فصلنامه معماری سبز
سال هشتم، شماره ۱ (پیاپی: ۲۸)، بهار ۱۴۰۱، جلد دو
ISSN:2476-5368

ساختارهای خمش فعال و انعطاف‌پذیر راهکاری برای طراحی در معماری متحرک

هاله حیدرآبادی[1*]، فرزین حق‌پرست[2]، فرهاد احمدنژاد[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۴
کد مقاله: ۶۲۵۴۱

چکیده

در سازه های باز و بسته شونده ی معمول، تغییر شکل براساس ریخت شناسی مفصل ها هستند، درحالی که در سازه های انعطاف پذیر درنتیجه تغییر شکل ارتجاعی عناصر می باشد. می توان از این ویژگی سازه های انعطاف پذیر و خمش فعال در ساختار های متحرک استفاده کرد. چنین انعطاف پذیری ذاتی که در سیستم های خمش فعال هست، مکانیسم مهمی برای کشف راه حل های جدید برای ساختارهای سازگار است. در این مقاله به معرفی مکانیزم های انعطاف پذیر به عنوان راهکاری برای معماری سبک و متحرک پرداخته شد. سپس در مورد انواع و ویژگی های ساختارهای انعطاف پذیر توضیح داده شد. دهه گذشته شاهد افزایش علاقه علمی و ساخت ساختارهای انعطاف پذیر و خمشی فعال بوده ایم. این امر منجر به ظهور چندین محیط نرم افزاری شده است که به سوالات مربوط به فرم یابی و ارزیابی ساختارهای خمشی فعال می پردازند، که به توضیح و مقایسه این روش ها پرداخته شد. به دلیل مزایای زیاد این ساختارها و پیشرفت تکنولوژی و ظهور محیط های شبیه سازی پیشرفته در آینده شاهد استفاده روز افزون این ساختار در معماری خواهیم بود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژگان کلیدی: مکانیزم های انعطاف پذیر، ساختارهای خمش فعال، فرم یابی، معماری متحرک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش معماری دیجیتال دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نویسنده مسئول)
h.heidarabadi@tabriziau.ac.ir
۲- استاد دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز (دانشیار)
۳- استاد دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز (استاد)

۱- مقدمه

رویکرد طراحی ساختمانی مبتنی بر انعطاف‌پذیری به جای اعضای سفت و اتصالات متحرک، هنوز خود را تثبیت نکرده است. از نظر صنعت ساختمان امروزی، زمین ناشناخته ای وجود دارد که در آن تجربه و تخصص کم است و الگوهای نقشی کمیاب هستند. با این حال، جالب توجه است که سازه های نرم و انعطاف پذیر در طبیعت بیداد می کنند و پتانسیل امیدوارکننده این اصل ساخت و ساز را نشان می دهند. تحولات اخیر فرصت های بیشتری را برای سیستم های خمشی برای کاوش در راه حل های معماری استاتیک و متحرک ارائه می دهند. می توان گفت در سازه های خمش فعال ارتباط ذاتی بین ویژگی های زیبایی ، سازگاری شکل و کارایی سازه وجود دارد. در اینجا، ویژگی بارز، استفاده از عناصر ساختاری با مقطع باریک است،که اجازه می دهد تا مواد را در زیر محدوده الاستیک خود در هنگام اعمال باری که باعث تغییر فرمش می شود نگه دارد. این شرایط نه تنها سیستم‌های خمش فعال را به یک ساختار بسیار سبک تبدیل می‌کند بلکه همچنین دلالت بر این دارد که در صورت حذف بار تغییر شکل دهنده، آن عناصر می توانند به اندازه اولیه خود و تنظیمات مسطح خود بازگردند. مکانیسم اساسی برای کنترل عملکرد ساختاری این سازه ها از طریق هندسه یا مجموعه هندسی مناسب است. با این حال ، پیش بینی چنین اشکال هندسی و آرایش های پیچیده از طریق مدل سازی هندسی خالص تقریباً غیرممکن است زیرا تعادل استاتیک ساختار بر روی حالت تغییر شکل یافته است. این شرایط لزوماً مستلزم استفاده از روش های آنالوگ و عددی یا ترکیبی از هر دو برای یافتن شکل هندسی مناسب است که اکثر اهداف اولیه طراحی از طریق تنظیمات محلی در نیروها ، شرایط مرزی و خواص مواد با توجه به روابط متقابل آن برآورده می شود(سزوکی و نیپر[1]، ۲۰۱۷). در ابتدا لازم به معرفی عناصر خمش فعال است ابتدا سعی در توضیح روند توسعه این سازه ها داریم ، تا با دیگر عناصری که دریک روندی به شکل خم درآمده و یا به شکل تاشده خم شده اند ، اما پس از یافتن این فرم هیچ تنشی در آنها ذخیره نمی گردد، قابل تشخیص و تمایز باشند. منظور از سازه های خمش فعال[2] آنهایی که از عناصر الاستیک تشکیل شده اند است . به طوری که با وارد شدن نیرو شکل منحنی به خود گرفته و با حذف نیرو به دلیل تنشی که در آنها ذخیره شده است، می توانند به فرم اولیه خود را به طور کامل یا نسبی بازگردند. شیوه تحقیق به صورت توصیفی و روش جمع آوری اطالعات کتابخانه ای میباشد. با هدف افزایش سطح آ گاهی طراحان و معماران در این زمینه است تا در صورت نیاز بتوانند از مزایای این مکانیزم در طراحی هایشان بهره گیرند.

۲- پیشینه تحقیق

روش های تجربی مختلفی از معماری بومی شناخته شده است که از رفتار کشسان مصالح ساختمانی محلی در ساخت و سازها استفاده کرده اند. در معماری قرن بیستم ام استفاده از تغییر شکل الاستیک عمدتاً به عنوان یک روش ساخت اقتصادی برای سازه های پوسته ای با دو انحنا مورد استفاده قرار می گرفت. به منظور تضمین ظرفیت تحمل بار در سازه ای که شامل تنش خمشی متعادل قابل ملاحظه ای است ، باید مصالح دارای کرنش شکست بالا انتخاب شود. مصالح ساختمانی سنتی از چوب نرم ، بامبو و نی چنین ویژگی هایی را ارائه می دهند که منجر به استفاده گسترده از خم شدن فعال در سازه های معماری بومی در فرهنگ ها و قاره ها مختلف شده بود(لینهارد و نیپر[3]، ۲۰۱۴). با توجه به این واقعیت که چنین سازه هایی عمدتاً در مناطقی یافت می شوند که چوب کمیاب است ، جایی که به وفور چوب نرم وجود دارد یا در فرهنگ هایی که هنوز مهارت پردازش قطعات بزرگتر چوب توسعه نیافته است ، نشانه هایی از مزیت سبک وزن بودن و استفاده اقتصادی از این سازه مشهود است (اولیور[4] ، ۲۰۰۷).

اصطلاح "خمش فعال" ابتدا توسط جان نیپر بیان شد (نیپرز، کرمرز[5] و همکاران ، ۲۰۱۲) که قبلا به عنوان ساختارهای انعطاف پذیر و الاستیک شناخته می شدند)، ساختارهای تیر و سطح منحنی را تعریف می کند که هندسه خود را از تغییر شکل الاستیک عناصر اولیه مستقیم یا مسطح بدست می آورند. یکی دیگر از تعریف‌های ساختارهای خمش فعال توسط لینهارد بیان شد (لینهارد و نیپر ، ۲۰۱۴)، به این صورت که طیف وسیعی از سیستم‌های سازه‌ای است که از تغییر شکل‌های بزرگ به‌عنوان یک استراتژی شکل‌دهی و خودپایداری استفاده می‌کنند. مهندسان از مکانیزم های انعطافپذیر چند دهه ای است که در علوم مختلفی چون رباتیک، مهندسی پزشکی، هواوفضا و ... استفاده میکنند، ولی درمعماری بکارگیری این مکانیزم ها ، به چند سال اخیر باز میگردد و زمان بیشتری برای کاربردی شدن آن به صورت گسترده در صنعت ساختمان سازی لازم است(کتایون تقی زاده و

1 Suzuki and Knippers
2 Bending active
3 Lienhard and Knippers
4 Oliver
5 Cremers

همکاران ، ۲۰۱۹). بسیاری از معماران و طراحان، با مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر (عملکرد، کاربرد و مزایای آن‌ها) آشنا نیستند. در حقیقت منابع طبقه بندی شده کمی از این نوع مکانیزم ها وجود دارد که در شناخت این ساختار ها کمک کند.

شکل ۱– خلاصه ای از روند توسعه سازه های خمش فعال و معرفی افراد تاثیر گذار در گسترش دوباره این سازه ها (مأخذ: جمع آوری نگارنده)

از جمله ویزگی های سازه های خمش فعال می توان به این موارد اشاره کرد:

ویژگی کلیدی سازه های خمش فعال پتانسیل آنها در یکپارچه سازی و همگنی است، سختی عنصر به گونه ای انتخاب میشود که تنش خمشی ناشی از آن هرگز به حد الاستیک نرسد. سازه نامشخص با تنش خمشی باقی مانده است. فایده اصلی خمش فعال در سادگی تولید عناصر پیچیده منحنی است.کاهش تعداد اعضای سازه ، کاهش وزن سازه،کاهش چشمگیر تنش در مفاصل ، دقت و تکرارپذیری بالا ، هزینه تعمیر و نگهداری و درنهایت توجیه اقتصادی طرح است پیشرفت های اخیر در فنون شبیه سازی ، فرم یابی و آنالیز ، ساختارهایی را که هندسه منحنی پیچیده شان صرفا از فرایند برپایی آنها نشات میگیرد و در این فرایند دچار تغییر شکل الاستیک می شوند را امکان پذیر ساخته است(متینی ۲۰۱۵).

شکل ۲– مقیاس مدل نمونه اولیه غرفه با سیستم سازه خمش فعال (مأخذ: ورکشاپ 3B Option Studio – پارامتری فضا و سیستم های مواد)

شکل ۳– مطالعات مدل فیزیکی توسط دانشجویان دانشگاه اشتوتگارت در کارگاه ها و کلاس های مختلف مأخذ: (لینهارد و نیپر ، ۲۰۱۴)

۳- طبقه بندی

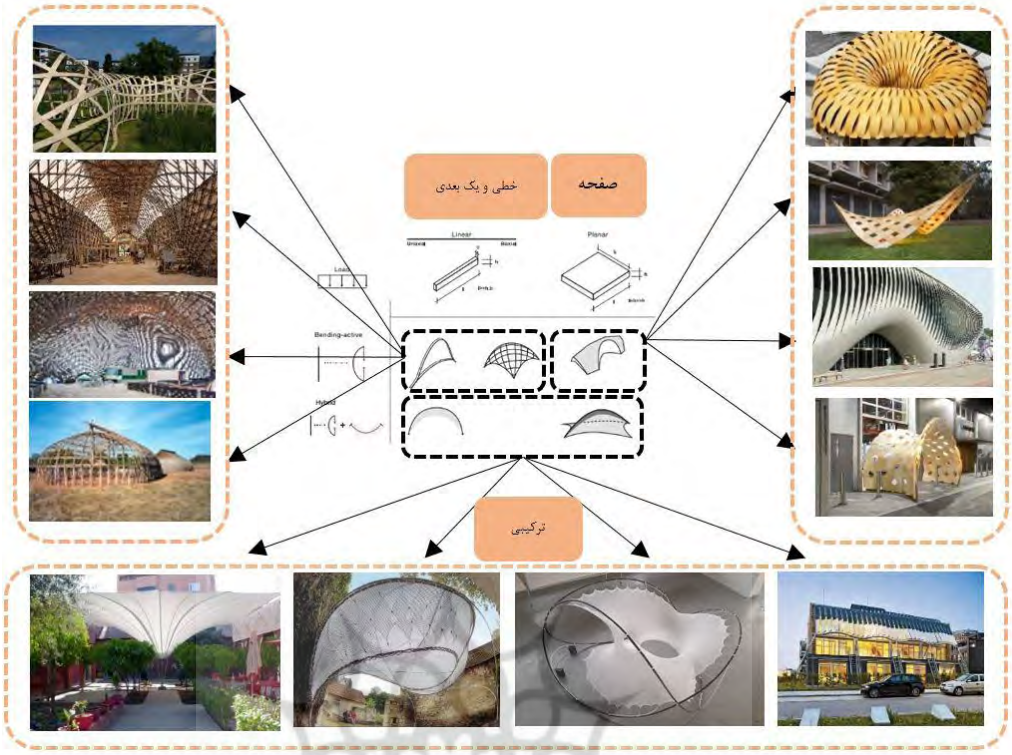
ساختارهای خمشی فعال را می توان بر اساس اصول متفاوت طبقه بندی کرد: ۱)براساس ابعاد هندسی ۲) براساس نوع عناصر ساختاری ۳) طبقه بندی سازه های خمش فعال براساس تپولوژی[1] (شکل ۴) .

شکل ٤– طبقه بندی سازه خمش فعال (مأخذ: جمع آوری نگارنده)

۱. یک روش برای طبقه بندی ساختارهای خمش فعال، که می توان آن را به دو دسته اصلی تقسیم کرد مربوط به ابعاد هندسی عناصر سازنده آنها است. به عنوان مثال ، سیستم های یک بعدی[2] می توانند با میله های باریک و سیستم های دو بعدی[3] از صفحات نازک ساخته شوند(نیپرز، کرمرز و همکاران ، ۲۰۱۲).

۲. یکی از معیار طبقه بندی به نوع عناصر ساختاری مورد استفاده اشاره دارد. سیستم های خمشی خالص منحصراً عناصر انعطاف پذیری را به کار می گیرند که می توانند قبل از رسیدن به پیکربندی نهایی ، در برابر تغییر شکل های بزرگ مقاومت کنند. چنین عناصری دارای سختی خمشی متوسط تا کم هستند تا بتوانند روند تغییر شکل را انجام دهند. در راستای این تمایز ، دیگر گونه شناسی که می توان در خانواده ساختار خمشی قرار داد ، ساختارهای به اصطلاح ترکیبی[4] هستند. برخلاف خمش خالص ، سازه های ترکیبی ویژگی های ساختاری عناصر خمشی را با اثرات تثبیت کننده عناصر غشایی مهارکننده ترکیب می کنند. ایده ساختارهای ترکیبی به دوران باستان باز می گردد و در نمونه های اولیه و ساختارهای تحقیقاتی مورد توجه و کاربرد روزافزونی قرار گرفته است(لا مگنا[5]، ۲۰۱۷).

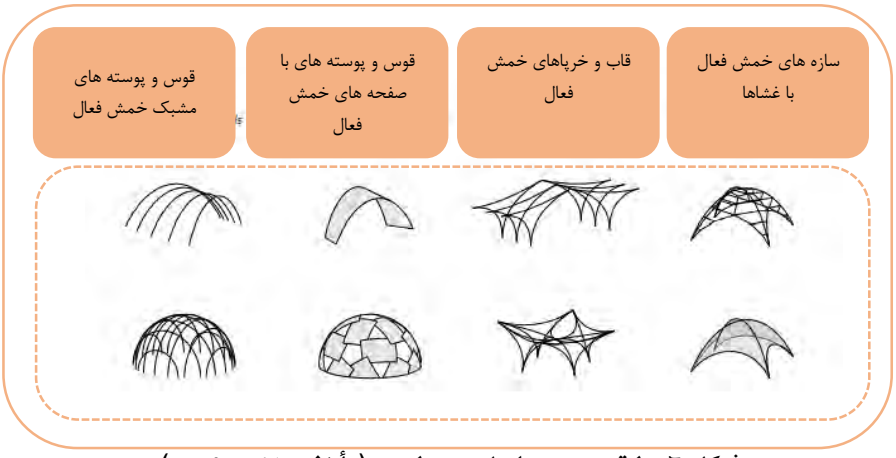
1 Topology
2 1D
3 2D
4 Hybrid
5 La Magna



شکل ۵– تفکیک سازه های خمش فعال براساس ۱- یک بعدی ۲- دوبعدی ۳- ترکیبی همران نمونه های ساخته شده (مأخذ: جمع آوری نگارنده)

۳. یکی دیگر از طبقه بندی های سازه های خمش فعال براساس توپولوژی می باشد، به این صورت که خمش فعال به خودی خود به نوع خاصی از سازه ها اشاره نمی کند و گونه های مختلفی را می توان در بین سازه های خمشی فعال تشخیص داد (شکل ۶). بیشتر سازه‌های خمشی فعال ساخته شده متعلق به گونه‌شناسی سازه‌ای کلاسیک شناخته شده مانند قوس‌ها، پوسته‌های شبکه‌ای یا خرپاها هستند. خمش فعال در واقع ثابت کرده است که روشی کارآمد برای ساخت چنین گونه‌شناسی‌هایی است، به ویژه با مزایایی در فرآیند ساخت و ساز و استفاده کارآمد از مواد (بولیک[1]، ۲۰۱۹) . سازه های قوسی ساده ترین کاربرد خمش فعال به عنوان یک اصل ساخت و ساز هستند و پشت بسیاری از سازه های بومی در سراسر جهان قرار دارند (کاتالدی[2] ، ۱۹۹۷).انتخاب عناصر تغییر شکل الاستیک برای ساخت و ساز عمدتاً به دلایل اقتصادی و محدودیت های تولیدی انجام می شود. تکنیک‌های سنتی برای ساخت کلبه‌ها و پناهگاه‌های موقت و متحرک عموماً از ساقه‌های طبیعی (شاخه‌ها، ساقه‌های بامبو، دسته‌های چمن) استفاده می‌کنند که برای ساخت طاق‌ها و همچنین سازه‌های پوسته شبکه‌ای به شکل گنبدی خم می‌شوند(کاتالدی ، ۱۹۹۷).

1 Boulic
2 Cataldi



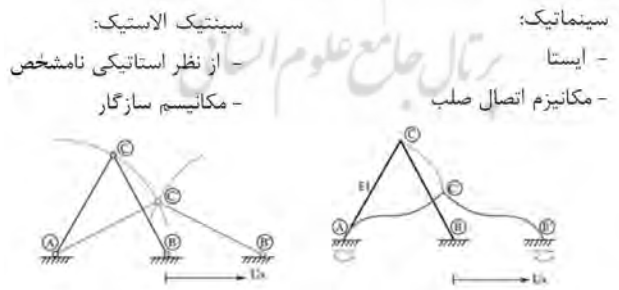
شکل ٦- طبقه بندی براساس تپولوژی (مأخذ: بولیک ، ۲۰۱۹)

۴- سینتیک الاستیک[1]

مقوله ساختارهای الاستیک- متحرک با در نظر گرفتن این که فرآیند تغییر شکل نیز می تواند برگشت پذیر باشد، این رویکرد را یک گام جلوتر می برد و بنابراین امکان ایجاد سیستم های تطبیقی و مکانیسم های سازگار را فراهم می کند(لینهارد، پوپینگا[2] و همکاران، ۲۰۱۰). معماری به عنوان حوضه ای میان رشته ای از علوم دیگر از جمله علم مکانیک بسیار بهره می برد. امروزه در معماری به لطف پیشرفت علم مکانیک ایجاد حرکت و سازگاری با محیط اطراف در عناصر معماری کاردشواری نیست. که علاوه بر زیبایی ، در کاهش مصرف انرژی و به حداقل رسیدن استفاده از منابع در حوزه ساخت و ساز نقش بسزایی دارد.در (جدول۱) به تعریف اصطلاحات مکانیکی پرداختیم و سعی در شفاف سازی طبقه بندی ساختارهای الاستیک در حوزه حرکت داریم.

جدول ۱- نمونه جدول (مأخذ: موسسه شباک، ۱۳۹۹: ۱۰)

نام	توضیح
استاتیک[3]	مطالعه نیروها بر روی یک جسم صلب ثابت به طور کلی توسط میدان استاتیک محدود می شود.
دینامیک[4]	دینامیک نیروهای وارد بر جسم صلب را در حال حرکت توصیف می کند
کینتیک[5]	در حالی که سینماتیک در نظر گرفتن حرکت بدون علل آن و سینتیک مطالعه حرکت شامل جرم و نیروها است.
سینتیک الاستیک	اگر یک سیستم به عنوان علت حرکت خود دچار تغییر شکل الاستیک شود، نمی توان آن را با سینماتیک توصیف کرد، زیرا حرکت و تغییر شکل به خواص مکانیکی سیستم و نیروهای ایجاد کننده حرکت وابسته هستند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که سیستمی که نیروی ورودی یا جابجایی را از طریق تغییر شکل بدنه الاستیک به نقطه دیگری منتقل می‌کند، در دسته سینتیک یا به طور دقیق‌تر: سینتیک الاستیک قرار می‌گیرد.



شکل ۷- (چپ) تغییر شکل مکانیزم صلب سینماتیکی. (راست)تغییر شکل مکانیسم سازگار (مأخذ: لینهارد و نیپر ، ۲۰۱٤)

1 Elastic Kinetics
2 Poppinga
3 statics
4 Dynamics
5 Kinematics

در مهندسی مکانیک، چنین سیستم هایی مکانیزم سازگار[1] نامیده می شوند. یک مکانیسم سازگار همچنین حرکت، نیرو یا انرژی را منتقل یا تغییر می دهد. با این حال، برخلاف مکانیسم‌های پیوند صلب، مکانیسم‌های سازگار حداقل بخشی از تحرک خود را از انحراف اعضای انعطاف‌پذیر به‌جای اتصالات متحرک به دست می‌آورند. مکانیسم های سازگار همیشه از نظر استاتیک نامشخص هستند . در نتیجه، ممکن است در نظر بگیریم که سینتیک الاستیک و مکانیسم‌های سازگار ساختارهای خمشی فعال هستند که امکان برگشت‌پذیر را فراهم می‌کنند (لینهارد و نیپر ، ۲۰۱۴).

۴-۱- انواع استفاده از مکانیزم انعطاف پذیر در معماری متحرک

استفاده از مکانیزم های انعطاف پذیر در معماری متحرک و سازگار در دو بخش مورد استفاده و ببرسی قرار میگیرند. ۱)مفصل‌های انعطاف پذیر ۲) بکارگیری المان های انعطاف پذیر در کل ساختار معماری. در حالی که سازه های باز و بسته شونده معمول، تغییر شکل خود را وامدار ریخت شناسی مفصل‌ها هستند، سازه های انعطاف پذیر بر تغییرشکل ارتجاعی عناصر استوارند.

شکل ۸- انواع استفاده از مکانیزم‌های انعطاف پذیر در معماری (مأخذ: (کتایون تقی زاده و همکاران ، ۲۰۱۹))

این روش محدودیت هایی نیز دارد که نمی توان این جایگزینی را در تمامی شرایط انجام داد. به عنوان نمونه در اغلب مواقع مکانیزم های انعطافپذیر، بازه حرکتی محدودتری نسبت به مکانیزم های صلب-پیکر دارند و طراحی آنها دشواری های بیشتری را به دنبال خواهد داشت. به نظر می رسد، بیشتر ساختارهای متحرک با ابعاد محدود و مقیاس کوچک، در گسترش این سطح از مکانیزم های انعطاف پذیر قرار می‌گیرند(کتایون تقی زاده و همکاران ، ۲۰۱۹).

۴-۲- ویژگی مواد و مصالح یک ساختار متحرک الاستیک

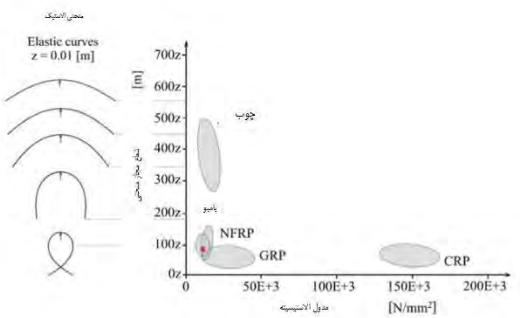
وجود موادی با کرنش شکستگی بالا [2]پیش شرط کار با سازه های خمش فعال است. در مورد سازه های فعال خمشی ، استفاده از مواد با چگالی کم با نسبت استحکام بالا و سختی خمشی کم مورد نیاز است. سیستم خمش فعال باید به گونه ای طراحی شود که تنش پسماند[3] هرگز به تنش حد الاستیک مواد استفاده شده نرسد، از این رو، قانون هوک[4] برای مواد الاستیک خطی همیشه می‌تواند اعمال شود.

$\sigma^{5}=E\varepsilon$

- مواد کافی برای سازه های خمش فعال نسبت $\sigma/\varepsilon > 2{,}5$ ارائه می دهند.
- برای سیستم های کنیتیک الاستیک، الزامات اضافی برای کنترل خستگی بیشتر، تنش الاستیک دائمی مجاز را محدود می‌کند. بنابراین، نسبت‌های $\sigma/\varepsilon<10$ مورد نیاز است. الزامات اساسی تعیین شده برای کینتیک الاستیک فقط توسط FRP ها[6] و جالب اینکه بامبو برآورده می شود.
- برای سازه‌های فعال خمشی، مهم‌ترین متغیرهایی که باید درنظر گرفت، مدول یانگ[7] E و تنش خمشی مجازاست.

1 compliant mechanisms
2 high breaking strain
3 Residual stress
4 Hooke's law
5 Flexural Strength
6 Fibre-reinforced plastic
7 Youngs Modulus

کل ۹- نمودار اشبی با مقایسه مصالح مناسب و نامناسب سازه های خمشی فعال (مأخذ: لینهارد و نیپر، ۲۰۱٤)

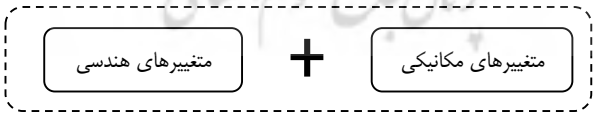


شکل ۱۰- خواص مواد برای سازه خمش فعال (مأخذ: گنگناگل، هرناندز و همکاران ، ۲۰۱۳)

۵- استراتژی های طراحی و فرم یابی[1]

فرم یابی به طور کلی به عنوان فرآیند توسعه فرم هندسی یک سازه بر اساس رفتار مکانیکی درک می شود. بر خلاف یک فرآیند طراحی رایج، فرم یابی یک فرآیند قطعی است که در آن تنظیم شرایط مرزی فیزیکی به یک راه حل منتهی می شود. از نقطه نظر کاملاً مکانیکی، فرم یابی را می توان به عنوان یک فرآیند بهینه سازی تعریف کرد که در آن یک میدان تنش هدف داده می شود و فرم هندسی مربوطه جستجو می شود. بنابراین در مهندسی سازه، اصطلاح فرم‌یابی بیشتر به سازه‌های غشایی کششی و همچنین قوس‌های زنجیره‌ای و پوسته‌ها مرتبط است، که در آنها فرم‌یابی به‌طور خودکار شامل بهینه‌سازی فرم براساس رفتار سازه‌ای می‌شود. هندسه سازه های فعال خمشی باید به طور مشابه بر اساس رفتار مکانیکی شکل بگیرد. با این حال، تنش‌ها متعلق به نتیجه هستند و بنابراین «فرم‌یابی» به‌طور خودکار جنبه بهینه‌سازی ساختاری را شامل نمی‌شود. فراتر از تعریف محدودیت‌های مرزی، فرم‌یابی سازه‌های خمش فعال شامل تنظیم متغیرهای بیشتری است که شامل تنظیم طول و خواص مکانیکی عناصر خمش فعال و معرفی کوپلینگ‌ها و محدودیت‌های داخلی مختلف می‌شود. با این حال، علیرغم داشتن متغیرهای بیشتر از شرایط مرزی فیزیکی، هنوز یک فرآیند قطعی است که به طور عینی مبتنی بر رفتار مکانیکی است، و بنابراین به طور کلی به عنوان "فرم یابی" نامیده می شود (لینهارد و نیپر ، ۲۰۱۴).

سازه های فعال خمشی متغیرهای بسیار بیشتری را ارائه می دهند که بر نتیجه فرم یابی تأثیر می گذارد. فرآیند طراحی سازه‌های خمش فعال را می‌توان هم‌ترازی متغیرهای مکانیکی و هندسی خلاصه کرد. جدول زیر متغیرهای طراحی تأثیر گذار را در مقایسه با ساختارهای فرم فعال نشان می دهد:



شکل ۱۱- متغییرهای مهم در سازه های خمش فعال (مأخذ: نگارنده)

1 Form finding

جدول ۱۲- مقاسیه متغییر های ورودی و خروجی هندسی و مکانیکی در دو سازه خمش فعال و فرم فعال (مأخذ: لینهارد و نیپر ، ۲۰۱٤)

متغییرها	خمش فعال	فرم فعال
هندسه		
≠ نقاط مرزی و لبه ها	ورودی	ورودی
≠ طول و ابعاد صفحه	ورودی	خروجی
≠ ابعاد مقطع	ورودی	در نظر گرفته نمی شود
≠ انحنای صفحه یا المان	خروجی	خروجی
مکانیکی		
≠ سختی مواد و مصالح	ورودی	در نظر گرفته نمی شود
≠ تنش	خروجی	ورودی

دوبرابر شدن مقدار متغیرهای ورودی در فرآیند فرم یابی سازه های فعال خمشی، در مقابل سازه های فرم فعال، فضایی را برای اعمال تأثیرات معماری باز می‌کند و در نتیجه فرآیند کلی طراحی را به طرز محسوسی پیچیده می‌کند. به دلیل این ترکیب منحصر به فرد آزادی و پیچیدگی، مشخص شد که یک تکنیک شبیه‌سازی محاسباتی به تنهایی ابزار لازم برای توسعه ساختارهای خمشی فعال را ارائه نمی‌دهد. ترکیب و ادغام تکنیک های مختلف مدل سازی در فرآیند طراحی برای توسعه موفقیت آمیز سازه های پیچیده خمش فعال ضروری است، که شامل مدل سازی فیزیکی، مبتنی بر رفتار، محاسباتی و مبتنی بر المان محدود است (لینهارد و نیپر ، ۲۰۱۴).

۵-۱- روش‌ها و نرم افزار های فرم یابی

بر اساس انتخاب مواد ارائه شده در بالا ، تنوع و ترکیب زیادی از سیستم های ساختاری را می توان با تغییر شکل الاستیک ایجاد کرد. با در نظر گرفتن پتانسیل یک رفتار مادی خاص، ساختارهای خمش فعال به جای یک گونه سازه ای متمایز ، یک رویکرد هستند. می توان گفت وجه اشتراک این ساختارها تحمل بار محدود یا تعریف هندسی نیست، بلکه یک فرایند شکل گیری است که طی آن به صورت الاستیک خم می شوند. در نتیجه ، تمایز بیشتر ساختارهای خمشی فعال بر اساس رویکردهای طراحی آنها پیشنهاد می شود. رویکرد های طراحی شامل: ۱- مبتنی بر رفتار[1] ۲- مبتنی بر هندسه[2] ۳- ترکیبی [3] می شوند.

همانطور که گفتیم در فرم یابی سازه های خمش فعال از ابعاد عناصر و خواص مواد به عنوان ورودی برای توصیف رفتار عنصر در طول خمش الاستیک استفاده می‌کند. تلاش‌های زیادی برای استفاده از انواع مدل‌های عددی در مراحل مختلف مورد نیاز در طراحی سیستم‌های ترکیبی خمشی فعال و غشاها انجام شده است. در این قسمت به طور خلاصه سه رویکرد عددی مختلف را توضیح می‌دهد که می‌توانند در فرم یابی سیستم‌های خمشی فعال استفاده شوند. اگرچه همه این روش‌ها از عناصر کابل انقباضی برای شبیه‌سازی خمش استفاده می‌کنند، اما روش‌های محاسبه آنها و در نتیجه نرم‌افزار مورد استفاده متفاوت است. روش اول اجزای محدود (FEM)[4]، روش دوم با استفاده از آنالیز هم هندسی (IGA)[5] و روش سوم مبتنی بر سیستم فنر ذرات با آرامش دینامیکی(DR)[6] است. همه این روش‌ها از نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی راینو[7]به عنوان محیط مدل‌سازی اولیه استفاده می‌کنند که گاهی اوقات با پلاگین گرس هاپر [8]برای ورودی پارامتریک ترکیب می‌شود.

1 behaviour based approach
2 geometry based approach
3 integral approach
4 Finite element method
5 Isogeometric Analysis
6 Dynamic relaxation
7 Rhino
8 Grasshopper

شکل ٤– جمع بندی رویکردها و روش های فرم یابی سازه های خمش فعال (مأخذ: جمع اوری نگارنده)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۲- مجموعه نرم افزارهایی که در فرم یابی سازه های خمش فعال می توان استفاده کرد (مأخذ: جمع آوری نگارنده)

نام نرم افزار	روش	توضیحات
کانگرو	(DR)	افزونه کانگرو[1] یک ابزار فیزیکی پویا برای شبیه سازی تعاملی، فرم یابی، بهینه سازی و حل مسئله با توجه به قیود و محدودیت های تعریف شده در محیط راینو و گرس هاپرمی باشد. این پلاگین شامل یک کتابخانه بهینه ساز و گروهی از کامپوننت ها برای گرس هاپر می‌باشد.
کیوی تریدی[7]	(IGA)	یک پلاگین جدید برای گرس هاپر، مبتنی بر تجزیه و تحلیل ایزوژئومتریک (IGA) است که توسط هیوز و همکاران معرفی شده است(هیوز، کوترل[2] و همکاران، ۲۰۰۵). IGA زیرگروه روشهای اجزای محدود است. ویژگی خاص آن در استفاده از بی اس پی لاین[3] منطقی غیر یکنواخت (نربز[4]) به عنوان توابع پایه برای عناصر محدود است که معمولاً برای توصیف هندسه درکد[5] استفاده می شود(بائر، لنگست[6] و همکاران، ۲۰۱۸).
سافیستیک	(FEM)	نرم افزار تجاری سافیستیک[8] یک برنامه مبتنی بر اجزای محدود است که تمرکز زیادی روی کاربردهای ساختاری دارد. علاوه بر ماژول های تجزیه و تحلیل استاتیک خطی ، سافیستیک همچنین از طرح های حل هندسی غیر خطی برای شبیه سازی انحراف های بزرگ استفاده می‌کند(بائر، لنگست و همکاران، ۲۰۱۸).

۶- نتیجه‌گیری

مکانیزم های خمش فعال با استفاده از خصوصیت ذاتیشان، در کشورهای صنعتی و توسعه یافته نمونه های بیشماری ساخته شده است. استفاده از سازه خمش فعال در زمینه های مختلف مهندسی استفاده می شود ولی در معماری به چندسال اخیر خلاصه می شود. در این مقاله، استفاده از ساختارهای انعطاف پذیر و خمش فعال را به عنوان راهکاری برای ایجاد حرکت با هدف آشنایی معماران و طراحان با عملکردو کاربرد آنها، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا به بحث در مورد ساختار خمش فعال و انواع ان پرداخته شد ، این بخش در سه سطح ۱)براساس ابعاد هندسی ۲) براساس نوع عناصر ساختاری ۳) طبقه بندی سازه های خمش فعال براساس تپولوژی بررسی شد . در هر سطح با تفکیک و ارایه نمونه های ساخته شده سعی در درک ساده این ساختار های جدید داشتیم. سپس حوزه استفاده از سازه خمش فعال همانطور که توضیح دادیم در دو صورت در معماری متحرک استفاده می شود ۱)مفصل های انعطاف پذیر ۲) استفاده در کل اعضا مورد ملاحظه قرار گرفت. دهه گذشته شاهد افزایش علاقه علمی و ساخت سازه های ترکیبی خمشی فعال بوده ایم. این امر منجر به ظهور چندین محیط نرم افزاری شده است که به سوالات مربوط به فرم یابی و ارزیابی ساختارهای خمشی فعال می پردازند. باتوجه به عملکرد سازه های خمش فعال از مزایای این سازه به یکپارچگی طرح، کاهش تعداد اعضا و وزن سازه، کاهش چشمگیر تنش در مفاصل و هزینه تعمیر و نگاهداری کمتر اشاره کرد.

منابع

۱. تقی زاده, کتایون, متینی, کاکوئی ,الناز (۲۰۱۹). "ساختارهای انعطاف‌پذیر؛ راهکاری در جهت کاهش معضلات عملکردی پوسته‌های متحرک" نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی ۲۴(۲): ۳۹-۴۸.

۲. متینی (۲۰۱۵). "بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای طراحی ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری" نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی ۲۰(۱): ۶۷-۸۰.

3. Bauer, A. M., P. Längst, R. La Magna, J. Lienhard, D. Piker, G. Quinn, C. Gengnagel and K.-U. Bletzinger (2018). Exploring software approaches for the design and simulation of bending active systems. Proceedings of IASS Annual Symposia, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

4. Boulic, L. (2019). Form-Driven Design of Bending-Active Tensile Structures in Architecture, ETH Zurich.

1 Kangaroo
2 Hughes, Cottrell
3 B-Splines
4 NURBS
5 CAD
6 Bauer, Längst
7 Kiwi3d
8 SOFiSTiK

5. Cataldi, G. (1997). " Structural Types, in P. Oliver (ed.), Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World." Theories and Principles, Cambridge University Press, pp. 644–654.**, Volume 1 -**.
6. Gengnagel, C., E. Hernández and R. Bäumer (2013). "Natural-fibre-reinforced plastics in actively bent structures." Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials **166**: 365-377.
7. Hughes, T. J., J. A. Cottrell and Y. Bazilevs (2005). "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement." Computer methods in applied mechanics and engineering **194**(39-41): 4135-4195.
8. Knippers, J., J. Cremers, M. Gabler and J. Lienhard (2012). Part A. Polymers and membranes in architecture. Construction Manual for Polymers+ Membranes, Birkhäuser**:** 8-27.
9. La Magna, R. (2017). Bending-active plates: strategies for the induction of curvature through the means of elastic bending of plate-based structures, Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen ….
10. Lienhard, J. and J. Knippers (2014). "Bending-active structures." Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, Forschungsbericht **36**.
11. Lienhard, J., S. Poppinga, S. Schleicher, T. Speck and J. Knippers (2010). "Elastic architecture: nature inspired pliable structures." Design and Nature V: 469-477.
12. Matini, M.-R. (2007). Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien.
13. Oliver, P. (2007). Built to meet needs: Cultural issues in vernacular architecture, Routledge.
14. Suzuki, S. and J. Knippers (2017). "Topology-driven Form-finding-Implementation of an Evolving Network Model for Extending Design Spaces in Dynamic Relaxation."

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی