار مطالعات زیست‌شناختی و مورفولوژیکی که منطق درونی فرم‌های طبیعی را آشکار ساختند، معماری به‌تدریج معرفت‌شناسی‌ای را بر پایه مشاهده، تحلیل و هم‌سازی با اصول ارگانیک پذیرفت. ظهور دانش مورفولوژی عمومی، نظریه گشتالت، و گسترش گفتمان بیوتکنیک، همگی بستری فکری را فراهم کردند که برای نوآوری‌های فرمی بسیار بارور بود—اما نوآوری‌هایی که ماهیتی تجمعی و هم‌افزا داشتند.

بدین‌ترتیب، معمارانی که اغلب به‌خاطر اصالت و نبوغ فردی‌شان ستایش می‌شوند، درواقع وارثان حافظه‌ای فرهنگی‌اند؛ حافظه‌ای که در طی قرون، از خلال گفت‌وگوی عقل انسانی با نظم طبیعت شکل گرفته است. دستاوردهای آنان—هرچند منحصربه‌فرد—جهشی ناگهانی نبود، بلکه بازپیوست‌هایی به سنتی دیرپا بودند. تکامل فناوری‌های ساختمان، آنگاه‌که در بستری تاریخی و فلسفی جای می‌گیرد، نه مجموعه‌ای از جهش‌های قهرمانانه، بلکه نموداری از وراثت فرهنگی مشترک انسانی در طراحی و ساخت قلمداد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

۱. اضطرارهای زیست‌محیطی عصر حاضر شامل مجموعه‌ای از چالش‌های جهانی نظیر تغییرات اقلیمی، بحران منابع انرژی و آب، و افزایش ردپای کربن در صنعت ساخت‌وساز است. این بحران‌ها، طراحی معماری را ناگزیر از بازاندیشی در انتخاب مصالح، به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف و هم‌زیستی با طبیعت کرده‌اند. در چنین بستری، معماری نمی‌تواند صرفاً به فرم و عملکرد بیندیشد، بلکه باید پاسخی فعال به شرایط بحرانی محیط‌زیست ارائه دهد.

۲. این مدل‌ها از موادی همچون حباب صابون، نخ‌های نایلونی یا زنجیرهای فلزی بسیار نازک، مقوا و چوب ساخته می‌شدند تا تاثیر کوچکترین تنش‌ها بر کالبد مدل بوضوح آشکار گردد.

کتاب‌نامه

قرآن کریم

فرشاد، مهدی (۱۳۷۵). *تاریخ مهندسی در ایران*. تهران؛ انتشارات بلخ.

نصر، حسین (۱۳۷۸). *نظر متفکران اسلامی در خصوص طبیعت*، تهران؛خوارزمی.

Addis, Bill (1990). Structural Engineering: The Nature of Theory and Design, New York: Ellis Horwood.

Addis, Bill (2007). Building: 3000 Years of Design, Engineering and Construction, London: Phaidon Press.

Addis, Bill (2013). "Toys That Save Millions: A History of Using Physical Models in the Design of Building Structures", The Structural Engineer, 26(2), pp. 13–27.

Addis, Bill (2014). "Physical Modelling and Form Finding", in Shell Structures for Architecture, eds. Sigrid Adriaenssens, Philippe Block, Diederik Veenendaal, and Chris Williams, pp. 33–43, London: Routledge.

Allen, Donald (1997). "Calculus", Texas A&M University, accessed 9 August 2015, http://www.math.tamu.edu/~dallen/history/calc1/calc1.html

Anderson, Stanford (2004). Eladio Dieste: Innovation in Structural Art, New York: Princeton Architectural Press.

Becchi, Antonio, and Edoardo Benvenuto (2002). Towards a History of Construction: Dedicated to Edoardo Benvenuto, Basel: Birkhäuser.

Burckhardt, Jacob (1961). The Civilization of the Renaissance in Italy, Vienna: Phaidon Press.

Carlson, Allen (2002). Aesthetics and the Environment: The Appreciation of Nature, Art and Architecture, London: Routledge.

Collins, Peter (1965). Changing Ideals in Modern Architecture, London: Faber & Faber.

Dossey, John A. (1992). "The Nature of Mathematics: Its Role and its Influence", in Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning, ed. Douglas Grouws, pp. 39–48, New York: McMillan.

Cowan, Henry J. (1978). Science and Building: Structural and Environmental Design in the Nineteenth and Twentieth Centuries, New York: JohnWiley & Sons.

Cowan, Henry J. (1958). "The Design of Architectural Structures with the Aid of Models", Architectural Science Review, 1(1), 21-30.

Engel, Heino (1997). Structure Systems, Ruit: Verlag Gerd Hatje.

Eves, Howard Whitley (1983). Great Moments in Mathematics (before 1650), Washington, D.C.: Mathematical Association of America.

Fergusson, James (2 vol.) (1891) History of the Modern Styles of Architecture, London: Murray.

Frampton, Kenneth (1995). Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture, Cambridge: MIT Press.

Fuller, Buckminster (1963). Ideas and Integrities: A Spontaneous Autobiographical Disclosure, Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Fuller, Buckminster (1965). "Conceptuality of Fundamental Structures", in Structure in Art and in Science, ed. Gyorgy Kepes, pp. 66–88, New York: George Braziller, Inc.

Fuller, Buckminster (1969). Operating Manual for Spaceship Earth. New York: Simon and Schuster.

Fuller, Buckminster (1969). Utopia or Oblivion. The Prospects for Humanity. NY: Overlook.

Fuller, Buckminster (1978). "Spaceship Earth", YouTube, accessed 20 January 2017, https://www.youtube.com/watch?v=dsOvE-ReX2g

Gabbey, Allan (2003). “Mechanics”, in The Oxford Companion to the History of Modern Science, ed. John L. Heilbron, New York: Oxford University Press.

Gelernter, Mark (1995). Sources of Architectural Form, Manchester: Manchester University Press.

Gelfand, Izrail M., Sergej V. Fomin, and Richard A. Silverman (2000). Calculus of Variations, Mineola: Dover.

Hejazi, Mehrdad (2005). "Geometry in Nature and Persian Architecture", Building and Environment, 40, pp. 1413–1427.

Hildebrandt, Stefan, and Anthony Tromba (1996). The Parsimonious Universe: Shape and Form in the Natural World, New York: Copernicus.

Huerta, Santiago (2006). "Structural Design in the Work of Gaudí", Architectural Science Review, 49, pp. 324–339.

Huizinga, Johan (1955). Homo Ludens: A Study of the Play-element in Culture, Boston: Beacon Press.

Hughes, Quentin, and Norbert Lynton (1962). Renaissance Architecture, London: Longmans.

Huxtable, Ada Louise (1960). Pier Luigi Nervi, New York: George Braziller.

Kuhn, Thomas (1996). The Structure of Scientific Revolutions, Chicago: University of Chicago Press.

Leiss, William (1998). The Domination of Nature, Montreal: McGill-Queen’s University Press.

Mainstone, Rowland J. (2001). Developments in Structural Form, Oxford: Butterworth-Heinemann.

Motamedmanesh, Mahdi (2019). The Influence of Architectural Form on the Development of Structural Systems, PhD dissertation, TU Berlin.

Mark, Robert (1996). Light, Wind, and Structure. MIT Press.

Mumford, Lewis (1937). "The Death of the Monument", in Circle: International Survey of Constructive Art, eds. Ben Nicholson, Naum Gabo, and Leslie Martin, pp. 263–270, London: Faber and Faber.

Nadenicek, Daniel Joseph (1997). "Emerson's Aesthetic and Natural Design: A Theoretical Foundation for the Work of Horace William Shaler Cleveland", in Nature and Ideology, ed. Joachim Wolschke-Bulmahn, pp. 59–80, Washington, D.C.: Dumbarton Oaks Research Library and Collection.

Nervi, Pier Luigi (1965). Aesthetics and Technology in Building, trans. Robert Einaudi, Cambridge: Harvard University Press.

Nervi, Pier Luigi (1965a). "Is Architecture Moving Towards Unchangeable Forms", in Structure in Art and in Science, ed. Gyorgy Kepes, pp. 96–104, New York: George Braziller.

Otto, Frei, and Juan María Songel (2010). A Conversation with Frei Otto, New York: Princeton Architectural Press.

Otto, Frei; and Bodo Rasch (2001) Finding Form, Deutscher Werkbund Bayern.

Peters, Tom F. (1996). Building the Nineteenth Century, Cambridge: MIT Press.

Picon, Antoine (1996). "Towards a History of Technological Thought", in Technological Change: Methods and Themes in the History of Technology, ed. Robert Fox, pp. 37–49, London: Harwood Academic Publishers.

Saint, Andrew (2007) Architect and Engineer: A Study in Sibling Rivalry, New Haven: Yale University Press.

Steadman, Philip (2008). The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts, London: Routledge.

Straub, Hans (1975). Die Geschichte der Bauingenieurkunst, Basel: Springer. The Book of Genesis, available online at: https://bible.usccb.org/bible/genesis/0

Timoshenko, Stephen (1953). History of Strength of Materials, with a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures, New York: McGraw-Hill.

Torroja, Eduardo (1958). Philosophy of Structures, Berkeley: University of California Press.

Torroja, Eduardo (2010-first edition 1957). Razón y ser de los tipos estructurales, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Cientificas

Ursprung, Philip (2007). "Double Helix and Blue Planet: The Visualization of Nature in the Twentieth Century", in Nature Design, ed. Barry Bergdoll et al., pp. 180–189, Switzerland: Lars Müller Publishers.

Viollet-le-Duc, Eugène-Emmanuel (1863-72) Entretiens Sur L'architecture, Paris: Morel.

Vitruvius, Marcus (1914). The Ten Books on Architecture, trans. Morris H. Morgan, Cambridge: Harvard University Press.

Whyte, Lancelot Law (1968). Aspects of Form: A Symposium on Form in Nature and Art, New York: American Elsevier Publishing Co.

Woods, Michael, and B. Mary (2000). Ancient Computing: From Counting to Calendars, Minneapolis: Runestone Press.