

نشریه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۵(۳۹)، ۹۹-۱۲۱

DOI: 10.30480/AUP.2022.3854.1835

نوع مقاله: پژوهشی

## پارامترهای بهینگی فرم و ساختار پوسته‌های سین کلاستیک متقارن دورانی (RSS) در طبیعت و معماری

### بررسی موردی: پوسته تخم پرندگان\*

احسان غلامزاده

دکتری معماری، گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

محمد رضا متینی

استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: m.matini@art.ac.ir

سید یحیی اسلامی

استادیار گروه معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

استادیار مدعو گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

غلامرضا طلپسچی

استادیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

استادیار مدعو گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

### چکیده

فرم‌ها و ساختارهای طبیعی همواره یکی از مهم‌ترین منابع الهام انسان به منظور خلق فضا بوده است. پژوهش حاضر بر روی یکی از منابع الهام مهم از طبیعت که پوسته‌های سین کلاستیک متقارن دورانی (RSS) است، متمرکز شده و به بهینگی فرمی و ساختاری این پوسته‌ها و الگوپذیری در معماری پرداخته است. روش تحقیق این پژوهش توصیفی-تحلیلی و شبیه‌سازی است و از منابع اولیه این حوزه و نمونه موردی تخم پرندگان استفاده نموده تا از طریق بررسی پارامترهای فرم و ساختار نمونه تخم‌مرغی از پوسته‌های طبیعی RSS، به چگونگی استفاده از ظرفیت‌های شاخص آنها در معماری بپردازد. در این راستا، مقاله ابتدا به گونه‌شناسی پوسته‌های RSS و بررسی اصول فرمی آنها در طبیعت می‌پردازد. سپس، گونه‌شناسی این پوسته‌ها که در قالب پوشش‌های فضا در معماری گذشته و معاصر بوده، مورد بررسی قرار گرفته است. از اهداف دیگر این پژوهش، بررسی پارامترهای بهینگی فرمی و ساختاری در طبیعت و معماری بوده است. نتایج نشان می‌دهد، پارامترهای بهینگی فرمی و ساختاری پوسته‌های RSS در طبیعت می‌توانند الگوهای مهمی برای معماران باشد، نظیر کاهش مصرف مصالح، افزایش دهانه‌ها، کاهش مقاومت هوا در طراحی پوسته و اجرای پوسته‌های RSS متمرکز بر زمینه و بستر.

**کلیدواژه‌ها:** پوسته‌های RSS، فرم و ساختار، بهینگی، طبیعت، معماری

\* این مقاله برگرفته از رساله دکتری احسان غلامزاده با عنوان «نقش فناوری در بهینه‌سازی فرم و سازه در معماری زیست‌الگو (بررسی پوسته‌های سین کلاستیک)» است که با راهنمایی دکتر محمد رضا متینی و دکتر سید یحیی اسلامی و مشاوره دکتر غلامرضا طلپسچی در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد انجام شده است.

## مقدمه

از آنجایی که در طبیعت فرم و ساختار به هم وابسته هستند و اصولاً نمی‌توان آنها را جدای از هم تصور کرد، در معماری نیز بسیاری از سازه‌های ابتدایی از فرم‌های طبیعی الهام گرفته بودند و انسان از همان ابتدای خلقت بشر استفاده از فرم‌های سازه‌ای موجود در طبیعت را آموخت. ماریو جورج سالوادوری<sup>۱</sup> در کتاب معروف خود به نام «سازه در معماری» به مسئله درک بنیادین مفاهیم سازه‌ها توسط معماران به جهت ارتباط بهتر میان آنان و مهندسان سازه اشاره می‌کند. وی فراگیری و درک اصول فرم‌های سازه‌ای را برای معماران الزامی می‌داند زیرا بدون آن معمار از میدان معماری معاصر بیرون رانده خواهد شد (سالوادوری، ۱۳۷۴، ۵). مطالعه بر روی پوسته‌های طبیعی، به‌منظور درک اصول فرم‌های سازه‌ای، جزو یکی از حوزه‌های مختلفی است که از دیرباز مورد توجه معماران قرار گرفته است و امروزه به‌منظور رسیدن به بهینگی حداکثری فرمی و ساختاری پوسته‌ها در معماری، ضرورت انجام چنین پژوهش‌هایی بسیار حائز اهمیت است.

امروزه گرایش به فرم‌های آزاد در معماری معاصر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و همین امر باعث شده که به ساختارهای سین کلاستیک توجه کمتری شود، از طرفی با توجه به پتانسیل‌های بالای این پوسته‌ها و نیز توجه به تاریخ معماری و پیشینه معماری ایران و سایر کشورهای پیشرو در زمینه سازه‌های طاقی و گنبدی که بیشتر آنها به‌صورت پوسته‌های «سین کلاستیک متقارن دورانی»<sup>۲</sup> هستند و به اختصار پوسته‌های RSS نامیده شده است، ضرورت توسعه پوسته‌های RSS با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در معماری بیش از پیش احساس می‌شود. دومین ضرورت انجام این پژوهش مسئله الگوبرداری از پوسته‌های RSS در طبیعت است، زیرا طبیعت در طی سالیان سال به الگوهایی بسیار متنوع رسیده است و خداوند قادر و متعال الگوهایی را تولید کرده است که خیلی پیشرفته‌تر و متنوع‌تر از آن چیزی است که انسان دارد؛ از آنجاکه طبیعت همه‌چیز را بهینه می‌کند، در دنیای امروز در معماری زیست‌الگو این ضرورت کاملاً احساس می‌شود، از این‌رو نقش فناوری در ایجاد فرم‌ها و سازه‌های بهینه در راستای دستیابی به کیفیت بالا در طراحی و اجرا، دغدغه دیگر این پژوهش است. پوسته تخم پرندگان نیز به دلیل تنوع و فراوانی آن در طبیعت، به‌عنوان نمونه موردی در نظر گرفته شده است. اهداف این پژوهش، شامل موارد زیر می‌شود:

۱. ضرورت ارتباط بیشتر با طبیعت از طریق مطالعه پوسته‌های RSS طبیعی نظیر پوسته تخم پرندگان در جهت دستیابی به فرم و ساختار پوسته‌های RSS بهینه‌تر در معماری.
۲. شناخت دقیق بهینگی پوسته تخم پرندگان و الگوهای قابل استفاده در معماری.
۳. الگوبرداری صحیح از بهینگی فرمی و ساختاری پوسته تخم پرندگان و ساخت پوسته‌های RSS بهینه‌تر در معماری.

روش تحقیق این پژوهش توصیفی-تحلیلی و نیز شبیه‌سازی پارامتریک عددی توسط نرم‌افزار متلب است و از منابع اولیه این حوزه و نمونه موردی تخم پرندگان استفاده نموده تا از طریق بررسی فرم و ساختار پوسته‌های RSS طبیعی، به چگونگی استفاده از ظرفیت‌های شاخص آنها در معماری بپردازد. در این راستا، ابتدا به معرفی پوسته‌های RSS و بررسی هندسه این پوسته‌ها پرداخته شده است، سپس معرفی این پوسته‌ها در طبیعت و معماری صورت گرفته است، در ادامه، به پارامترهای بهینه بودن پوسته‌های RSS پرداخته و پارامترهای بهینه بودن پوسته‌های RSS در طبیعت با تمرکز بر پوسته تخم پرندگان مورد بررسی قرار گرفته است؛ درنهایت به بحث و تحلیل پارامترهای بهینگی پرداخته می‌شود که شامل بررسی بهینگی فرم و ساختار پوسته‌های RSS در طبیعت و نیز تحلیل‌های محاسباتی پوسته شبیه‌سازی شده تخم مرغ در جهت به‌کارگیری الگوهای قابل استفاده بهینه در معماری می‌باشد.

## پیشینه پژوهش

این پژوهش در امتداد کار معمارانی است که به مسئله الگوبرداری از پوسته‌ها در طبیعت پرداخته‌اند. در پیشینه این پژوهش، می‌توان به جنبه‌های الهام از طبیعت در معماری و نیز اهمیت پوسته‌ها در طبیعت و معماری اشاره نمود. تقی زاده (۱۳۸۵) به آموزه‌هایی از سازه‌های طبیعی به‌عنوان درس‌هایی برای معماران اشاره می‌کند و پتانسیل‌های پوسته تخم‌پرندگان و پوسته صدف دریایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. فیض‌آبادی و همکاران (۲۰۱۳) به روش‌های بهره‌گیری از ساختارهای موجودات طبیعی در معماری تکنولوژیکی پرداخته‌اند و الهام از ساختارهای طبیعی پوسته‌ای در آثار معماری مورد بررسی و نقد قرار گرفته است. مدی و ایمانی (۱۳۹۷) به فناوری بایومیمتیک و الهام از طبیعت پرداخته‌اند؛ عملکردگرایی از مشخصات بارز بایومیمتیک در این پژوهش معرفی شده است و الهام فرمی و عملکردی از پوسته‌های طبیعی در آثار کالاتراوا مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر، تقی زاده و همکاران (۱۳۹۸) به ساختار پوسته‌های ساختمانی در مواجهه با مکانیزم حرکتی اشاره داشته‌اند. شاهرودی و همکاران (۱۳۸۶) نیز به لزوم بهره‌گیری از طبیعت برای آموزش در رشته معماری به‌منظور ارتباط قوی‌تر سازه و معماری تأکید داشته‌اند. حال آنچه مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان در دوران معاصر با الهام از طبیعت به توسعه پوسته‌های RSS با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در معماری پرداخت.

## معرفی پوسته‌های RSS

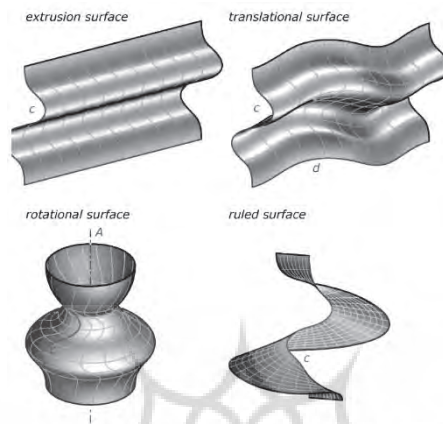
پوسته، سازه‌ای نازک با سطوحی اغلب منحنی است که بارها را فقط به‌وسیله کشش، فشار و برش به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌نماید. پوسته‌ها در سازه‌ها و پوشش‌های بیرونی ساختمان‌ها، در جایی که بار وارده گسترده یکنواخت است، بسیار کارآمد هستند. از طرفی به علت اینکه پوسته‌ها اغلب بسیار نازک هستند، مقاومت خمشی ناچیزی دارند و برای تحمل بارهای متمرکز مناسب نیستند (Moore, 1998, 197). مقاومت پوسته‌ها نیز ناشی از فرم آنهاست و نه جرمشان. پوسته‌ها در به‌کارگیری مصالح بسیار بهینه هستند، زیرا آنها در برابر بارها، بیشتر از اینکه با رفتار خمشی مقاومت کنند به‌وسیله شکل‌شان مقاومت می‌کنند (گلابچی و امیری، ۱۳۹۵، ۴۴۱). پوسته‌ها را می‌توان بر مبنای هندسه و شکلشان تقسیم‌بندی کرد. پوسته‌ها در حالت کلی به دو نوع دارای انحناء و دارای تا شدگی تقسیم می‌شوند. در بررسی گونه‌شناسی پوسته‌ها بر اساس انحناء در جهات مختلف با توجه به مقادیر تعیین‌شده حالات متفاوت زیر قابل تصور است:

الف- پوسته‌های قابل توسعه<sup>۳</sup>، ب- پوسته‌های سین کلاستیک<sup>۴</sup>، ج- پوسته‌های آنتی کلاسیک<sup>۵</sup>، د- پوسته‌های فرم آزاد<sup>۶</sup> (Mansoori et al., 2019, 706). پوسته‌های سین کلاستیک و یا به عبارتی پوسته‌های همگون انحنایی در طبقه‌بندی انواع پوسته‌ها جزو زیرمجموعه سطوح منحنی منظم غیرقابل توسعه قرار دارند، به طوری که دارای دو انحناء بوده و جهت‌های انحنایی آنها یکسان است (Farshad, 1992, 8). پوسته‌های سین کلاستیک خود دارای تنوع بی‌شماری هستند، با در نظر گرفتن حالت خاصی از آنها که به‌صورت متقارن دورانی‌اند، پوسته‌های RSS پدید می‌آیند که از دیرباز تاکنون مورد توجه ویژه معماران بوده است.

## بررسی هندسی پوسته‌های RSS

با توجه به اینکه در این پژوهش محور اصلی پوسته‌های RSS است، برای شناخت هندسی دقیق‌تر این موضوع بایستی ابتدا به طبقه‌بندی سطوح معمول پرداخته شود. طبقه‌بندی سطوح معمول عمدتاً بر اساس یک

«حرکت» ساده پدید می‌آیند. دسته اول، سطوحی که از حرکت یک خط منحنی در راستای یک خط صاف شکل می‌گیرند، که به آنها «سطوح امتدادی»<sup>۷</sup> می‌گویند، دسته دوم، سطوحی که از حرکت یک خط منحنی در راستای یک خط منحنی دیگر شکل می‌گیرند، که به آنها «سطوح انتقالی»<sup>۸</sup> می‌گویند، دسته سوم، سطوحی که از دوران یک خط منحنی حول یک محور شکل می‌گیرند، که به آنها «سطوح دورانی»<sup>۹</sup> می‌گویند، دسته چهارم، سطوحی که از حرکت دادن یک خط صاف شکل می‌گیرند، که به آنها «سطوح خط‌دار»<sup>۱۰</sup> می‌گویند (شکل ۱) (Pottmann et al., 2007, 287).

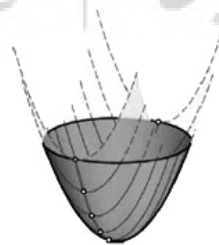


شکل ۱. طبقه‌بندی سطوح معمول:

«سطوح امتدادی» - بالا چپ، «سطوح انتقالی» - بالا راست، «سطوح دورانی» - پایین چپ، «سطوح خط‌دار» - پایین راست

منبع: Pottmann et al., 2007, 287

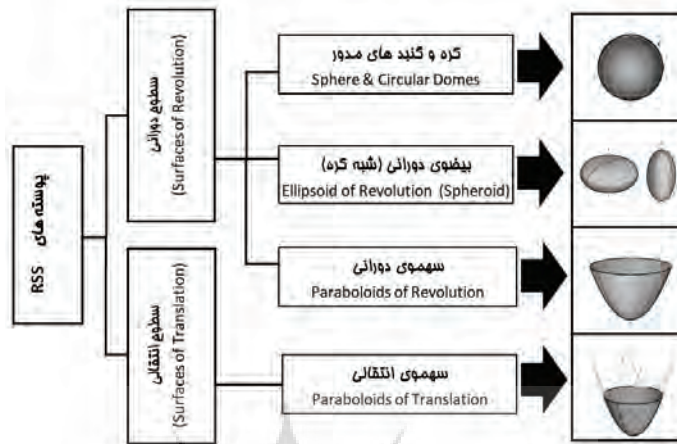
پژوهش جاری نشان می‌دهد در پوسته‌های سین کلاستیک حاصل از سطوح انتقالی تنها در یک حالت خاص می‌توان به پوسته‌های RSS دست یافت. به طوری که اگر منحنی‌های مولد یک سطح انتقالی (نیم‌رخ و رویه) دو سهمی مشابه باشند، سطح حاصل سهمی‌گون دورانی خواهد بود. دلیل دورانی بودن این سهمی‌گون این است که منحنی‌های نصف‌النهاری رویه دایره هستند و بنابراین این رویه یک سطح دورانی نیز هست. به شکل متعارف می‌توان گفت که تولید سهمی‌گون دورانی از طریق انتقال سهمی  $k(u)$  با معادله پارامتری  $k(u) = (u, 0, a \cdot u^2)$  (که روی صفحه  $xy$  قرار دارد) در راستای منحنی  $l(v) = (0, v, a \cdot v^2)$  (که روی صفحه  $yz$  قرار دارد) ممکن است (Pottmann et al., 2007, 308) (شکل ۲).



شکل ۲. تولید سهمی‌گون دورانی به عنوان سطح انتقالی

منبع: Pottmann et al., 2007, 308

به‌منظور شناخت هندسی دقیق‌تر پوسته‌های RSS، بایستی علاوه بر حالت خاص سطح انتقالی که به تولید سهموی دورانی منجر می‌شود، کلیه پوسته‌هایی که حاصل از سطوح دورانی هستند نیز اضافه شود، زیرا خاصیت تقارن و دوران را، در پوسته‌های سین کلاستیک حاصل از سطوح دورانی می‌توان مشاهده کرد. در نهایت در یک دسته‌بندی، گونه‌شناسی هندسی پوسته‌های RSS معرفی می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. گونه‌شناسی هندسی پوسته‌های RSS

### پوسته‌های RSS در طبیعت

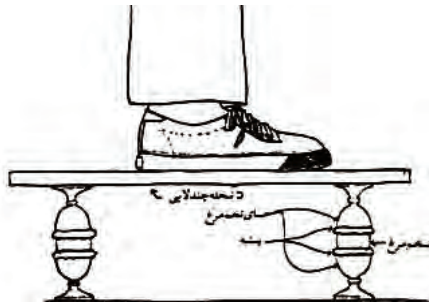
پوسته‌ها در طبیعت از متنوع‌ترین فرم‌هایی هستند که در دنیای فیزیکی اطراف ما یافت می‌شوند؛ نظیر تخم پرندگان، صدف‌های دریایی، پوسته نرم‌تنان، لاک‌پشت‌ها، جمجمه انسان، دانه گیاهان و لانه‌هایی که پرندگان خاص به‌طور کاملاً غریزی می‌سازند (Melaragno, 1991, 120). از آنجایی که اکثر پوسته‌ها در طبیعت دارای انحناء هستند می‌توان به اهمیت جمله معروف آنتونی گائودی<sup>۱۱</sup> بیشتر پی برد: «در طبیعت هیچ خط مستقیمی وجود ندارد» (Lampugnani, 1997, 119).

در بررسی اصول فرمی پوسته‌ها در طبیعت، می‌توان به بی‌نهایت فرم رسید که هر کدام زیرمجموعه مجموعه‌های ترکیبی دیگری هستند که از عناصر اصلی آنها منتج می‌شوند. با توجه به اینکه تمرکز بر روی پوسته‌های RSS در طبیعت صورت گرفته است بنابراین رویکرد ساخته‌شدن آنها می‌تواند متأثر از شرایط محیطی، زمانی و نیز رشد و یا تلفیقی از آنها باشد؛ پژوهش جاری نشان می‌دهد که ساختار شکلی پوسته‌های RSS در ۵ دسته قابل بررسی است که عبارت‌اند از: ۱- ساختار شکلی نامشخص و ناپایدار کروی ۲- ساختار هندسی کروی ۳- ساختار هندسی بیضوی دورانی (شبه کروی) ۴- ساختار هندسی سهموی دورانی ۵- ساختار تلفیقی و پایدار شبه کروی (جدول ۱).

جدول ۱. اصول فرمی پوسته‌های RSS در طبیعت

تصویر نمونه	نمونه های شناخته شده	ساختار		رویکرد ساخته شدن	فرم
		سازه ای	شکلی		
	جباب و کف بر روی آب	کششی	نا مشخص و ناپایدار کره‌ای	مآثر از شرایط محیطی، زمانی، رشد و یا تلفیقی از آنها	پوسته های RSS در طبیعت
	-----	فشاری	Uncertain & Unstable Spherical		
	سطوح رویه اقمار و سیاره ها، پوست برخی از میوه‌ها نظیر پرتقال، سطوح بیرونی برخی جانوران نظیر عروس دریایی	کششی	هندسی کره‌ای		
	هسته مرکزی اقمار و سیاره ها، مروارید درون صدف ها	فشاری	Spherical Geometry		
	تخم برخی از جانوران نظیر لاک پشت دریایی و آبیژان، سطوح بیرونی برخی از میوه ها نظیر هندوانه،	کششی	هندسی بیضوی دورانی (شبه کره)		
	هسته برخی از میوه ها نظیر خرما، پوست گردو، تخم برخی از پرندگان	فشاری	Ellipsoid of Revolution Geometry (Spheroid)		
	لانه برخی از پرندگان، پوست برخی از میوه ها نظیر بلوط	کششی	هندسی سهموی دورانی		
	تخم برخی از پرندگان و جانوران، پوست میوه برخی از درختان نظیر فندق	فشاری	Paraboloids of Revolution Geometry		
	لانه برخی از پرندگان و جانوران نظیر آشیانه بافنده سر سیاه	کششی	تلفیقی و پایدار شبه کره‌ای		
	اکوسیستم های طبیعی و نیز لانه برخی پرندگان و جانوران نظیر آشیانه مرغ تنورساز	فشاری	Integrated and Stable Spheroid		

به‌عنوان مثال تخم‌مرغ یک نمونه بسیار عالی از پوسته‌های RSS در طبیعت است. فرم قوسی شکل پوسته تخم‌مرغ سبب می‌شود که بتواند نیروی وزن مرغی را که بر روی آن می‌خوابد به‌خوبی تحمل کند. رویکرد ساخته‌شدن آن مبتنی بر هندسه سهموی دورانی است؛ ساختار شکلی تخم‌مرغ، متقارن دورانی بوده و ساختار سازه‌ای آن، با توجه به جنس پوسته آهکی، به‌گونه‌ای است که فشاری عمل می‌کند، بنابراین فرم سهمی تخم‌مرغ، بهترین فرم برای توزیع یکنواخت فشار است، ولی تخم برخی از لاک‌پشت‌های دریایی و ماهی‌ها که پوسته آنها خاصیت کششی دارد، تغییر شکل پیدا کرده و عملکردی کششی دارند (شکل ۴).



شکل ۴. فرم سهمی تخم‌مرغ بهینه‌ترین فرم برای تحمل فشار که نوعی پوسته RSS است.

منبع: فرشاد، ۱۳۵۳، ۱۷۰

## پوسته‌های RSS در معماری

معماری، فرایندی است آمیخته با علم، هنر، ذوق، سلیقه، اعتقاد، ایمان و مهارت‌های خاص که در راستای فرهنگ و تمدن که در گذر تاریخ شکل گرفته و زبان گویای زمانه خویش است (معماریان، ۱۳۹۱، ۲۲). پوسته‌های سین کلاستیک در معماری، بیشتر در قالب پوشش‌های منحنی خودنمایی می‌کنند. نوع مصالح مصرفی، اندازه دهانه، خیز پوشش، هندسه و روش اجرا در شکل‌گیری فرم نهایی پوشش‌های منحنی در معماری تأثیرگذارند. پوشش‌های منحنی که شامل تاق<sup>۱۲</sup> و گنبد<sup>۱۳</sup> هستند، یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده در جهان است. استفاده از سیستم تاق و گنبد به‌طور گسترده در مناطقی از آسیای مرکزی و آسیای غربی، جنوب اروپا و آفریقا به اتکای ساخت‌مایه‌های بومی هر منطقه مشاهده می‌شود، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک که طی روز گرمایی با درجه حرارت بالا وجود دارد. سیستم‌های پوشش منحنی شکل به‌راحتی گرمای محیط را جذب کرده و هوای فضای داخلی را بهتر از فضای مکعبی شکل کنترل می‌کنند که یکی از دلایل این امر وجود سطوح کمتری از سطح جاذب گرما نسبت به پوشش‌های مسطح است. در اقلیم‌های سرد نیز به دلیل کاهش سطح در برخی از حجم‌های ساختمانی، اتلاف گرمایی کمتری مشاهده می‌شود (Minke, 2006, 117).

گنبد، سابقه طولانی در معماری جهان دارد اما تمام گنبد‌های پیشین بر پایه مدور قرار می‌گرفتند و این معماران ساسانی بودند که نخستین بار مسئله گنبد بر سطوح چهارگوش را حل کردند. از این‌رو می‌توان گفت ایران سرزمین گنبد‌های واقعی است (Creswell, 1914, 681-684). بنا به گفته محمد کریم پیرنیا، «گنبد ارمغان معماری ایران به جهان معماری» است، ایرانی‌ها در دوران قبل از اسلام توانستند که تاق و گنبد را که پدیده‌ای طبیعی و خاص معماری ایران است، جایگزین بام تخت و خریشته چوبین کنند (پیرنیا، ۱۳۵۲، ۲). تاق‌ها نیز یک نوع از پوشش منحنی هستند. انواع مختلف تاق‌ها از حرکت یا دوران قوس‌ها در فضا ایجاد می‌شوند و از ترکیب تاق‌های ساده انواع پیچیده‌تر تاق به وجود می‌آیند (پارسا و فخار تهرانی، ۱۳۹۲). در بررسی نمونه‌های مختلف تاق‌ها از میان تمام فرم‌ها، «تاق ترکیب»، «تاق چهاربخش (تاژ)»، «تاق کلنبو»، «تاق چشمه»، «تاق کژاوه (کجاوه)» و «تاق کاربندی» در معماری گذشته جزو تاق‌های دارای همگون انحنایی و یا به عبارتی سین کلاستیک به شمار می‌آیند. در بررسی نمونه‌های مختلف گنبد نیز، تنها «گنبد ناری» جزو پوشش‌های سین کلاستیک محسوب می‌شود. حال آنچه در حوزه پوسته‌های RSS مطرح می‌شود این است که کدام یک از پوشش‌های تاقی و گنبدی در معماری در این حوزه قرار خواهند گرفت؟ برای پاسخ به این پرسش با بهره‌گیری از نمونه‌های مختلف پوشش‌های تاقی و گنبدی سین کلاستیک در معماری، وضعیت تقارن آنها در سه وضعیت «دورانی»، «انعکاسی» و «انتقالی» مورد بررسی قرار داده‌ایم (جدول ۲). این پژوهش نشان می‌دهد که تمامی

تاق‌های سین کلاستیک، حداقل در یک جهت دارای تقارن انعکاسی‌اند. «تاق کجاوه» تنها تاقی است که علاوه بر تقارن انعکاسی دارای تقارن انتقالی نیز هست، اما از میان تمامی تاق‌های سین کلاستیک بررسی شده، بیشتر نمونه‌های «تاق چهاربخش»، «تاق کلنبو»، «تاق چشمه» و «تاق کاربندی» دارای خاصیت تقارن دورانی نیز هستند که در معماری سرزمین‌های اسلامی به‌ویژه ایران بسیار دیده شده‌اند. از طرفی پژوهش جاری نشان می‌دهد که از میان تمامی فرم‌های مختلف گنبد، تنها گنبد سین کلاستیک که همان «گنبد ناری» است با توجه به ویژگی شبه گروهی بودن، در دسته پوسته‌های RSS در معماری قرار گرفته است.

جدول ۲. گونه‌شناسی پوشش‌های تاقی و گنبدی سین کلاستیک در معماری گذشته با توجه به مفهوم تقارن



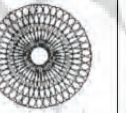
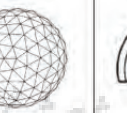



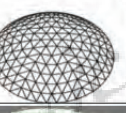
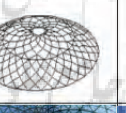

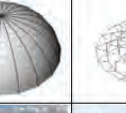

تمونه	تصویر	تقارن			پوشش‌های تاقی و گنبدی سین کلاستیک در معماری گذشته	
		انتقالی	انعکاسی	دورانی		
تاق چهاربخش کاروانسرای تاج آباد همدان (دوره صفویه)			---	*	*	تاق چهاربخش (تاز)
تاق کلنبو مسجد سید اصفهان (دوره قاجاریه)			---	*	*	تاق کلنبو
تمای سر از تاق چشمه تاریخانه دامغان (تیمه اول قرن دوم هجری)			---	*	*	تاق چشمه
تاق کجاوه مسجد جامع مغانباد (دوره تیموری)			*	*	---	تاق کزاوه (کجاوه)
تاق کاربندی حمام وکیل کرمان (دوره قاجاریه)			---	*	*	تاق کاربندی
گنبد خواجه نظام الملک مسجد جامع اصفهان (دوره سلجوقی)			---	---	*	گنبد ناری (شبه گروهی)

معماران و مهندسان همواره در پی یافتن راه‌حل‌های جدید برای حل مسئله ایستایی و استحکام فضاهای محصور در کنار توجه به مسائل زیباشناختی آن بوده‌اند. توجه به فناوری و به‌کارگیری آن امری اجتناب‌ناپذیر در حل مسائل بوده است. هم‌زمان با توسعه راه‌آهن و صنعتی شدن تولیدات کالاها، تقاضا جهت سازه‌های با دهانه وسیع افزایش یافت. با دسترسی وسیع‌تر به آهن و فولاد و تقاضا جهت دهانه‌های وسیع‌تر، یک دوره جدید



در توسعه فرم‌های سازه‌ای جدید آغاز شد. در اولین مرحله مجموعه‌ای از خریپ‌های متنوع شکل گرفت و در مراحل بعد سازه‌های مشبک فضایی سه‌بعدی به وجود آمدند (Chilton, 1999, 1). نیمه دوم قرن بیستم شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه سیستم‌های نوین سازه‌ای همچون سازه‌های غشایی، خریپ‌ی، کششی، کش بستی، هوای فشرده، باز و بسته شونده، سازه‌های فضاکار و... بوده است (Moore, 1998). از اهداف مورد نظر در خلق و ابداع این سازه‌ها می‌توان به کاهش میزان مصرف مصالح، شفافیت بیشتر، گستردگی بصری و انعطاف‌پذیری بیشتر اشاره کرد. در این راستا سازه‌های سه‌بعدی نظیر گنبد به سمت صنعتی شدن گام نهادند و فرم‌های جدید و متنوع سین کلاستیک در قالب سازه‌های فشاری و یا کششی شکل گرفتند. در یک دسته‌بندی از فناوری‌های نوین به کار رفته در پوسته‌های RSS که به صورت فرم‌های گنبدی هستند، می‌توان آنها را از لحاظ منطق سازه‌ای به دو دسته سازه‌های فشاری و کششی تقسیم‌بندی کرد. گنبد‌های مشبک مهاربندی شده، در دسته سازه‌های فشاری قرار می‌گیرند و دارای حالات مختلف‌اند: ۱) گنبد دندان‌دار (۳) گنبد دیامتیک (۴) گنبد لاملا (۵) گنبد ژئودزیک (Lan, 2005, 18). از طرفی پوسته‌های گنبدی غشایی یا کابلی، به لحاظ منطق سازه‌ای در دسته سازه‌های کششی قرار می‌گیرند که شامل گنبد با سازه هوافشرده و گنبد با سازه کش‌بستی هستند (Moore, 1998). بر اساس معیارهای بهینگی فرم و سازه‌ای که در ساختارها و فناوری‌های نوین معماری دیده می‌شود می‌توان به گونه‌شناسی فرمی سطوح RSS رسید (جدول ۳).

جدول ۳. گونه‌شناسی فرمی پوسته‌های RSS در معماری معاصر

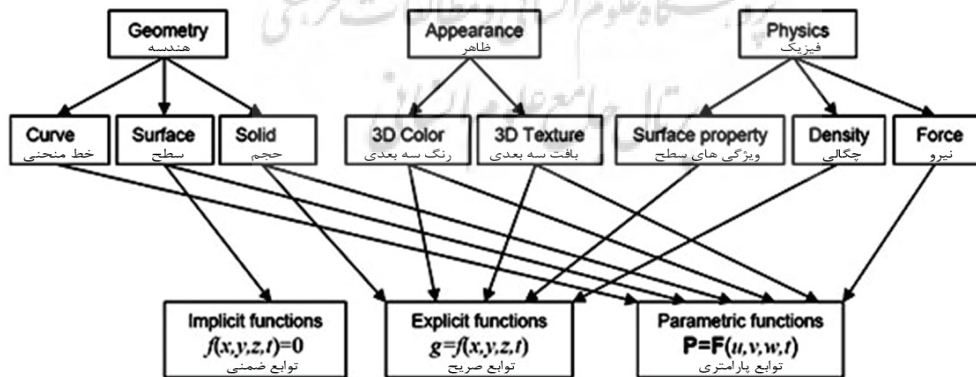
گونه‌شناسی پوسته‌های RSS در معماری معاصر	سازه‌های فشاری (Compressive Structures)				سازه‌های کششی (Tensile Structures)	
	پوسته شبکه‌ای یا پوسته نازک (Grid-Shell or Thin Shell)				غشایی یا کابلی (Membrane or Cable-net)	
	گنبد دندان‌دار Ribbed Dome	گنبد دیامتیک Diamatic Dome	گنبد لاملا Lamella Dome	گنبد ژئودزیک Geodesic Dome	هوا فشرده Air Supported	کش بستی Tensegrity
						
						
گنبد رایشتاگ (Reichstag) آلمان- برلین م. ۱۹۹۹	استرودوم (AstroDome) آمریکا- تگزاس م. ۱۹۶۴	مرکز خرید پانورا (Panora) ترکیه- آنکارا م. ۲۰۰۷	غرغه آمریکا، اکسپو ۶۷ (US Pavilioin, Expo 67) کانادا- مونترال م. ۱۹۶۷	گنبد هوا فشرده (Air Supported) سازه متحرک م. ۲۰۰۵	گنبد تائویوان آرنا (Taoyuan Arena) تایوان- تایپه م. ۱۹۹۳	

## پارامترهای بهینه بودن پوسته‌های RSS

ارتقای نقش ریاضیات و هندسه در معماری معاصر جهان، موجب شده است تا شاهد نوع جدیدی از طراحی معماری و تکنیک‌های جدید در خلق اثر معماری باشیم. نوعی از معماری که بیش از هر چیز به طبیعت، شکل‌ها و سازواره‌های طبیعی شباهت دارد. معماری پارامتری یا به عبارتی معماری داده مبنای، مفاهیمی است که در معماری معاصر جهان با شیوه‌ها و به شکل‌های مختلف مطرح می‌شود. با بهره‌گیری از ریاضی و داده‌ها در این پژوهش، در بررسی پوسته‌های RSS، می‌توان به فرم‌ها و ساختارهای مختلف رسید. روش‌های طراحی مقداری در فرایند دستیابی به فرم‌ها و ساختارهای مختلف گامی در جهت بهره‌مندی از فناوری در حوزه معماری است که معماری و طبیعت را به هم نزدیک‌تر می‌کند. آنچه در این حوزه بسیار مورد توجه معماران واقع می‌شود، کنترل داده‌ها به‌منظور دستیابی به فرم‌ها و ساختارهای بدیع و نو و در عین حال بهینه است. در این بخش از پژوهش به بررسی پارامترهای طولی و عرضی رویه‌های درجه دوم متقارن دورانی توجه شده است و در نهایت، لزوم به‌کارگیری علم ریاضی در فرایند شکل‌گیری فرم و ساختار پوسته‌های RSS صورت می‌گیرد؛ همچنین به موضوع بهینگی پوسته‌های RSS در طبیعت، پرداخته می‌شود.

### بررسی هندسی پارامترهای طولی و عرضی رویه‌های درجه دوم متقارن دورانی

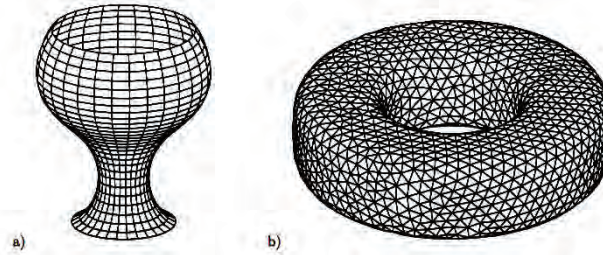
یک «رویه» یا «سطح» مجموعه نقاطی از فضا است که در معادله  $F(x,y,z)=0$  صدق می‌کنند، نظیر: کره، استوانه، مخروط و ... حال در هندسه تحلیلی، «رویه‌های درجه دوم» در فضای سه بعدی دسته‌ای از رویه‌ها هستند که به این صورت تعریف می‌شوند: مکان هندسی همه نقاطی مانند  $P=(x,y,z)$  که در معادله  $F(x,y,z)=0$  صدق کنند به‌گونه‌ای که  $F$  یک تابع درجه دو است (Hass et al., 2017, 737). به‌عنوان مثال کره، سهمیگون، بیضی‌گون و ... در این دسته قرار دارند. از این‌رو می‌توان پوسته‌های RSS را که شامل «کره»، «کره‌گون» و «سهمی‌گون دایروی» می‌باشند در یک دسته خاص یعنی «رویه‌های درجه دوم متقارن دورانی» قرار داد. توابع در حالت کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: توابع صریح<sup>۱۴</sup>، توابع ضمنی<sup>۱۵</sup>، توابع پارامتری<sup>۱۶</sup>. به‌منظور نمایش منحنی‌ها و سطوح از هرکدام از توابع مذکور و یا ترکیب آنها می‌توان استفاده کرد که هر کدام کاربرد و نمایش متفاوتی دارند اما به نظر می‌رسد فقط مواردی که در شکل (۵) نمایش داده شده است کاربرد عملی دارند.



شکل ۵. تعریف هندسی، شکل ظاهری و فیزیک اشکال توسط توابع ضمنی، صریح و پارامتری.

منبع: SOURIN & SOURINA, 2010, 3

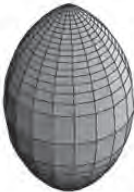


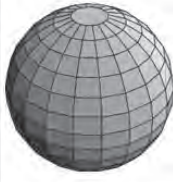



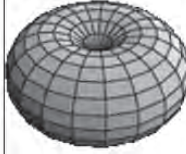
همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود تعریف هندسی سطوح، توسط توابع ضمنی و پارامتریک امکان‌پذیر است و بنابراین می‌توان نمایش هندسی سطوح متقارن دورانی را توسط این دو تابع تعریف کرد و به نمایش گذاشت (شکل ۶).



شکل ۶. سطوح متقارن دورانی (a) پارامتریک (b) ضمنی

منبع: Hartmann, 2003, 112

در این مقاله، ما به دنبال توسعه یک روش کارآمد برای مدل‌سازی پوسته‌های RSS هستیم. به جای استفاده از مدل‌های مبتنی بر چندضلعی و شبکه‌های مثلثی شکل، ما از توابع ریاضی پارامتری استفاده می‌کنیم که بتوانند خصوصیات این پوسته‌ها را مبتنی بر پارامترهای طولی و عرضی و مولدهای افقی و عمودی تعریف کند. یکی از روش‌های مدرن کارآمد در تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف علمی، تجسم رایانه‌ای این داده‌ها یا به عبارت دیگر - تجسم علمی است که به طور گسترده‌ای در تحقیقات مختلف نظری و تجربی استفاده می‌شود. در راستای تجسم همه‌جانبه ریاضیات می‌توان به چند ابزار نرم‌افزاری تجاری در دسترس اشاره کرد که معمولاً برای تحقیق در مورد ریاضیات و هندسه و همچنین یادگیری و آموزش این موضوعات استفاده می‌شود، به عنوان مثال Mathematica، Maple، Mathcad، MATLAB، و Sketchpad Geometer's. از جمله ویژگی‌های دیگر، این ابزارها به محققین این امکان می‌دهد تا اشکال هندسی (منحنی‌ها و سطوح 2D / 3D) را تجسم کنند (Sourin & Sourina, 2010, 1). به منظور تجسم علمی با استفاده از نرم‌افزار متلب، می‌توان الگوریتم مناسب را به صورت داده‌های پارامتری تعریف نمود. یک الگوریتم مجموعه مشخصی از دستورات است که اطلاعات را به عنوان ورودی دریافت کرده، پردازش می‌کند و پاسخ آن را در خروجی به ما ارائه می‌دهد. الگوریتم‌ها کارهای مختلف و متعدد محاسباتی را انجام می‌دهند و به نوعی زبان اصلی کامپیوتر در انجام عملیات آن هستند. در یک نرم‌افزار سه‌بعدی این الگوریتم‌ها می‌توانند در قالب دستورات مشخص، اطلاعاتی را از طراح گرفته و بر اساس پردازش این اطلاعات اولیه به تولید فرم بپردازند (خبازی، ۱۳۹۱، ۲۰). نمونه‌هایی از تجسم هندسی پوسته‌های RSS، به کمک نرم‌افزار متلب در شکل (۷) مشاهده می‌شود.

			
Lemon Surface دوکی شکل	Spheroid Prolate شبه کروی کشیده عمودی	Oblate Spheroid شبه کروی کشیده افقی	Sphere کروی
			
Barrel چلیکی شکل	Paraboloid سهمی گون دایروی	Apple Surface چنبره دوکی	Horn Torus چنبره شاخی

شکل ۷. نمونه‌هایی از پوسته‌های RSS ایجادشده به کمک نرم‌افزار متلب

با توجه به گستردگی حوزه پوسته‌های RSS، تمرکز بر روی نمونه‌های کروی و سهموی صورت گرفته است، از طرفی پتانسیل‌های بالا و کاربردی نمونه «سهمی گون دایروی» در طبیعت و معماری موجب شد تا بررسی بیشتری بر روی این نمونه صورت پذیرد. به‌عنوان مثال در بررسی نمونه «سهمی گون دایروی»، بایستی ابتدا به کمک توابع پارامتری درجه ۲، به تعریف پارامترهای مورد نیاز بپردازیم؛ به همین منظور در ابتدا با توجه به تقارن دورانی، سعی شد که دامنه دوران عرضی سهمی،  $360^\circ$  درجه در نظر گرفته شود، یعنی:

Range:  $0 \leq u \leq 2\pi$ ، پس از آن به کمک تابع درجه دوم «سهمی گون دایروی»، سایر پارامترهای ارتفاعی سهمی و پارامترهای تشکیل دهنده شبکه پوسته تعریف شد. بدین ترتیب  $x(u,v)$ ،  $y(u,v)$ ،  $z(u,v)$  بر اساس پارامترهای مورد نظر تعریف و الگوریتم مورد نظر معین شد. با تعیین داده‌های مختلف پارامتری، خروجی بسیار متنوعی از رویه‌های توابع درجه دوم سهمی گون دایروی به دست آمد که شامل انواع مختلف سهموی‌های متقارن دورانی و حالات خاص ترکیب و چهار بخش می‌شود. بدین ترتیب به کمک توابع پارامتری درجه دوم و مشخص کردن توابع متغیر، می‌توان به فرم‌های متنوع بر اساس فرمول‌های ریاضی دست یافت و این کار مقدمه نزدیکی هرچه بیشتر میان طبیعت و معماری است. تعدادی از فرم‌های ایجادشده بر اساس تعریف پارامتری سطوح «کروی» و «سهمی گون دایروی» در اینجا نشان داده شده است که با استفاده از تغییر پارامترها می‌توان به بهینگی سطح پوسته رسید (جدول ۴).

جدول ۴. شکل رویه پوسته‌های RSS در تعریف پارامتری

فرمول رسم هندسی تابع سهموی ۲ متغیره بر اساس تغییر پارامتر	توضیحات	شکل رویه پوسته		پوسته های RSS
		تصویر سه بعدی	تصویر از بالا	
$\text{Range } 0 \leq u \leq 1 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq 1 \text{ pi}$ $x(u, v) = \cos(u) * \cos(v)$ $y(u, v) = \cos(u) * \sin(v)$ $z(u, v) = \sin(u)$ $20 \times 20$	دامنه دوران طولی = ۱۸۰ درجه دامنه دوران عرضی = ۱۸۰ درجه تعداد حلقه های عمود = ۴۰ تعداد حلقه های افقی = ۱۰			نیم کروی
$\text{Range } 0 \leq u \leq 2 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq 1$ $x(u, v) = \sqrt{v} * \cos(u)$ $y(u, v) = \sqrt{v} * \sin(u)$ $z(u, v) = v$ $10 \times 10$	دامنه دوران عرضی = ۳۶۰ درجه ارتفاع پوسته = ۱ واحد تعداد نیم سهمی = ۱۰ تعداد حلقه های افقی = ۱۰			ترکین
$\text{Range } 0 \leq u \leq 2 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq 2$ $x(u, v) = \sqrt{v} * \cos(u)$ $y(u, v) = \sqrt{v} * \sin(u)$ $z(u, v) = v$ $50 \times 50$	دامنه دوران عرضی = ۳۶۰ درجه ارتفاع پوسته = ۲ واحد تعداد نیم سهمی = ۵۰ تعداد حلقه های افقی = ۵۰			سهموی دورانی
$\text{Range } 0 \leq u \leq 2 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq 12$ $x(u, v) = \sqrt{v} * \cos(u)$ $y(u, v) = \sqrt{v} * \sin(u)$ $z(u, v) = v$ $50 \times 50$	دامنه دوران عرضی = ۳۶۰ درجه ارتفاع پوسته = ۱۲ واحد تعداد نیم سهمی = ۵۰ تعداد حلقه های افقی = ۵۰			سهموی دورانی
$\text{Range } 0 \leq u \leq 2 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq .2$ $x(u, v) = \sqrt{v} * \cos(u)$ $y(u, v) = \sqrt{v} * \sin(u)$ $z(u, v) = v$ $50 \times 50$	دامنه دوران عرضی = ۳۶۰ درجه ارتفاع پوسته = ۰.۲ واحد تعداد نیم سهمی = ۵۰ تعداد حلقه های افقی = ۵۰			سهموی دورانی
$\text{Range } 0 \leq u \leq 2 \text{ pi} \quad 0 \leq v \leq .5$ $x(u, v) = \sqrt{v} * \cos(u)$ $y(u, v) = \sqrt{v} * \sin(u)$ $z(u, v) = v$ $4 \times 20$	دامنه دوران عرضی = ۳۶۰ درجه ارتفاع پوسته = ۰.۵ واحد تعداد نیم سهمی = ۴ تعداد حلقه های افقی = ۲۰			چهاربخش

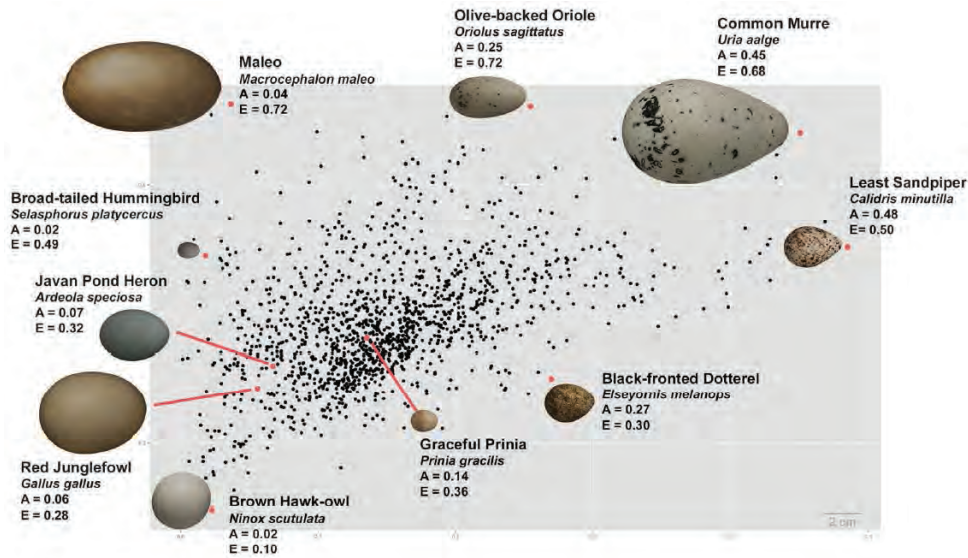
آنچه از نتایج این پژوهش در این بخش برمی آید، شباهت بسیار بالای این پوسته‌ها با نمونه‌های گنبدی در سراسر جهان است. به همین منظور کاربرد عملی این پژوهش در اینجا بسیار پررنگ‌تر می‌شود و این خود می‌تواند مقدمه‌ای برای محاسبه دقیق سطوح پوسته‌ای با مقادیر و داده‌های پارامتریک باشد. در اینجا با طراحی الگوریتمی و مشخص نمودن مسیر دقیق ورودی، به خروجی‌های بسیار دقیق که حاصل عبور از فرایند کاملاً محاسباتی است، می‌توان رسید؛ البته این مطلب را هم بایستی عنوان نمود که پارامترهای اثرگذار

دیگری نیز بر بهینگی نمونه واقعی می‌بایست در نظر گرفته شود؛ شرایط محیطی، نیروهای وارده، شکل اعمال نیرو، جنس پوسته، دوام، پایداری، مقیاس بهره‌برداری، کاربران و بهره‌وران، از جمله عوامل مؤثر هستند که با بررسی‌های دقیق‌تر به مقاصد مورد نظر می‌توان نزدیک شد.

## پارامترهای بهینگی پوسته‌های RSS در طبیعت

در مطالعه مورفولوژی طبیعت، پوسته‌های سین کلاستیک بسیار فراوان اند، تخم پرندگان، پوسته‌های جانوران دریایی، لاک‌پشت‌ها، جمجمه‌ها، دانه گیاهان و بسیاری از لانه‌هایی که پرندگان خاص با غریزه می‌سازند همه بر پایه این نوع پوسته‌اند. به‌منظور شناخت پارامترهای بهینگی پوسته‌های RSS در طبیعت، تخم پرندگان به‌عنوان نمونه، مورد بررسی قرار گرفته است. تخم پرنده، یک پدیده طبیعی منحصر به فرد است که با جنبه‌های مختلف زندگی انسان ارتباط تنگاتنگی دارد. این یک محصول غذایی، موضوع تحقیق در پرندشناسی و پرورش طیور است. منحنی‌های تخم‌مرغی شکل در ریاضیات، هنر، معماری، فلسفه و دین توجه خاصی را به خود جلب می‌کنند. از نظر تاریخی، طرح‌های مختلف تخم‌مرغی شکل از زمان ایران باستان، بیزانس و روس شناخته شده‌اند (Ghyka, 1979). از این طرح‌ها برای ساخت گنبد معابد استفاده شد. بعدها، طرح‌های تخم‌مرغی شکل به‌شدت در معماری، ساخت، نقاشی و هنرهای کاربردی مورد استفاده قرار گرفت (Mytiai & Matsuyura, 2019, 2).

تخم هر پرنده به روش متفاوتی می‌چرخد. برای قرن‌ها، دانشمندان تعجب می‌کردند که چرا شکل تخم از پرنده‌ای به پرنده دیگر بسیار متفاوت است. برای شروع، ما باید بدانیم چه اشکالی از تخم پرنده امکان‌پذیر است. خوشبختانه علاقه‌مندان و موزه‌های تاریخ طبیعی صدها سال است که تخم‌های پرندگان را جمع‌آوری و فهرست‌بندی می‌کنند. سپس، باید بدانیم چه نوع پرندگانی با اشکال مختلف تخم مرتبط هستند؟ و سرانجام، چگونه ممکن است ویژگی‌های خاص آنها - از عادات لانه‌سازی تا اندازه بدن - شکل تخم‌های آنها را در طول زمان تکامل تغییر دهد؟ دانشمندان جستجوی خود را با مشاهده عکس‌های ۴۹۱۷۵ تخم پرنده که توسط موزه جانورشناسی مهره‌داران در برکلی<sup>۱۷</sup> ارائه شده است، آغاز کردند. تخم‌ها از آشیانه‌ها، لانه‌های زیرزمینی و کلونی‌ها در سراسر جهان برای بیش از ۱۰۰ سال جمع‌آوری شده بودند (Museum of Vertebrate Zoology, nd). آزمایشگاه استاندارد در دانشگاه پرینستون<sup>۱۸</sup>، با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای ویژه برای اسکن هر تصویر، اندازه‌گیری تخم پرنده و سپس تعیین طیف کامل شکل تخم در پرندگان، تصاویر ۳۷ دسته پرنده، که همه آنها از دسته‌های مهم پرندگان هستند را مورد بررسی قرار داد؛ یعنی ۱۴۰۰ گونه که تنها ۱۴ درصد از کل ۱۰۰۰۰ گونه پرنده است. در مرحله بعد، محققان دو ویژگی را بررسی کردند: مخروطی بودن یا میزان تندی تخم‌ها و بیضوی بودن یا اینکه چقدر تخم‌ها از یک کره کامل منحرف می‌شوند. تقریباً تخم پرندگان در همه‌جا یافت می‌شود. برخی بیضوی هستند، برخی مخروطی هستند، برخی از آنها ترکیبی از هر دو هستند و برخی همانند جغد شاهینی<sup>۱۹</sup> کره کامل هستند؛ تخم جغد شاهینی بیشترین حد کروی بودن را دارد، اما پرندگان دیگر به گونه دیگری هستند. پرندگان ساحلی مانند سینه سفید نوک قلمی<sup>۲۰</sup> و آبچلیک<sup>۲۱</sup> تخم‌های فوق کشیده دارند. مرغ چکشی<sup>۲۲</sup> نیز بیضوی‌ترین تخم را دارد. متداول‌ترین نوع تخم پرنده شبیه تخم سسکک رعنا<sup>۲۳</sup> (*Prinia gracilis*) است، البته کاملاً شبیه تخم‌مرغی که ما به ذهن می‌آوریم نیست (شکل ۸) (Stoddard et al., 2017, 1250).



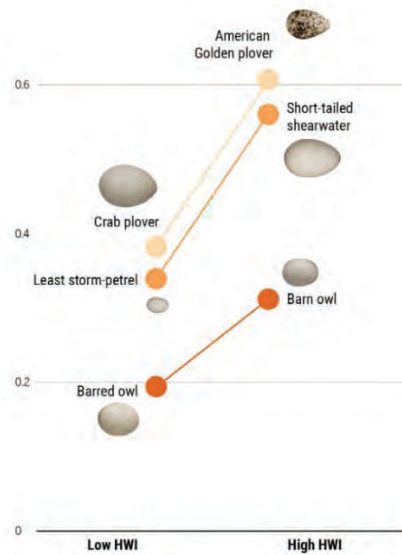
شکل ۸. نمایش شکل فضایی تخم پرندگان؛ تنوع در کشیدگی مخروطی A (محور افقی) و بیضوی E (محور عمودی) میانگین شکل تخم مرغ برای هر یک از ۱۴۰۰ گونه (نقاط سیاه) و تصاویر تخم‌های نماینده (نقاط قرمز)، به همراه پارامترهای عددی.

منبع: Stoddard et al., 2017, 1250

طی سال‌ها، دوستداران پرندگان و دانشمندان انواع طبقه‌بندی و فرضیه‌ها را برای شکل تخم پرنده ارائه کرده‌اند و بیشتر مربوط به تاریخچه زندگی پرنده یا محیطی است که در آن زندگی می‌کنند. در یک دسته‌بندی بر مبنای شکل هندسی پایه، طبق دسته‌بندی نیشیاما<sup>۲۴</sup>، آنها را می‌توان در ۴ گروه طبقه‌بندی کرد: ۱- دایره‌ای<sup>۲۵</sup>، ۲- بیضوی<sup>۲۶</sup>، ۳- تخم‌مرغی شکل<sup>۲۷</sup> و ۴- گلابی شکل<sup>۲۸</sup> (Nishiyama, 2012, 685).

در ادامه، اگر مجدد به این سؤال مطرح شده برگردیم که چرا شکل تخم از پرنده‌ای به پرنده دیگر بسیار متفاوت است، قطعاً بایستی به پارامترهای مؤثر بسیاری در شکل‌گیری بهینگی تخم پرنده توجه شود. در این بخش از پژوهش به معرفی تعدادی از آنها پرداخته شده است. البته بایستی خاطر نشان کرد موارد استثناء هم دیده می‌شود. محققان با بررسی تاریخچه زندگی و روابط تکاملی پرندگان در مطالعه جدیدی که در نشریه Science منتشر شده است، به نتایج قابل تأملی رسیده‌اند که به برخی از آنها اشاره می‌کنیم (Crespy & You, 2017).

۱. اندازه «دسته تخم در لانه»<sup>۲۹</sup>: (Clutch) نشان می‌دهد تعداد تخم‌ها در یک لانه می‌تواند بر ظاهر تخم پرنده تأثیر بگذارد، یعنی با برخی اشکالی از تخم‌ها که برای تقسیم گرما بهینه شده‌اند.
۲. فاکتور چرخش تخم: تخم‌های کروی به راحتی می‌توانند از روی صخره بچرخند. با این حال، تخم‌های مخروطی شکل در یک دایره تنگ می‌چرخند و آنها را برای پرندگان لانه صخره‌ای مناسب می‌کند.
۳. شاخص بال (HWI)<sup>۳۰</sup>: محققان مجموعه زیادی از متغیرها را بررسی کردند، از جمله: توده بدن پرنده بالغ. رژیم غذایی؛ تعداد تخم در لانه، نوع لانه، محل لانه، محیط، و چیزی به نام شاخص بال (HWI)، نماینده‌ای برای قابلیت پرواز. HWI بالاتر نشان داد که با عملکرد بهتر پرواز ارتباط دارد. پس از جمع‌آوری اعداد، دانشمندان پیوندهایی را که به دنبال آن بودند پیدا کردند: طول یک تخم با اندازه بدن پرنده ارتباط دارد. شکل یک تخم - چقدر مخروطی یا بیضوی است - به عادات پرواز مربوط می‌شود. و هرچه پرواز پرنده قوی‌تر باشد، تخم‌های آن مخروطی یا بیضوی تر خواهد بود (شکل ۹).



شکل ۹. شاخص بال پرنده و نمایش ارتباط طول و شکل تخم پرنده با پرواز

منبع: Stoddard *et al.*, 2017, 1254

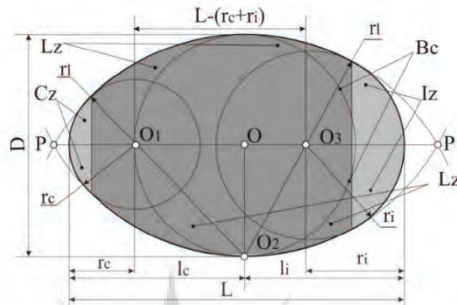
۴. درجه کشیدگی مخروطی یا بیضوی تخم: هنگامی که به پرندگان با نظم یکسان نگاه می‌کنید، آنهایی که پرواز قوی‌تری دارند، دارای تخم‌هایی هستند که کشیدگی مخروطی یا بیضوی بیشتری دارند.
۵. اندازه مجرای تخم پرنده مادر: شکل تخم پرنده تعادل بین دو فشار است؛ یکی محتویات داخل تخم و دیگری مجرای عبور تخم در خارج، که با ضخامت غشای تخم درست زیر پوسته تعدیل می‌شود و نه خود پوسته به تنهایی. واقعیت جالب اینجاست که اگر پوسته از غشاء جدا شود، تخم همچنان شکل خود را حفظ می‌کند.
۶. ساختار تخم پرنده: در اینجا بایستی به ارتباط بین پرواز و شکل تخم پرنده اشاره کرد. پرندگان دارای اندامی هستند با شکلی که مقاومت هوا را در برابر آن کم می‌کند<sup>۳۱</sup> - به ویژه در پروازهای قوی‌تر - اندام‌های آنها فشرده شده و به حداقل می‌رسد. از طرفی برای اینکه بیشترین استفاده از تخم‌ها باشد، آنها را با اشکال مخروطی یا بیضوی که حجم آنها نسبت به قطر تخم آنها بیشتر از تخم‌های کروی است، ساخته می‌شود. در عین حال بایستی به ساختار سبک، متخلخل و در عین حال مستحکم تخم پرندگان اشاره کرد. در رابطه بین توانایی پرواز و شکل تخم استثنائاتی نیز وجود دارد. به عنوان مثال، در حالی که تخم‌های شتر مرغ<sup>۳۲</sup> کروی هستند، تخم‌های پرنده کیوی<sup>۳۳</sup> بیضوی هستند، حتی اگر هر دو گونه پرواز نکنند. همچنین پنگوئن‌ها که پرندگان بدون پروازی هستند، تخم‌های مخروطی می‌گذارند، محققان طراحی شکل تخم آنها را برای شنا قوی زیر آب با شکل بدنشان که مقاومت فشار آب را در برابر آن کم می‌کند، مرتبط می‌دانند.

### بهینگی فرم و ساختار پوسته‌های RSS در طبیعت و معماری

الهام از فرم‌ها و سازه‌های طبیعی، از سطحی‌ترین برداشت‌های شکلی تا برداشت‌های عمیق، ناشی از مطالعه رفتارهای فرمی و سازه‌ای اعضاء در طبیعت است. سازگاری با اقلیم، هندسه فرمی و استحکام سازه‌ای از جمله موارد مشترک میان طبیعت و معماری است که می‌تواند مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. از طرفی می‌توان به طبیعت به عنوان یک نیروی فناورانه نگریست، نیرویی که همواره از ابتدای خلقت بشر همواره مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی تخم پرندگان، به عنوان یک نمونه بهینه از فرم و ساختار پوسته‌های RSS در طبیعت پرداخته‌ایم، در اینجا می‌خواهیم به بررسی پارامترهای بهینگی فرم و ساختار پوسته‌های RSS در معماری بپردازیم.



امروزه با پیشرفت‌هایی که در به‌کارگیری ابزارهای فناورانه در طراحی و ساخت معماری حاصل شده است، دقت در محاسبات، پردازش اطلاعات و کیفیت بهتر در بررسی ابعاد مختلف موضوع مورد نظر بسیار بالاتر رفته است. طراحی اولیه معمار که معمولاً با اسکیس‌های اولیه همراه است بایستی با پارامترهای دقیق معرفی شود، به‌عنوان مثال در بررسی پارامتریک تخم‌پرنندگان، از پروفیل تخم‌مرغی شکل میتیای<sup>۳۴</sup> و ماتسیورا<sup>۳۵</sup> استفاده کرده‌ایم و به‌صورت پارامتری می‌توان به گونه‌های مختلف شکل هندسی تخم‌پرنندگان رسید. در این پروفیل تخم‌مرغی شکل، تمامی استانداردهای هندسی در اشکال تخم‌مرغی شکل رعایت شده و برای نمونه‌های واقعی به کمک مدل‌سازی رایانه‌ای قابل استفاده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. طرح کلی تخم‌مرغی و تعریف ورودی‌های مختلف پارامتری:  $O - O3$  - مراکز قوس‌های مزدوج  $P, P1$  - نقاط تقاطع قوس‌های جانبی؛  $Bc$  - دایره پایه؛  $Iz, Lz, Cz$  - نواحی کیفی شکل، جانبی و مخفی تخم‌مرغی و شعاع آنها؛  $r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7, r8, r9, r10, r11, r12, r13, r14, r15, r16, r17, r18, r19, r20, r21, r22, r23, r24, r25, r26, r27, r28, r29, r30, r31, r32, r33, r34, r35, r36, r37, r38, r39, r40, r41, r42, r43, r44, r45, r46, r47, r48, r49, r50$  - طول قسمت‌های زیر باریک و مخفی

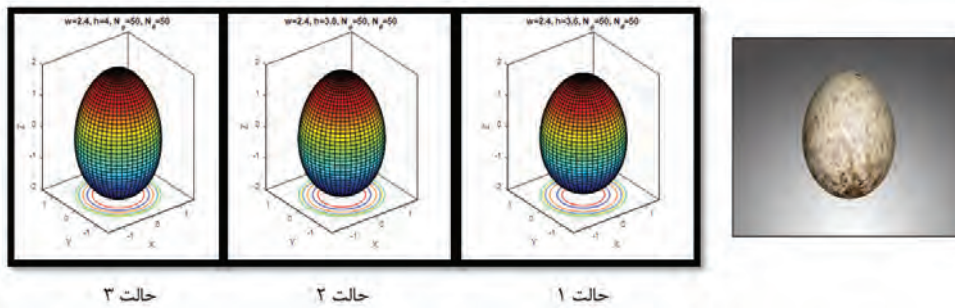
منبع: Mytiai & Matsyura, 2019, 265

به‌منظور مطالعه دقیق‌تر پارامترهای پوسته یک تخم‌مرغ، با استفاده از اندازه‌گیری بیشترین عرض  $w$  و بیشترین ارتفاع  $h$  و همچنین با استفاده از کدهای اعتبارسنجی لازم در نرم‌افزار متلب و در نظر گرفتن مولدهای عمودی و افقی  $N_{theta}$  و  $N_{phi}$  به میزان  $Max=50$ ، مدل پارامتری یک نمونه تخم‌مرغ به دست آمد. بر این اساس مطابق اطلاعات جدول (۵)، ۳ حالت در نظر گرفته شد که در آن به تغییرات پارامتریک پوسته تخم‌مرغ پرداخته شده است. ادامه با ثابت نگه‌داشتن کلیه پارامترهای تعریف‌شده، مقادیر  $h$  به‌عنوان پارامتر متغیر طولی تعریف شد.

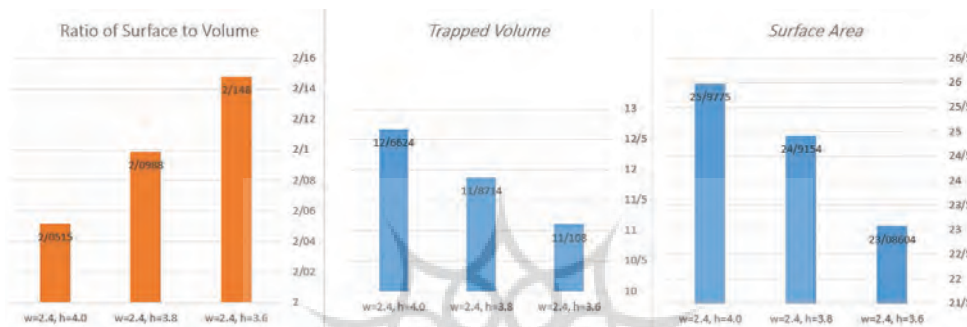
جدول ۵. مقادیر مفروض برای پارامترهای  $w, h, N_{theta}$  و  $N_{phi}$

توضیحات	نسبت سطح بهینه به حجم اشغال شده	حجم اشغال شده	سطح بهینه	$N_{theta}$	$N_{phi}$	$w$	$h$	حالت
با افزایش ارتفاع پوسته، مساحت پوسته و حجم اشغال شده بیشتر می‌شود اما نسبت سطح پوسته به حجم اشغال شده کمتر می‌شود.	2.1480	11.1080	23.8604	50	50	2.4	3.6	حالت ۱
	2.0988	11.8714	24.9154	50	50	2.4	3.8	حالت ۲
	2.0515	12.6624	25.9775	50	50	2.4	4.0	حالت ۳

با توجه به کد نویسی صورت گرفته در نرم‌افزار متلب برای نمونه تخم‌مرغی، با تعریف دقیق پارامترها مطابق خواسته‌های مسئله، به خروجی‌های بسیار دقیق که حفظ شکل کلی تخم‌مرغ از طریق فرایند کاملاً محاسباتی است، می‌توان رسید. شکل (۱۱) حاصل این خروجی‌ها دستیابی اطلاعات سطح پوسته در مقایسه با میزان حجم اشغال شده است.



شکل ۱۱. نمایش مدل سازی پارامتری نمونه‌ها به کمک نرم افزار محاسباتی متلب



شکل ۱۲. به ترتیب از سمت راست؛ میزان سطح بهینه، حجم اشغال شده و نسبت سطح به حجم اشغال شده

نتایج مدل سازی پارامتری مطابق شکل (۱۲)، حاکی از آن است که در مقایسه حالت‌های ۱ و ۲ و ۳، با افزایش ارتفاع پوسته، مساحت پوسته و حجم اشغال شده بیشتر می‌شود اما نسبت سطح پوسته به حجم اشغال شده کمتر می‌شود و این نتیجه، افزایش بهینگی سطح پوسته را نشان می‌دهد که بیانگر داشتن مصالح حداقلی در نسبت سطح به حجم اشغال شده در پوسته‌های RSS است.

از طرفی در بررسی‌های صورت گرفته از انواع مختلف تخم‌های پرندگان به‌عنوان نمونه‌ای از پوسته‌های RSS در طبیعت، مشخص شد که چرا شکل فرمی و ساختاری تخم پرندگان مختلف با هم متفاوت هستند و در نهایت، پارامترهای مختلف شکل‌گیری فرمی و ساختاری بهینه تخم پرنده، از شکل لانه و فیزیک مرغ مادر گرفته تا توانایی پرواز پرنده مورد شناسایی قرار گرفت. همین مسئله به نحوی در نمونه‌های پوسته‌های RSS در معماری از گذشته تاکنون بسیار مورد توجه معماران بوده و هست به‌نحوی که این توجهات در خصوص رسیدن به بهینگی فرمی و ساختاری با پیشرفت‌های تکنولوژیکی، بسیار بیشتر از گذشته اهمیت یافته است. در جدول (۶) به معرفی تطبیقی پوسته طبیعی تخم پرنده به‌عنوان یک پوسته RSS طبیعی و الگوپذیری در معماری پرداخته‌ایم. ابتدا برخی از پارامترهای تأثیرگذار در شکل‌گیری بهینه تخم پرنده را معرفی کرده‌ایم که شامل: اندازه دسته تخم پرنده (Clutch Size)، چرخش تخم پرنده، شاخص بال (HWI)، درجه کشیدگی مخروطی یا بیضوی تخم پرنده و ساختمان تخم پرنده است؛ سپس بر اساس الگوی پارامتری هندسی شکل مورد نظر، مدل سازی پارامتری اولیه معرفی شده است. در این مرحله، ۲ مورد از ساختمان‌های اداری که برگرفته از نمونه‌های پوسته‌های RSS در معماری معاصر است، انتخاب شد. ساختمان دفتر مرکزی سوئیس ری<sup>۳۶</sup>، به شکل یک پوسته کشیده تخم‌مرغی شکل در لندن و گنبد ساختمان پارلمان آلمان در برلین که به گنبد رایشتاگ<sup>۳۷</sup> شهرت دارد، به‌عنوان نمونه‌های موردی، مورد بررسی فرمی و ساختاری قرار گرفتند. در

ساختمان رایشتاگ، فرم نیم‌کره گنبد توانسته است علاوه بر پوشش دهانه ۴۲ متری، به بهیئنگی فرمی سطح نیز دست یابد، از طرفی می‌توان به سازه بسیار سبک، شفاف و در عین حال مستحکم گنبد اشاره داشت که در کنار بهیئنگی فرمی، بهیئنگی ساختاری را نیز به همراه داشته است. شبیه‌سازی‌های پارامتری رایانه‌ای صورت گرفته بر روی مرکز سوئیس ری لندن نیز حاکی از بهیئنگی مطلوب فرمی و کاهش مقاومت هوا در برابر پوسته طراحی شده است؛ نورمن فاستر، معمار این پروژه، با در نظر گرفتن نیروهای جانبی باد و طراحی سازه مورب بیرونی، توانسته در کنار بهیئنگی فرمی به بهیئنگی سازه‌ای نیز دست یابد (Baxter, 2011, 26) (جدول ۶).

جدول ۶. نمونه‌ای از بهیئنگی فرم و ساختار پوسته‌های RSS در طبیعت و معماری

بهیئنگی فرم و ساختار پوسته‌های RSS در طبیعت و معماری		
طبیعت		
توضیحات	تخم پرندگان	
نشان می‌دهد تعداد تخمها در یک لایه می‌تواند بر ظاهر تخم پرنده تأثیر بگذارد، یعنی با برخی اشکالی از تخم‌ها که برای تقسیم گرمای پخته شده اند.		اندازه «دسته تخم» <b>Clutch Size</b>
تخم مرغ‌های کروی به راحتی می‌توانند از روی صخره بچرخند یا این حال، تخم مرغ‌های مخروطی شکل در یک دایره تنگ می‌چرخند و آنها را برای پرندگان لایه صخره‌ای مناسب می‌کند.		پارامتر چرخش تخم: <b>The roll factor</b>
HWI یا لایه نشان داد که با عملکرد بهتر پرواز ارتباط دارد. نتایج نشان می‌دهند طول یک تخم مرغ یا اندازه بدن پرنده ارتباط دارد. شکل یک تخم مرغ - چقدر مخروطی یا بیضی است - به عادات پرواز مربوط می‌شود، و هرچه پرواز پرنده قوی تر باشد، تخم مرغ‌های آن مخروطی یا بیضی تر خواهد بود.		پارامتر شاخص بال: (HWI) <b>Hand Wing Index</b>
هنگامی که به پرندگان یا نظم یکسان نگاه می‌کنید، آنهایی که پرواز قوی تری دارند دارای تخم‌هایی هستند که کشیدگی مخروطی یا بیضی بیشتری دارند.		پارامتر درجه کشیدگی مخروطی یا بیضی تخم: <b>Degree of E. &amp; A.</b>
پرندگان دارای اندامی هستند یا شکلی که مقاومت هوا را در برابر آن کم می‌کنند - به ویژه در پروازهای قوی تر - اندام‌های آنها فشرده شده و به حداقل می‌رسند. از طرفی برای اینکه بیشترین استفاده از تخم‌ها باشد، آنها را با اشکال مخروطی یا بیضی که حجم آنها نسبت به قطر تخم آنها بیشتر از تخم‌های کروی است، ساخته می‌شود. در عین حال بایستی به ساختار سبک، متخلخل و در عین حال مستحکم تخم پرندگان اشاره کرد.		پارامتر ساختاری تخم پرنده: <b>Structure of Egg</b>
<b>معماری</b>		
جمع آوری داده‌ها و طراحی بر اساس پارامترهای نمونه بیسته طبیعی و دستیابی به الگوی شبیه سازی رایانه‌ای مطلوب.		عمل سازی پارامتری با الهام از نمونه طبیعی
ساختمان پارلمان آلمان در برلین، گنبد رایشتاگ Reichstag Dome نورمن فاستر، ۱۹۹۵ م. - طراحی فرم و سازه گنبد یا دهانه ۴۲ متری و ارتفاع ۲۳ متر گنبدی مقاوم و در عین حال بسیار سبک که توانسته پوشش بسیار مناسبی برای چنین دهانه بزرگی ایجاد کند.		پارامترهای بهیئنگی فرمی و سازه‌ای گنبد <b>radial symmetry (polygons)</b>
ساختمان دفتر مرکزی Swiss Re، لندن، انگلستان. نورمن فاستر، ۱۹۹۷- در سال ۲۰۰۴ م.، این تصویر ارتفاع و شبیه سازی کامپیوتری تیرهای یاد بر روی برج را نشان می‌دهد. در طراحی این نمونه به پارامتر بهیئنگی فرم و کاهش مقاومت هوا در طراحی پوسته توجه شده است.		پارامتر بهیئنگی فرم و کاهش مقاومت هوا در طراحی پوسته

در بحث بهیئنگی فرمی و ساختاری پوسته‌های RSS در معماری بایستی به برخی از پتانسیل‌های بالای این پوسته‌ها در طبیعت و معماری اشاره داشت؛ نظیر: ۱- رسیدن به بهیئنگی فرمی و ساختاری با مقاومت حداکثری در دهانه‌های بزرگ ۲- صرف کمترین مصالح و داشتن سطح حداقلی ۳- کاهش مقاومت در برابر نیروهای جانبی باد در تماس حداقلی فرمی و ساختاری ۴- داشتن فرم مطلوب در پاسخ به شرایط محیطی و جوی. اما مطالعات حاصل از معماری زیست‌الگو از طریق مدل‌سازی پارامتریک پوسته تخم‌مرغ به کمک نرم‌افزار متلب نشان داد که با افزایش ارتفاع می‌توان به بهیئنگی سطحی بیشتری در رابطه با حجم اشغال‌شده دست یافت، از طرفی بررسی پارامترهای بهیئنگی تخم‌پرنده به‌عنوان یک نمونه از پوسته‌های RSS که به‌طور خاص بررسی شد، نشان می‌دهد که بهیئنگی این پوسته‌ها، تابع یکسری شرایط و قوانینی است که در نهایت منجر به بهیئنگی فرمی و ساختاری آنها می‌شود و این موضوع بایستی مورد توجه معماران واقع شود که پارامترهای بهیئنگی فرمی و ساختاری در طبیعت به زمینه و بستر توجه بسیار داشته‌اند و فرمول بهیئنگی علاوه بر اینکه تابع شرایط محیطی است، می‌تواند با تغییرات پارامتریک به بهیئنگی هر چه بیشتر آن نیز کمک نمود، به‌طور مثال: بررسی مفهوم اندازه «دسته تخم» یا Clutch Size در شکل‌گیری تخم‌پرنده نشان می‌دهد که ارزیابی‌های رسیدن به بهیئنگی حداکثری فرمی و ساختاری پوسته در لانه به‌طور دقیق ابتدا در رحم پرنده شکل گرفته و سپس در بستر لانه جای می‌گیرد، این در حالی است که قواعد بهیئنگی در انواع لانه‌ها و گونه‌ها دیده شده است. از طرفی ساختار و جنس پوسته تخم‌پرنده یکسان نیست و تابع شرایط داخلی و نیروهای بیرونی وارد بر پوسته است. از مطالب مذکور می‌توان به قواعد و قوانین جدیدی در بهیئنگی فرمی و ساختاری پوسته‌های RSS در معماری رسید که به مواردی از آنها اشاره می‌شود: ۱- طراحی و اجرای پوسته‌های در جای متمرکز بر زمینه و بستر ۲- طراحی و اجرای پوسته‌های پیش‌ساخته<sup>۳۸</sup> متمرکز بر زمینه و بستر: از آنجا که پیش‌ساختگی در حالت کلی به معنای جهانی‌سازی به‌منظور کاهش هزینه‌ها، افزایش سرعت و دقت انجام پروژه را دارد؛ در اینجا با یک مفهوم جدیدی روبه‌رو هستیم و آن پیش‌ساختگی متمرکز بر زمینه و بستر است، در چنین پوسته‌ای به‌منظور رسیدن به بهیئنگی حداکثری، پارامترهای ساخت منطبق با پارامترهای محیطی بستر در نظر گرفته شده است. ۳- اهمیت فناوری در رسیدن به بهیئنگی حداکثری فرمی و ساختار پوسته‌های RSS در معماری: به‌کارگیری فناوری‌های نوین معماری می‌تواند علاوه بر دستیابی به بهیئنگی سطحی در رابطه حجم اشغالی، در تعیین نوع مصالح، مقاومت حداکثری پوسته، به‌کارگیری حداقلی مصالح، تحلیل هرچه بهتر نیروهای وارده ثقلی و نیروهای محیطی جانبی مؤثر باشد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث مطرح‌شده و اهمیت الگوبرداری از فرم‌ها و ساختارهای طبیعی، با شناخت دقیق و بهره‌مندی از پتانسیل‌های بالای پوسته‌های RSS در طبیعت، می‌توان به ویژگی‌هایی بهیئنگی فرمی و ساختاری این پوسته‌ها نسبت به سایر پوسته‌ها پی برد. برخی از این پتانسیل‌ها شامل: ۱- رسیدن به بهیئنگی فرمی و ساختاری با مقاومت حداکثری در دهانه‌های بزرگ ۲- صرف کمترین مصالح و داشتن سطح حداقلی ۳- کاهش مقاومت در برابر نیروهای جانبی باد در تماس حداقلی فرمی و ساختاری ۴- داشتن فرم مطلوب در پاسخ به شرایط محیطی و جوی. پژوهش جاری نشان می‌دهد در حال حاضر نمونه‌های بسیار زیادی از پوسته‌های RSS در طبیعت وجود دارند که طراحان به دنبال استفاده از آنها کمتر رفته‌اند. از انواع دانه گیاهان و پوسته‌های طبیعی گرفته تا تخم‌پرنده‌ها و نحوه لانه‌سازی برخی حیوانات. از طرفی با نگاهی به معماری گذشته و معاصر، می‌توان به نمونه‌های بسیاری از انواع پوسته‌های RSS در معماری رسید، نظیر انواع مختلف تاق‌ها و گنبد‌ها در معماری گذشته و نمونه‌های گنبدی با فناوری‌های جدید در معماری معاصر که همگی نشان از اهمیت این موضوع در گذشته و حال دارد.

در بررسی این پوسته‌های RSS طبیعی با تمرکز بر تخم‌پرنده‌ها که نمونه‌ای از الگوهای طبیعی دنیای اطراف ما است، پارامترهای مختلف بهیئنگی فرمی و ساختاری تخم‌پرنده‌ها گونه‌های مختلف مورد بررسی قرار داده شد. پارامترهایی نظیر اندازه دسته تخم‌پرنده، نحوه چرخش تخم‌پرنده، تعیین شاخص بال (HWD) و رابطه آن با تخم

پرنده، رابطه پرواز و درجه کشیدگی مخروطی و بیضوی تخم پرنده، و همچنین پارامتر ساختاری تخم پرنده و رابطه تعادل فشار بین محتویات تخم و مجرای عبور تخم پرنده مادر؛ نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهیمنگی تخم پرندگان بر پایه اشکال مختلف هندسی نظیر: کروی، بیضوی، تخم‌مرغی و مخروطی اجتناب‌ناپذیر است و طبیعت همه چیز را بهینه می‌کند و خداوند قادر و متعال الگوهای را تولید کرده است که خیلی پیشرفته‌تر و متنوع‌تر از آن چیزی است که انسان دارد؛ از طرفی مدل‌سازی پارامتریک پوسته تخم پرنده با استفاده از ابزارهای فناورانه کد نویسی در نرم‌افزار متلب نشان داد که می‌توان در میان این همه تنوع بهینه بی‌شمار طبیعی، بهینه‌ترین را انتخاب کرد؛ به‌طور نمونه می‌توان اظهار داشت که با افزایش ارتفاع تخم پرنده به بهیمنگی سطحی بیشتری در رابطه با حجم اشغال شده می‌توان دست یافت.

در جمع‌بندی نتایج به یکسری قواعد می‌رسیم، برخی از این قواعد و قوانین در معماری اجرا شده است و به بعضی از آنها هنوز توجه نشده است، درنهایت قوانینی که بایستی مورد توجه معماران واقع شود مطرح می‌شود که عبارت‌اند از: ۱- طراحی و اجرای پوسته‌های درجای متمرکز بر زمینه و بستر ۲- طراحی و اجرای پوسته‌های پیش‌ساخته متمرکز بر زمینه و بستر ۳- نقش فناوری‌های نوین در رسیدن به بهیمنگی حداکثری فرمی و ساختار پوسته‌های RSS در معماری. دو مورد اول شامل برقراری توازن بین معماری و محیط که هم برای خود اثر و هم برای زمینه عاملی مؤثر و تقویت‌کننده باشد، یعنی محیطی که علاوه بر برآوردن نیازهای فیزیکی، بتواند نیازهای روحی افراد را نیز فراهم کند. مورد سوم نیز به کاربرد ابزارهای فناورانه در پژوهش، تحقیق و ساخت معماری زیست‌الگو در جهت رسیدن به پوسته‌های RSS بهینه اشاره دارد. در نهایت با توجه به بررسی پوسته‌های RSS طبیعی به‌عنوان الگوهایی در طبیعت، شاید بتوان با قواعد و یافته‌های اخیر، به معماری‌ها و رویکردهای جدیدتری دست یافت.

## پی‌نوشت‌ها

1. Mario G. Salvadori
2. Rotational Symmetrical Synclastic
3. Developable shells
4. Synclastic shells
5. Anticlastic shells
6. Free Form shells
7. Extrusion Surface
8. Translational Surface
9. Rotational Surface
10. Ruled Surface
11. Antoni Gaud

۱۲. تاق = طاق = Vault، سقف منحنی، سقف قوسی شکل، انواع مختلف تاق‌ها از حرکت یا دوران قوس‌ها در فضا ایجاد می‌شوند و از ترکیب تاق‌های ساده انواع پیچیده‌تر تاق به وجود می‌آیند. بنابراین سطح برخی از تاق‌ها به‌عکس سطح گنبد در تئوری قابل‌گسترش است.

۱۳. گنبد به انگلیسی Dome و به ایتالیایی Cupola خوانده می‌شود.

14. Explicit Functions
15. Implicit Functions
16. Parametric Functions
17. The Museum of Vertebrate Zoology at Berkeley
18. Stoddard Lab. in Princeton University
19. Hawk-owl
20. Murre
21. Sandpiper

22. Maleo
23. Graceful prinia
24. Nishiyama
25. Circular
26. Elliptical
27. Oval
28. Pyriiform
29. Clutch
30. Hand Wing Index
31. Streamlined body plans
32. Ostrich
33. Kiwi
34. Mytiai, I.S
35. Matsyura, A.V.
36. Swiss Re
37. Reichstag Dome
38. Pre-fabricated Shell

## فهرست منابع

- پارسا، سروناز، و فخار تهرانی، فرهاد (۱۳۹۲). نگاهی بر هندسه نظری گنبد و طاق در معماری ایرانی. نخستین همایش فناوری و سازه‌های سنتی با محور گنبدها، تهران.
- پیرنیا، محمدکریم (۱۳۵۲). ارمان‌های ایران به جهان معماری گنبد. مجله هنر و مردم، ۱۳۶-۱۳۷، ۲-۷.
- تقی‌زاده، کتابیون (۱۳۸۵). آموزه‌هایی از سازه‌های طبیعی، درس‌هایی برای معماران. نشریه هنرهای زیبا، ۲۸، ۷۵-۸۴.
- تقی‌زاده، کتابیون، متینی، محمدرضا، و کاکوتی، الناز (۱۳۹۸). ساختارهای انعطاف‌پذیر؛ راهکاری در جهت کاهش معضلات عملکردی پوسته‌های متحرک. نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی، ۲۴ (۲)، ۴۸-۳۹.
- خبازی، زوبین (۱۳۹۱). پارادایم معماری الگوریتمیک، (چاپ اول). مشهد: کتابکده کسری.
- سالوادوری، ماریو (۱۳۷۴). سازه در معماری (مترجم: محمود گلابچی) (چاپ اول). تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- شاهرودی، عباسعلی، گلابچی، محمود، و اربابیان، همایون (۱۳۸۶). بهره‌گیری از طبیعت برای آموزش مؤثر درس ایستایی در رشته معماری در ایران، نشریه هنرهای زیبا، ۳۱ (۵)، ۴۷-۵۶.
- فرشاد، مهدی (۱۳۵۳). فرم‌های ساختمانی. (چاپ دوم). شیراز: انتشارات دانشگاه پهلوی.
- گلابچی، محمود و امیری، مجتبی (۱۳۹۵). عناصر سازه‌ای برای معماران. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- مدی، حسین و ایمانی، مرضیه (۱۳۹۷). فناوری بایومیمیک و الهام از طبیعت. نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری‌های نوین معماری و شهرسازی، ۸ (۱)، ۴۷-۵۵.
- معاریان، غلامحسین (۱۳۹۱). معماری ایرانی نیارش (تدوین: هادی صفایی‌پور) جلد اول و دوم. تهران: نغمه نواندیش.
- Baxter, A. (2011). *Natural Landscape Areas of London and their Natural Signatures*. London's Natural Signatures: The London Landscape Framework.
- Chilton, J. (1999). *Space Grid Structures*. New York: Routledge.
- Crespy, S. & You, J. (2017). Cracking the Mystery of Egg Shape. <https://vis.sciencemag.org/eggs>.
- Creswell, K.A.C. (1914). The History and Evolution of the Dome in Persia. *Journal of the Royal Asiatic society of the Great Britain and Ireland*, 46, 681- 701.
- Feizabadi, M., Bemanian, M., Golabchi, M., and Mirhosseini, S. M. (2013). Methods of Utilizing Natural Organisms in Technological Architecture. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13 (3), 379-389.
- Farshad, M. (1992). *Design and Analisis of Shell Structures (Solid Mechanics and Its Applications*

(16)). Netherlands : Springer.

- Ghyka, M. C. (1979). *Esthétique des proportions dans la nature et dans les arts*. Editorial Poseidon.
- Hartmann, E. (2003). *Geometry and Algorithms for Computer Aided Design*. Darmstadt : University of Technology Department of Mathematics.
- Hass, J.R., Heil, C.D. & Weir, M.D. (2017). *Thomas' Calculus*, 14<sup>th</sup> Edition, London : Pearson.
- Lampugnani, V. M. (1997). *20<sup>th</sup> Century Architecture*. New York : Thames and Hudson.
- Lan, Tien.T. (2005). *Space Frame Structures, Structural Engineering Handbook*, Ed. Chen Wai-Fah. Boca Raton : CRC Press LLC.
- Mansoori, M., Kalantar, N., Creasy, T., and Rybkowski, Z. (2019). Adaptive Wooden Architecture. Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior. In: Bianconi F., Filippucci M. (eds.) *Digital Wood Design. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 24. Springer, Cham.
- Melaragno, M. (1991). *An Introduction to Shell Structures: The Art and Science of Vaulting*. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Minke, G. (2006). *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Germany : Birkhäuser- Publisher for Architecture.
- Moore, F. (1998). *Understanding Structures*. United States : McGraw-Hill Education - Europe.
- Mytai, I. S., & Matsyura, A. V. (2019). Mathematical interpretation of artificial ovoids and avian egg shapes (part I). *Regulatory Mechanisms in Biosystems*.
- Nishiyama, Y. (2012). The Mathematics of Egg Shape. *BULGARIA, International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 78 (5), 679-689.
- Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., and Kilian, A. (2007). *Architectural Geometry*. USA, Pensilvania, Extone : Bentley Institute Press.
- Sourin, A., and Sourina, O. (2010). Towards Immersive Visualization of Mathematics. *scientific visualization*. <http://sv-journal.org/2010-2/01/>.
- Stoddard, M. C., Yong, E. H., Akkaynak, D., Sheard, C., Tobias, J., and Mahadevan, L. (2017). Avian egg shape : Form, function and evolution. *Science*, 6344, 1249-1254.
- **URL1** : <https://www.geogebra.org/m/wTh7KKd3> Date:31 Oct 2016
- **URL2** : <https://mvz.berkeley.edu/mvzegg/> Date:3 May 2021

#### COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



#### نحوه ارجاع به این مقاله

غلامزاده، احسان؛ متینی، محمدرضا؛ اسلامی، سیدیحیی و طلیسچی، غلامرضا (۱۴۰۲). پارامترهای بهینگی فرم و ساختار پوسته‌های سین کلاستیک متقارن دورانی (RSS) در طبیعت و معماری؛ بررسی موردی: پوسته تخم پرندگان. نشریه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۵(۳۹)، ۹۹-۱۲۱.



DOI: 10.30480/AUP.2022.3854.1835

URL: [http://aup.journal.art.ac.ir/article\\_1103.html](http://aup.journal.art.ac.ir/article_1103.html)

## Optimal Parameters of Form and Structure of Rotational Symmetrical Synclastic Shells (RSS) in Nature and Architecture Case Study: Bird Eggshell

**Ehsan Gholamzadeh**

Ph. D. of Architecture, Department of Architecture, Faculty of Engineering and Basic Sciences, Borujerd Branch Islamic Azad University, Borujerd, Iran

**MohammadReza Matini**

Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Tehran, Iran  
(Corresponding Author)

**Seyed Yahya Islami**

Assistant Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran

**GholamReza Talischi**

Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### Abstract

Natural forms and structures have always been a source of human inspiration for the creation of space. The present study focuses on one of the most important sources of inspiration from nature, namely Rotational Symmetrical Synclastic shells (RSS), and deals with the formal and structural optimality of these shells and their role in architecture. The methodology of this research is descriptive-analytical and simulation. It also uses primary sources and case studies in nature, such as bird eggs to analyse the form and structure of natural RSS shells, and to determine how to use their capacities in architecture. To this end, the article first addresses the typology of RSS shells. Then, the formal principles of RSS shells in nature are examined, which include various formal structures. Then, the typology of these shells in past and contemporary architecture is examined, including different types of arches and domes based on compressive or tensile behaviour. Another objective was to study the formal and structural optimality parameters in nature and architecture. It is very important for architects and designers in this field to have data control in order to achieve optimal and innovative forms and structures. Due to the variety of RSS shells, the focus of this research has been on spherical and parabolic examples. In the study of the "circular parabolic" shells, first, the required parameters were defined. The parametric definition of "spherical" and "circular parabolic" surfaces showed that the optimality of the shell surface can be achieved by adjusting parameters. In order to identify the optimality parameters of RSS shells in nature, bird eggs were examined as a case study. Various studies have shown that many parameters are effective in the optimal formation of bird eggs, such as: clutch size, roll factor, Hand Wing Index (HWI), degree of conical or elliptical egg elongation, and structure of the egg, among others. On the other hand, changing in numerical parameters also showed that by increasing the height of the egg, surface optimality in relation to volume can be increased. In examining such natural RSS shells, which are great examples of natural structures, we arrived at hidden rules and parameters. Some of these have been implemented in architecture, while others have not yet been considered. The ones that have generally been implemented are: achieving formal and structural optimality with maximum resistance in large openings, using the least materials and having minimum surface area, reducing resistance to lateral wind forces in minimal formal and structural contact, and having an optimal form in response to environmental and weather conditions. However, the findings show that there are other rules, which should also be considered by architects, such as design and implementation of context-sensitive in-situ shells and prefabricated shells focused on the specificities of each context, and utilizing new technologies to achieve maximum optimization of form and structure in RSS shell architecture. Thus, by examining natural RSS shells, it may be possible to achieve new and more efficient architectural ideas and design processes.

**Keywords:** RSS shells, form and structure, optimality, nature, architecture