

## بهینه‌سازی فرم ستون‌های خرپایی با الهام از ساختار مارپیچ در استخوان

### Form Optimization of Truss Columns with Inspiration from the Helix Bone Structure

زهرا ثابت‌قدم<sup>۱</sup>، بابک عالمی<sup>۲</sup>، امیرحسین صادقپور<sup>۳</sup> (تویینده مسئول)، علیرضا پاچناری<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

#### چکیده

طراحی فرم با عملکرد سازه‌ای بهینه همواره توجه تعداد زیادی از متخصصین را به خود جلب کرده است؛ در این زمینه، علم بایونیک (bionic) نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در موجودات زنده، استخوان‌ها، عناصر سازه‌ای اصلی بدن هستند که به نسبت وزن خود نیروی زیادی را تحمل می‌کنند. این عناصر که دارای ساختار مارپیچ هستند، در این تحقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند؛ در این مقاله، تلاش شده تا مکانیزم انتقال نیرو در آن‌ها شناسایی گردد؛ سپس با کاربست اصول سازه‌ای موجود در آن، مجموعه‌ای از ستون‌های مارپیچ با زوایای چرخش مختلف، طراحی شده است. در ادامه مقاله، با استفاده از مدل‌سازی و بارگذاری ستون‌ها و تحلیل یافته‌ها توسط نرم‌افزار SAP2000، به روش شبیه‌سازی، به تجزیه و تحلیل فرم‌های مختلف پرداخته شده است. بر پایه‌ی یافته‌های این پژوهش، ساختار مارپیچ برای یک ستون، به‌ازای زوایای چرخش مشخص، در کنار رفع الزامات سازه‌ای، وزن کمتری نسبت به خرپایی متعارف داشته، مصالح کمتری در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و از این رو ضمن برآورده کردن اقتضای اقتصادی می‌تواند منجر به فرمی بهینه شود؛ این فرم می‌تواند در ایجاد یک فضای معماري همچون نظرگاه مورد استفاده واقع شود.

#### واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی سازه‌ای، دانش بایونیک، ساختار استخوان، ستون خرپایی، فرم سازه‌ای مارپیچ

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری معماری بایونیک، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. e.sabetqadam@gmail.com

۲. استادیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. alemi@kashanu.ac.ir

۳. استادیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. sadeghpour@kashanu.ac.ir

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. pachenaria@kashanu.ac.ir

آبالون، چوب، لانه‌ی موریانه، استخوان، نوک پرنده‌گان، دندان و ... جستجو شدند؛ در این میان استخوان از نظر فرمی به ستون شبیه‌تر است. بنابراین، ساختار استخوان به عنوان الگو انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت.

۳. تعریف راه حل بیولوژیک: سپس به جستجوی دلایل شکل‌گیری مقاومت بالای استخوان پرداخته شد. در این مرحله می‌توان از ساختار (فرم استخوان در مقیاس میکرو) یا مصالح استخوان الهام گرفت؛ در این میان، به دلیل آن که فرم در ارتباط مستقیم با معماری است، فرم و ساختار استخوان مورد بررسی قرار گرفت.

۴. استخراج اصول: این مرحله، شامل بررسی اصول انتقال نیرو در ساختار استخوان است؛ این کار با شبیه‌سازی و مدل‌سازی ساختار آن در نرم افزار SAP2000 و تحلیل انتقال نیروها افقی و عمودی انجام شده است.

کاربست اصول: اصول به کار رفته در ساختار استخوان در طراحی جزء اصلی یک فضای معماری (نظرگاه) به کار گرفته شد. برای ارزیابی صحت نتیجه، بررسی‌هایی به‌های مقادیر مختلف بارهای ثقلی و جانبی انجام گرفت و در نهایت، ستون مارپیچ<sup>۱</sup> به عنوان جزء اصلی منظرگاه، پیشنهاد و نحوه تأثیر این فرم بر فضای معماری بیان شد.

## ۲- پیشینه‌ی پژوهش

همانطوری که بیان شد این پژوهش بدنیال بهینه‌سازی سازه ستون خرپایی با استفاده از فرم مارپیچ است. تاکنون سازه‌های زیادی به فرم مارپیچ ساخته شده که به جهت نزدیکی به موضوع پژوهش، سازه‌های مارپیچی با عملکردی مشابه ستون، بررسی شده‌اند. برج گران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۳، در لندن (تصویر ۱) توسط نورمن فاستر طراحی شد و سازه‌ی اصلی آن خطوط مارپیچ‌شکل نمای ساختمان است (Silver ۱۶۶: 2008). این خطوط، از پایین به بالا، در جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد چرخیده‌اند (دیاگرید<sup>۳</sup>)، چون اعضا سازه‌ای مورب هستند، نیروی افقی، بهتر به زمین منتقل می‌شود (سبت به سازه‌هایی که اعضای اصلی شان خطوط عمودی و افقی هست). مزیت دیگر مارپیچ بودن اعضا سازه‌ای، انتقال یکنواخت‌تر نیروی افقی به زمین است. انتقال مناسب نیروهای سازه‌ای توسط فرم سازه‌ای دیاگرید، باعث شده است تا این سازه در دهه ۱۹۸۰ به عنوان سازه‌ی بهینه گسترش یابد (Braoke, 2014).

نمونه‌ی دیگر از سازه‌های مشابه مارپیچ، ستون‌های هایپار<sup>۴</sup> یا زین اسبی هستند که عناصر سازه‌ای در آن‌ها چرخش دارند. فرم زین اسپی<sup>۵</sup> به فرمی گفته می‌شود که در یک جهت انحنای محدب و در جهت عمود بر آن جهت

## ۱- مقدمه

سازه یکی از وجوده مهم معماری و از عوامل شکل‌گیری فرم است و از آنچاکه باعث دوام و ایستایی فرم می‌شود، در پیدایش آن اهمیتی کلیدی دارد. این نکته نه تنها فرم مصنوع و دست‌ساخته‌های بشر را دربرمی‌گیرد بلکه فرم طبیعی را شامل می‌شود؛ زیرا فرم‌های طبیعی الگوی پیدایش ایده‌های ساختمانی بوده و فرم‌های ساختمانی همواره تقليدی ناقص از الگوهای طبیعی خود هستند. ساختار و سیستم‌های سازه‌ای که سبب پایداری فرم‌ها هستند، به شکل‌های مختلف در فرم‌ها بروز یافته‌اند و به روش‌های مختلف با هم ارتباط دارند (مک دونالد، ۱۳۸۹). نحوه ارتباط فرم سازه‌ای با معماری، منجر به برتری یک فرم به فرم دیگر می‌شود تا جایی که فرم بهینه شکل می‌گیرد. درواقع بهینه‌بودن فرم زمانی حاصل می‌شود که در فرم معماری و سازه، یکپارچگی وجود داشته باشد و در این وضعیت ساختار فرم، علاوه بر برآوردن الزامات سازه، وجود دیگری را نیز شامل شود. این وجود، شامل انبساط فرم با مسیر انتقال نیرو و همچنین رعایت وجود اقتصادی از جمله استفاده از حداقل مصالح و درنظر گرفتن هزینه و مدت زمان ساخت آن است (فرشاد، ۱۳۵۳: ۶۹). خوشبختانه همواره الگوهای مناسبی از فرم‌های بهینه در طبیعت و اطراف بشر وجود دارد که به طور دائم الهام‌بخش او بوده‌اند. اصولاً طبیعت سیستمی زنده و پویا و مملو از فرم‌های متنوع است که با فرآیندی طبیعی و بصورت تدریجی و با گذر زمان، شکل گرفته، با نیروهای محیطی منطبق شده‌اند و محصول این فرآیند، فرم‌هایی بهینه است. ساختارهای طبیعی، همواره ساده‌ترین و بهترین راه برای انتقال نیرو و ایجاد تعادل در فرم را بر می‌گزینند؛ بنابراین بهره‌گیری از اصول به کاررفته در این فرم‌ها می‌تواند برای ایجاد فرم‌های بهینه از نظر سازه‌ای، بسیار مؤثر باشد. از طرف دیگر، دانش بایونیک، ابزار مناسبی در الگوبرداری و بهره‌گیری از طبیعت است. بایونیک به هنر بکارگیری سیستم‌های طبیعی برای حل مسائل فنی گفته می‌شود (احمدی شلمانی، ۱۳۸۸: ۳). بایونیک ضمن نگاهی علمی به موجودات زنده ۵ مرحله را شامل می‌شود:

۱. تعریف مسئله؛ ۲. جستجو راه حل زیستی؛ ۳. تعریف راه حل بیولوژیک؛ ۴. استخراج اصول؛ ۵. کاربست اصول.
- در این مقاله نیز، فرآیند فوق به شرح زیر دنبال شده است:
۱. تعریف مسئله: در این مرحله مسئله اصلی، بهینه‌سازی فرم یک ستون خرپایی با هدف به کاربردن آن در فضای معماری است.

۲. جستجو راه حل زیستی: به این منظور، عناصر طبیعی که از مقاومت استاتیکی مناسبی برخوردارند، نظیر صدف

از دیگر سازه‌های به فرم مارپیچ می‌توان به سازه‌های خرپایی متنابوب<sup>۸</sup> اشاره نمود. سازه‌ی خرپایی متنابوب به سازه‌ای گفته می‌شود که در آن اعضای سازه‌ای براساس الگویی منظم در فضا تکرار شوند؛ مانند ساختار یون‌ها و مولکول‌ها در جامدهای بلوئین. اعضای سازه‌ای می‌توانند چوب، فولاد و یا مصالح مشابه باشد. این اعضا، در ستون شامل، خطوط مستقیم در طول ستون و خطوط مارپیچ شکل است. خطوط مارپیچ به دور محور ستون ساعتگرد و پاد ساعتگرد می‌چرخند (تصویر ۳). فرم این سازه تقریباً مانند سازه‌ی برج گرگان است، با این تفاوت که اعضای مارپیچ در خرپایی متنابوب خطوط شکسته هستند. مقاومت این نوع سازه نسبت به سازه‌ی تیر یا ستون‌های متدالو، در تحمل نیروی فشاری و خمش بهتر است (Sui, Fan & Lai, 2015; Lai, Liu & Wang, 2014) در دکلهای مخابراتی، مقاوم‌سازی ستون‌های بتُنی، قاب دوچرخه و ... کاربرد دارد (Gavade, et al., 2016).

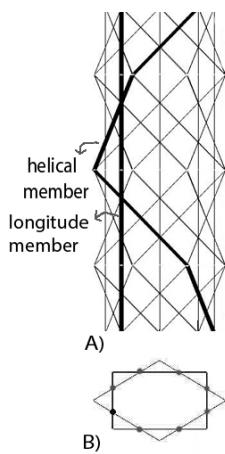


Fig. 3 IsotruSS structure. A) Elevation. B) Plan  
(Gavade et al. 2016)

مثال‌های بیان شده در زمینه‌ی سازه‌های مارپیچ شکل، نشان‌دهنده‌ی نقش فرم مارپیچ در بهینه‌سازی سازه است. بنابراین با هدف بهره‌گیری و توسعه این فرم، در پژوهش حاضر ساختار فرمی استخوان و شکل مارپیچی موجود در آن به منظور بهینه‌سازی سازه‌ای و فرمی بررسی می‌شود.

### ۳- بررسی ساختار استخوان

در بدن انسان‌ها تحمل وزن بدن و حفظ تعادل بر عهده استخوان‌ها، مفاصل، ماهیچه‌ها و تاندون‌ها است. در این سیستم، استخوان‌ها عمدها نیروهای فشاری و ماهیچه‌ها و تاندون‌ها نیروی کششی را تحمل می‌کنند. برای بررسی مکانیزم انتقال نیرو در استخوان، شناخت ساختار استخوان

انحنای مقعر داشته باشد (سالواذری، ۱۹۸۶: ۲۳۸). سازه‌ی تصویر ۲ در راستای طولی ساز، انحنای مقعر و در محیط سازه انحنای محدب دارد. اعضای سازه‌ای در این نوع سازه خطوط مستقیمی هستند که از پایین تا بالای سازه امتداد دارند و نقطه‌ی انتهای خطوط نسبت به ابتدای آن، به دور محور ستون چرخیده است. «ولادیمیر شوخو»<sup>۴</sup> در دهه ۱۸۹۰ اولین سازه‌ی هذلولی (تصویر ۱ و ۲) در شهر «پلیینو»<sup>۷</sup> در کشور روسیه با کاربری سازه نگهدارنده‌ی منبع آب را طراحی کرد. تحقیقات شوخو در سال ۱۸۹۰ نشان داده است که ستون‌های به فرم زین‌اسی یا هایپار<sup>۵</sup> می‌توانند عملکرد سازه‌ای بهینه‌ای را از خود نشان دهند (Debney, 2012). در این نوع سازه‌ها، علاوه بر موارد فوق، ظرافت سازه به زیبایی منظر شهری کمک می‌کند. همچنین تخلخل و شفافیت سازه امکان دیده شدن مناظر طبیعی اطراف از میان سازه را میسر کرده است. همان‌گونه نیز سازه‌ی هایپار در سازه‌ی برج‌های خنک‌کننده، برج دیدبانی، مخابرات و ... کاربرد دارد (Debney, 2012).

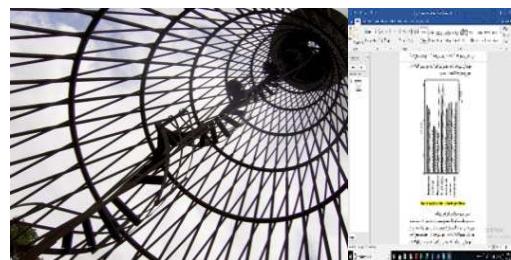


Fig. 1 Left: Hypar structure (wikivisually.com)  
Right: Gherkin Tower, London (www.arup.com)



Fig. 2 Hypar structure (Debney 2012)

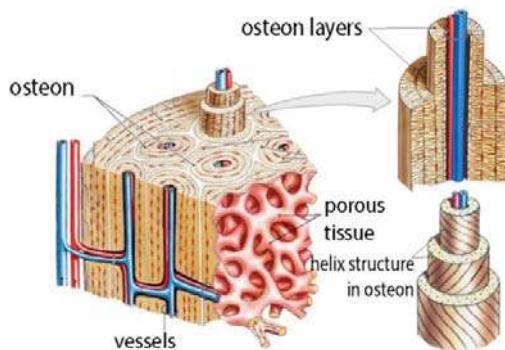


Fig. 5 Left: the section of cortical bone. Right: osteon structure. ([www.easynotebooks.com](http://www.easynotebooks.com))

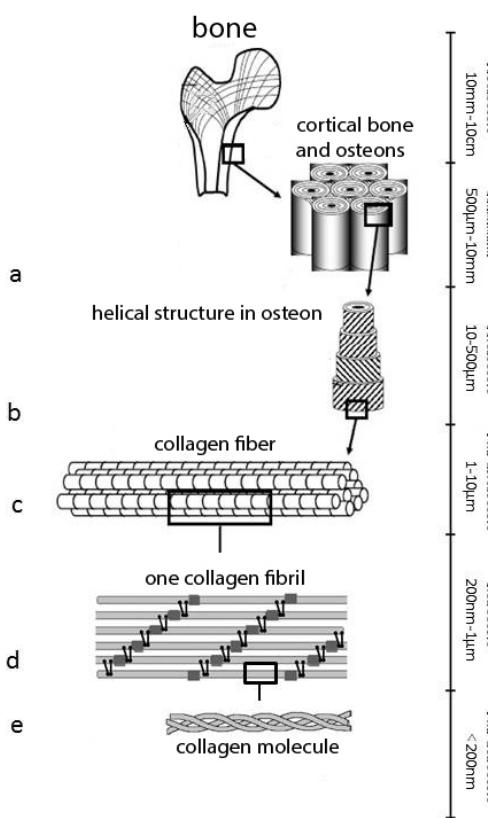


Fig. 6 Bone structure. A: cortical bone. B: helical structure in osteon. C: collagen fiber (one strand of osteon). Strands of the fiber are also helical; in the schematic form they are pictured linear. D: each strand of collagen fiber is called collagen fibril which is made by twisting collagen molecules. E: collagen molecule. (hamed, Jasiuk, 2012)

در ادامه یک نمونه ساختار مارپیچ شکل، مدل سازی و تحلیل سازه‌ای و فرمی می‌شود. نکته‌ی مهم در مدل سازی ساختار مارپیچ شکل (از نظر سازه‌ای) تعیین شیب مارپیچ یا زاویه چرخش مارپیچ‌ها به دور محور عمودی سازه است. به همین دلیل زاویه چرخش مارپیچ‌ها در ساختار استخوان بررسی می‌شود. در ساختار استخوان در مقیاس میکرو، استئون‌ها اعضای مارپیچ شکل هستند که نیروی فشاری

لازم است. ساختار استخوان شامل بافت فشرده و بافت متخلخل می‌باشد (تصویر ۴). بافت فشرده در استخوان‌های بلند و بافت متخلخل در استخوان‌های پهن و قسمت داخلی استخوان‌های بلند دیده می‌شود (Meyer et al., 2008).

برای درک بهتری از مقاومت بالای استخوان نسبت به وزنش می‌توان آن را با فولاد به عنوان یک مصالح ساختمانی مقاوم و باکاربرد گسترده مقایسه کرد. مقاومت بافت فشرده استخوان و فولاد نرمه به ترتیب برابر ۱۰۲۰ (Ji & Gao, 2004) و ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است، در صورتی که چگالی بافت فشرده استخوان و فولاد National Institute of Standards and Technology نرم‌هه به ترتیب برابر ۱۸۵ (Standards and Technology) و ۷۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب (مبث ۶ مقررات ملی ۱۳۹۲) می‌باشد.

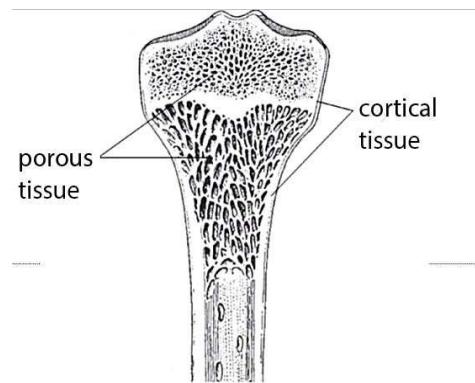


Fig. 4 Cortical and porous tissue in bone (Meyer et al. 2008)

از آنجا که در استخوان و فولاد نسبت مقاومت به چگالی به ترتیب حدوداً ۳۰۵.۷۳ و ۵۵۱.۳۵ بدهست می‌آید، در شرایط یکسان، نسبت مقاومت به وزن در بافت فشرده استخوان بیش از فولاد می‌باشد و این موضوع نیز نشان اهمیت این ساختار طبیعی است.

اولین واحد تشکیل‌دهنده‌ی بافت فشرده استخوان، استئون<sup>۹</sup> است (تصویر ۵). استئون‌ها مواد پروتئینی، به شکل استوانه هستند که در راستای طول استخوان شکل گرفته‌اند. هر استئون از چندین لایه تشکیل شده است و هر لایه شامل رشته‌های مارپیچ شکلی است که در تصویر ۵ نشان داده شده است. هر کدام از مارپیچ‌ها، فایبر کلاژن<sup>۱۰</sup> نام دارد. هر فایبر کلاژن نیز مانند طناب از رشته‌های مارپیچ شکل به نام فیبریل کلاژن<sup>۱۱</sup> تشکیل شده است (Scar, 2014). هر فیبریل کلاژن از ۵ مارپیچ به نام مولکول کلاژن و هر مولکول کلاژن از سه رشته‌ی مارپیچ تشکیل شده است (Scar, 2011) (تصویر ۶).

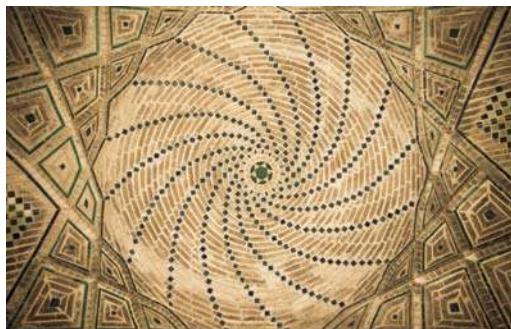


Fig. 9 Interior view of dome of Friday Mosque in Esfahan (fotografia.islamoriente.com)

جدا از مظاهر زیبائی انسانی فرم مارپیچ، شناخت ساختار استخوان و نمونه‌های بررسی شده در بخش ادبیات موضوع نشان داد که فرم مارپیچ دارای قابلیت‌های گستره‌ای است که می‌تواند جهت طراحی المان سازه‌ای همچون ستون مورد استفاده قرار گیرد. ضمن آن که شناخت عملکرد سازه‌ای استخوان و آگاهی از مقاومت بالای آن (Chen, McKittrick, and Meyers, 2012) مؤید اهمیت این فرم به لحاظ سازه‌ای می‌باشد. به این منظور، مکانیزم انتقال نیرو در ساختار این فرم، ضمن بررسی یک نمونه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در نمونه‌ی مورد مطالعه یک ستون خرپایی چرخانده شده به دور محور عمودی خود (ستون مارپیچ)، مدل‌سازی شده و نحوه انتقال نیرو در آن با یک ستون خرپایی متعارف مقایسه می‌شود. در مدل‌سازی یکبار عملکرد سازه‌ها در برابر نیروی افقی یکسان ( $10\text{ kN}$ )، و بار دیگر تحت نیروی اعمودی یکسان ( $10\text{ kN}$ ، بررسی می‌گردد. با توجه به اینکه (مطابق روال معمول تحلیل سازه‌ای) نیروی افقی و اعمودی به بالای ستون وارد می‌شود،  $\frac{4}{5}$  نیروی مشابه  $\frac{2}{5}$  کیلونیوتونی، به بالای اعضای اعمودی ستون متعارف و همچنین اعضا مارپیچ ستون چرخانده شده وارد می‌شود. مدل‌های سازه‌ای ساخته شده در نرم‌افزار SAP2000 آنالیز شده و مقدار نیروهای اعضا تعیین شده است.

به منظور درج ابعاد واقعی برای مدل مفروض، اعداد پیش‌فرض زیر به عنوان مشخصات ستون مدل‌سازی شده، در نظر گرفته شده است:

- ارتفاع سازه = ۶ متر
- فاصله بین المان‌های افقی =  $0.5\text{ m}$
- قطر سازه = ۱ متر
- زاویه چرخش اعضا مارپیچ =  $90^\circ$  درجه

وارد شده به استخوان را تحمل می‌کنند. در هر لایه‌ی استخوان شیب مارپیچ‌ها متفاوت است (در تصویر ۷ زوایای مارپیچ در لایه‌های ۱ تا ۵ متفاوت است). براین اساس لازم است برای تعیین زاویه چرخش بهینه در ساختارهای مارپیچ شکل، عملکرد سازه‌های مارپیچ شکل در زوایای مختلف چرخش بررسی شود. ولی در ابتدا باید نحوه‌ی انتقال نیرو در ساختار مارپیچ و تأثیر این فرم بر فضای معماری را بررسی کرد.

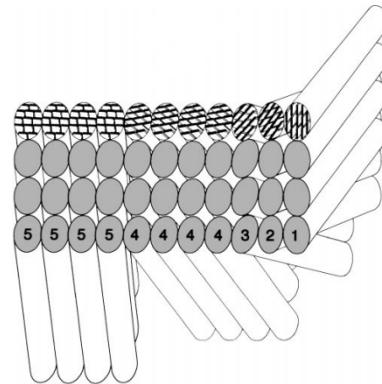


Fig. 7 Rotation angle of helices in osteon layers (Weiner, Traub, and Wagner, 1999)

۴- بررسی ساختار مارپیچ از نظر فرم و مکانیزم انتقال نیرو در ساختار مارپیچ

پیش از این به مصاديق استفاده از ساختار مارپیچ پرداخته شد و مزیت‌های این سیستم معرفی گردید با این حال جا دارد که به نقش فرم مارپیچ از وجه زیبایی‌شناسی در معماری اشاره نمود. فرم مارپیچ در معماری فرمی ملموس و آشناست و کاربرد آن در نقوش معماری، تداعی گر، حرکت به سوی بالا و کمال است (پورعفتر و موسوی‌لر، ۱۳۸۱). از نمونه‌های آن می‌توان به فرم ستون‌های مسجد وکیل شیراز، حاشیه پیچ محراب مسجد حکیم (تصویر ۸) و طرح زیر گنبد مسجد جامع اصفهان (تصویر ۹) اشاره کرد.

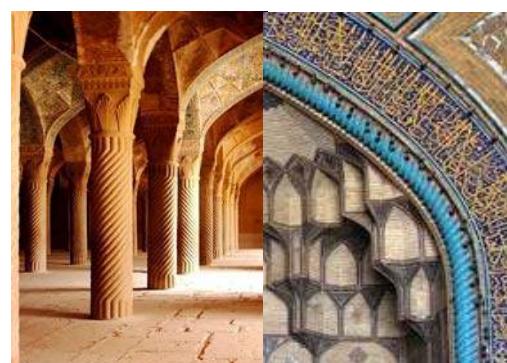


Fig. 8 Left: Vakil Mosque, Shiraz (shabestan.ir). Right: the "Mihrab" of Hakim Mosque, Esfahan (memarnet.com)

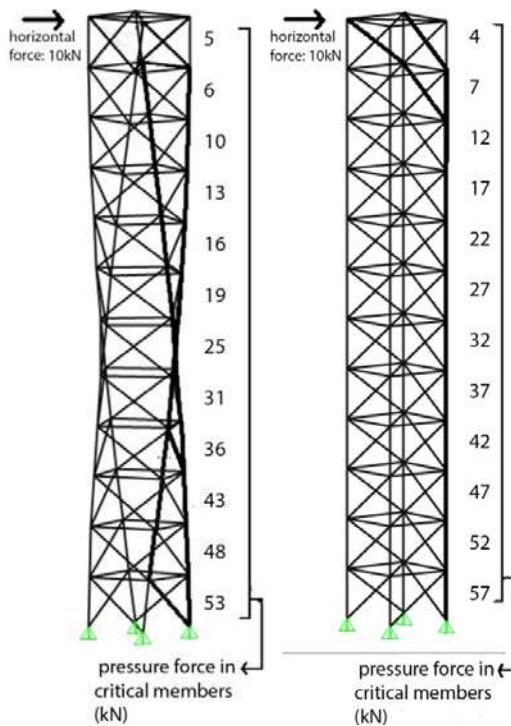


Fig. 12 maximum pressure force in simple and helical column (critical members at each level are presented thicker)

#### ۱-۴- مکانیزم انتقال نیروهای افقی

بررسی الگوی توزیع نیروی افقی وارد شده در اعضای خرپای متعارف نشان می‌دهد هنگامی که نیرو در راستای بحرانی یعنی قطر خرپا، وارد می‌شود<sup>۱۳</sup> (تصویر ۱۰)، در کلیه ترازها، نیروی فشاری در عضو «۲» بیشترین مقدار را داشته و در اعضای ۳ و ۱ به دلیل قرارگیری بر روی محور خشای پلان ستون، نیروی فشاری نزدیک به صفر است. طبیعی است که نیروی عضو ۴ بصورت کششی می‌باشد.

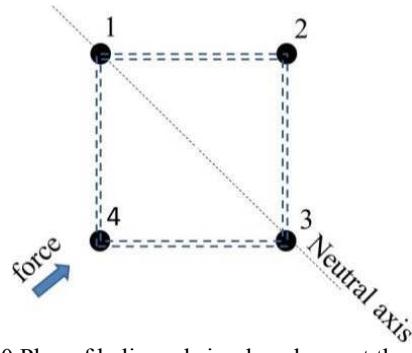


Fig. 10 Plan of helix and simple column at the height of 0 meters (the base level)

#### ۲-۴- مکانیزم انتقال نیروهای عمودی

در انتقال نیروی عمودی در خرپای متعارف فقط اعضای عمودی نقش داشته و نیروهای اعمالی از طریق اعضای عمودی ستون، مستقیماً به زمین منتقل می‌شوند. از سوی دیگر در خرپای مارپیچ، به دلیل نبود عضو عمودی، نیرو با یک مکانیزم ساده به زمین منتقل نمی‌گردد. در واقع مارپیچ‌ها و اعضای موربی که آنها را به هم متصل می‌کنند در تحمل نیروی عمودی نقش اصلی را بر عهده دارند. از این رو در اثر بارگذاری عمودی، مجموع نیروی محوری که در اعضای خرپای مارپیچ ایجاد می‌شود، بیشتر از خرپای متعارف بوده و رفتار سازه‌ی مارپیچ در تحمل این نوع بار شاید چندان بهینه نباشد. در تصویر ۱۳ نیروی اعضای طولی و مورب در ستون مارپیچ و متعارف در مدل کامپیوترا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار بر نیروی فشاری در اعضای طولی ستون غیر مارپیچ برابر ۲.۵ کیلونیوتن و در اعضای مورب برابر صفر است. در ستون مارپیچ‌شکل نیروی فشاری اعضای مارپیچ و مورب به ترتیب برابر ۰.۵ و ۰.۲ کیلونیوتن بوده و توجیه تئوری ارائه شده تأیید می‌گردد.

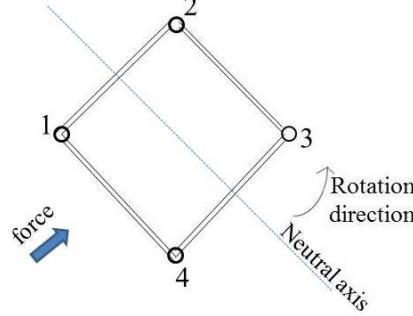


Fig. 11 Plan of helix column with 90 degree rotation at the height of 3 meters

در خرپای مارپیچ نیز (تصویر ۱۱) با توجه به نیروی نشان داده شده، همواره بیشترین نیروی فشاری در اعضای سمت راست محور خنثی مشاهده می‌شود اما به دلیل مارپیچ بودن ستون، اعضای ۲ و ۳ در سمت راست محور خنثی قرار گرفته و هر دو همزمان در تحمل گشتاور وارد بر ستون مشارکت می‌کنند. این تقسیم نیرو بین دو عضو فشاری (به جای یک عضو) سبب می‌گردد تا در بحرانی ترین عضو ستون مارپیچ، نیروی کمتری نسبت به خرپای متعارف ایجاد شده و در نهایت مصالح کمتری در طراحی این عضو به کار رود. طبق نتایج مدل‌سازی ارائه شده در تصویر ۱۲، بیشترین مقدار نیروی فشاری در هر تراز، توجیه تئوری ارائه شده را تأیید می‌نماید.



Fig. 15 Left: The general form of the considered sightseeing tower in this research. Right: Jubilee tower, Australia (static.panoramio.com)

#### ۱-۵- مدل سازی

شبیه‌سازی و مدل سازه‌ای در نرم‌افزار تحلیل سازه SAP2000 انجام شده و در مدل سازی بار زلزله و بار وزن سکو هم‌مان به سازه وارد می‌شود. برای بدست آوردن بهترین زاویه چرخش به دور محور عمودی آن (در اعضای طولی ستون)، متناظر با کمترین وزن اسکلت فولادی، سازه‌ی خرپایی مارپیچ تحت زوایای مختلف مدل سازی شده و تحلیل سازه‌ای آن تحت بارگذاری‌های مختلف انجام گردیده است. در نهایت وزن سازه مارپیچ با ستون خرپایی متعارف مقایسه شده است.

در فرآیند یافتن فرم بهینه، حالات چرخش مارپیچ، با زاویه‌های چرخش صفر، ۴۵، ۹۰، ۶۷.۵ و ۲۲.۵ درجه (تصویر ۱۶)، مدل سازی شده و وزن سازه طراحی شده در هر یک از این حالات برای مقاومت در برابر بارهای وارد با یکدیگر مقایسه شده است. مجموع بار مرده و زنده برای کاربری مذکور، ۶ کیلونیوتون بر متر مربع در نظر گرفته شده است.<sup>۱۷</sup>

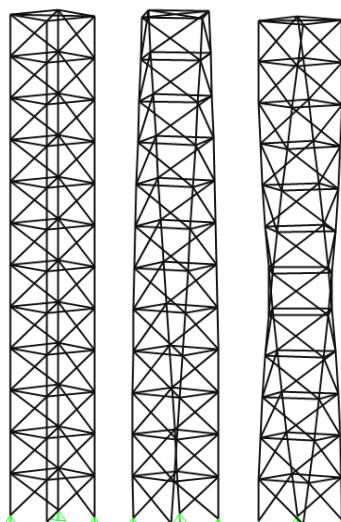


Fig. 16 form of columns with 0, 45, and 90 degrees  
(The rotation states of 22.5, 67.5 and 135 degrees have not been displayed)

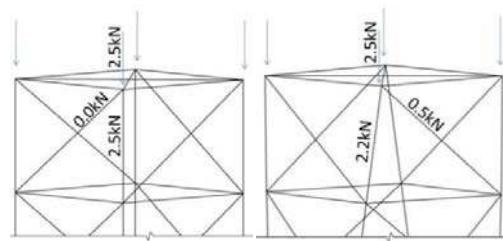


Fig. 13 Pressure force in effect of vertical load in upper part of helix and simple columns (For greater clarity, forces are only shown in one of the nodes)

#### ۵- ارزیابی سازه ستون نظرگاه<sup>۱۸</sup> و بهینه‌سازی زاویه چرخش اعضاء

در این بخش با تعریف کاربری برای ستون و تحلیل سازه‌ای آن، عملکرد فرم مارپیچ بررسی می‌شود. با توجه به تراش فرمی که در فرم ستون مارپیچ وجود دارد، این ستون می‌تواند برای فرم‌های سازه‌ای نمایان<sup>۱۹</sup>، کاربرد بیشتری داشته باشد. با این پیش‌فرض، عملکرد نظرگاه کاربری مناسبی است؛ بنابراین، کاربری ستون مذکور، سازه‌ی نگهدارنده نظرگاه فرض شده است.

نظرگاه به سکویی مرتفع برای نگاه کردن و اندیشیدن به مناظر اطراف، گفته می‌شود (طبیی‌فر، ۱۳۸۹)، مانند دو نظرگاه در بوستان حضرت ابراهیم (آب و آتش) در تهران (تصویر ۱۴) و برج جوبیلی<sup>۲۰</sup> در شهر وینای استرالیا (تصویر ۱۵ (راست)). نظرگاه عموماً در باغ‌ها و پارک‌ها با هدف ارتباط بیشتر انسان با طبیعت و مناظر اطراف ساخته می‌شود؛ همچنین در مکان‌های تفریحی با هدف جاذبه گردشگری احداث می‌شود و به همین دلیل زیبایی فرم نظرگاه دارای اهمیت ویژه‌ای است.

عموماً عناصر معماری در نظرگاه‌ها شامل سکویی مرتفع، سازه نگهدارنده و پله‌ی رسیدن به سکو است. نظرگاه مورد بررسی برای تحلیل سازه‌ای، مانند تصویر ۱۵ (چپ)، نظرگاهی با یک سکو است که سازه نگهدارنده آن، ستونی در زیر سکو بوده و برای مکانی پرازدحام، مانند پارک‌ها در نظر گرفته شده است.



Fig. 14 Hazrat-e-Ebrahim Park, Tehran (left:  
[en.wikigogo.org](http://en.wikigogo.org))

صلب و اتصال لوله‌های افقی و مورب، مفصلی در نظر گرفته شده است.

قطعه اعضا سنتون، لوله از جنس فولاد St-52 با نسبت قطر به ضخامت  $27/3$  در نظر گرفته شده است که متناظر با لوله‌ای به قطر  $88/9$  mm و ضخامت  $3/2$  mm (مستخرج از جدول اشتال) به عنوان پیش‌فرض می‌باشد. همچنین ابعاد مقاطع مارپیچ در طول سنتون ثابت اختیار شده است به نحوی که بار وارد بر مقاطعی از مارپیچ که بیشترین نیرو را تحمل می‌کند، حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد (نسبت تنش یا افقی و مورب متناسب با نیرویی که بر آنها وارد می‌شود، متغیر بوده و با استفاده از مقاطع تعریف شده، (لوله به قطر  $13, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 29, 31, 33, 36$  میلیمتر) قطع مناسب با کمترین وزن توسط نرم‌افزار انتخاب شده است.

با توجه به تأثیر مساحت سکو بر میزان بار وارد برسنون، سطح سکو به صورت پیش‌فرض، پنج حالت ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ مترمربع در نظر گرفته شده است. در این حالات، بار کل سکو  $36, 54, 72, 96$  و  $108$  کیلونیوتن بوده و بار زلزله با توجه به ضوابط بند ۳-۵ ویرایش چهار استاندارد  $2800, 10$  درصد وزن سکو، محاسبه شده است.

#### ۲-۵- فرض‌های مدل‌سازی

ابعاد سازه‌ی نظرگاه به شرح زیر فرض شده است:

ارتفاع سازه سنتون = ۶ متر

فاصله بین المان‌های افقی = ۵.۰ متر

قطر سازه = ۱ متر

بار وزن سکو و نیروی زلزله به بالای اعضا مارپیچ وارد شده و مقاطع سنتون مقاومت کافی در برابر بار افقی در دو جهت اصلی و دو راستای فرعی با زاویه  $45$  درجه نسبت به جهت اصلی را دارند. اتصال مقاطع مارپیچ به یکدیگر، از نوع

Table 1 The effect of the rotation angle on the behavior of the helix column in the state of 108 kN vertical load and the corresponding earthquake load

Max. displacement (mm)	Increase or decrease of weight relative to non-rotation			Structure weight (kg)	Pressure force in critical helix members (kN)	Helix pipe properties		The helix rotation angle	No.
	Total	Vertical	Horizontal			Weight (kg)	Diameter (mm)		
26	3.5	26	0	133.8	89	94	68	0	1
26	3.5	26	-%2	130.6	87	82	67	22.5	2
28	4	28	-%3	130.5	85	90	67	45	3
30	4	30	+%1	134.5	84	90	67	67.5	4
31	5	31	+%5	141	82	88	66	90	5
31	5	31	+%11	149	80	82	64	135	6

شكل کاهش یافته و درنتیجه قطر لوله مارپیچ کاهش می‌یابد. با وجود افزایش کلی طول مارپیچ‌ها دراثر افزایش زاویه چرخش به دلیل کمتر شدن قطر لوله مارپیچ، وزن کل اعضا مارپیچ شکل در مجموع کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر جابجایی سازه هم در راستای افقی و هم در راستای عمودی افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که با افزایش زاویه چرخش سنتون تا حدود زاویه  $45$  درجه، وزن سازه رو به کاهش می‌گذارد، ولی با افزایش زاویه‌ی مذکور، وزن سازه مجدداً روند صعودی پیدا می‌کند. همانگونه که پیش‌تر در بخش مکانیزم انتقال نیرو اشاره شد، ساختار فرم مارپیچ در برابر نیروی افقی می‌تواند بهینه باشد. حال آنکه در برابر نیروی عمودی الزاماً اینگونه نیست. از آنجا که به سازه‌ی مورد بررسی هم نیروی عمودی و هم نیروی افقی وارد می‌شود، در مدل سازی‌های فوق تأثیر عملکرد همزمان این دو نوع نیرو بررسی شده است. نظر به

۳-۵- تحلیل داده‌ها بر اساس سیستم‌های انتقال نیرو به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی مارپیچ بر رفتار سازه‌ی سنتون مورد مطالعه، شش زاویه چرخش و همچنین برای ارزیابی اثر تأثیر مقدار بار قائم و افقی، پنج تراز بار قائم همراه با نیروی افقی متناسب، مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین برای  $30$  حالت مختلف، مدل‌سازی و تحلیل‌ها انجام شده است. در هر یک از این مدل‌ها، براساس مقادیر مختلف زاویه چرخش برای سنتون، مشخصات فیزیکی لوله‌های مارپیچ، نیروی بحرانی ترین عضو مارپیچ، جابجایی سازه، وزن سازه و درصد افزایش یا کاهش وزن سازه نسبت به حالت بدون چرخش تعیین شده است.

بر پایه نتایج مدل‌سازی که بخشی از آن به عنوان نمونه برای سنتون با سکویی به مساحت  $18$  مترمربع در جدول  $1$  آورده شده است، با اعمال چرخش در مرکز پلان سنتون، نیروی فشاری ایجاد شده در مقاطع بحرانی اعضای مارپیچ

اثر اعمال نیروهای سازه‌ای نشان داده شده است (واضح است که بیشترین جابجایی ستون مربوط به ۴ مفصل فوکانی ستون می‌شود). بهطور کلی، با افزایش مقدار نیروی وارد بر سازه و افزایش زاویه چرخش ستون، جابجایی افزایش می‌یابد. روند صعودی جابجایی سازه در اثر افزایش نیروی اعمال شده بر آن طبیعی است ولی روند صعودی آن با افزایش زاویه چرخش را می‌توان با کاهش سختی سازه مرتبط دانست. به هر حال از آنجا که در سازه مورد نظر، جابجایی حداکثر سازه از حدود جابجایی مجاز آیین‌نامه‌ای کمتر است<sup>۱۸</sup>، طرح سازه‌ای می‌تواند قابل قبول تلقی گردد.

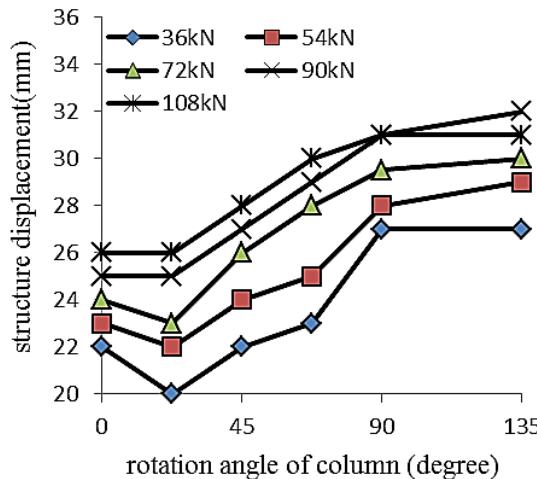


Fig. 18 Maximum displacement of structure in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (horizontal load corresponding to the vertical load are imposed to the structure)

در تصویر ۱۹ تغییرات وزن سازه بر حسب تغییرات زاویه چرخش مارپیچ در ستون بهازای مقادیر مختلف بارهای قائم طراحی شده (همراه با بار زلزله‌ی متناظر) را ارائه شده است. همانطور که در این تصویر دیده می‌شود به ازای کلیه‌ی ترازهای بارهای قائم مورد بررسی با افزایش زاویه چرخش ستون تا حدود ۴۵ درجه، وزن سازه‌ی مارپیچ کاهش یافته و لی با رشد بیشتر زاویه‌ی مذکور، این پارامتر فرونوی می‌یابد. برای مثال در حالت بارگذاری ۱۰۸ کیلونیوتون وزن سازه متعارف حدوداً ۱۳۴ کیلوگرم است که با چرخش پلان ستون تا زاویه ۴۵ درجه وزن سازه به ۱۳۰.۵ کیلوگرم کاهش یافته و سپس با رشد بیشتر در زاویه چرخش به حدود ۱۴۹ کیلوگرم می‌رسد.

اینکه در مدل‌سازی، بیشترین نیرو، در اعضای مارپیچ شکل ایجاد می‌گردد، بحرانی‌ترین اعضای سازه، مارپیچ‌ها بوده و در تصویر ۱۷ روند تغییر نیروی فشاری در اعضای مارپیچ شکل با افزایش زاویه چرخش ستون بهازای مقادیر مختلف بار قائم و زلزله ارائه شده است.

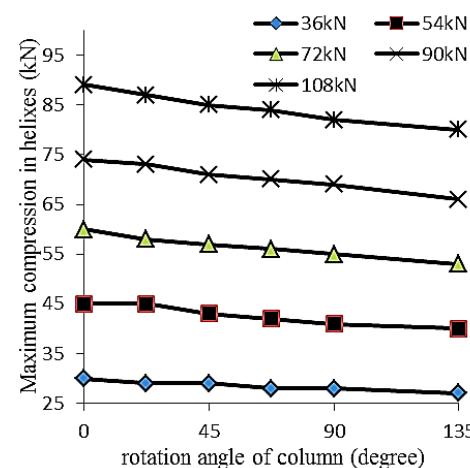


Fig. 17 The variation of the maximum compressive force in the helices in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (horizontal load corresponding to the vertical load are imposed to the structure)

در تصویر مذکور، در تمام حالات بارگذاری با افزایش زاویه چرخش ستون، حداکثر نیروی فشاری در اعضای مارپیچ شکل، روند نزولی و یکنواختی پیدا می‌کند. برای مثال در حالتی که بار قائم اعمالی برابر با ۹۰ kN باشد، در خرپای متعارف (ستون با چرخش پلان صفر درجه)، حداکثر نیروی فشاری در اعضای مارپیچ شکل حدود ۷۴ کیلونیوتون است. با افزایش زاویه چرخش ستون، حداکثر نیروی فشاری در اعضای مارپیچ شکل، کاهش یافته به طوری که در زاویه ۶۶ درجه حداکثر نیروی فشاری به عدد ۶۶ کیلونیوتون می‌رسد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که چرا با افزایش زاویه چرخش بیش از ۴۵ درجه، با وجود کاهش نیروی فشاری در المان‌های مارپیچ، به دلیل افزایش نیرو در المان‌های مورب، وزن سازه روند صعودی پیدا می‌کند. بنابراین، زاویه مناسب برای طراحی ستون مارپیچ مورد نظر، زاویه ۴۵ درجه است و با انتخاب این زاویه، فرم بهینه حاصل می‌شود.

در تصویر ۱۸ بیشترین جابجایی در مفصل‌های ستون بر

بديهی است که برای بررسی بهينه بودن طرح از نظر اقتصادي، علاوه بر درنظر گرفتن وزن مصالح مصرف شده هزينه اتصالات سازه و نيروي کار نيز باید بررسی شود. با توجه به تشابه نسبي اتصالات در اعضای ستون متعارف و ماريپيج با زاويه چرخش محدود، هزينه های مذکور احتمالاً تفاوت قابل ملاحظه ای ندارد. از اين رو می توان با درنظر گرفتن وزن مصالح مصرف شده نتیجه گرفت که سازه نظرگاه مدل سازي شده در زاويه چرخش ۴۵ درجه، می تواند از نظر اقتصادي، بهينه باشد. همچنان با توجه به زيبايی ستون ماريپيج، افزایش وزن سازه در زوایای بیشتر از ۴۵ درجه برای کاربری های خاص مانند سازه های نمایان<sup>۱۹</sup> و يا نمادین می تواند قابل توجيه باشد.

ظرافت و زيبايی ستون ماريپيج امكان طراحی ستون اكسپوز را به معماران می دهد، چرا که غالباً معماران با نازک کاري سعی در مخفی کردن سازه ستون هایي با پروفيل های فولادی دارند. چنین فرمی علاوه بر سازه های نظرگاه می تواند در سالن های بزرگ، پل عابر پیاده، سازه های نگهداره ای آنتن های مخابراتی و ... کاربرد داشته باشد. در عین حال، فرم ماريپيج علاوه بر آنکه باعث زيبايی فضای معماري و منظر شهری می شود، تداعی کننده اوج و کمال بوده و تخلخل اين فرم ارتباط بصري را افزایش و ديد بهتری ایجاد می کند. اين در حالی است که فضای داخل ستون نيز می تواند جزئی از فضای معماري باشد.

#### ۶- نتیجه

هدف اين پژوهش بهينه سازی فرم از نظر سازه های با تأکيد بر طراحی فرم بهينه برای ستون يك نظرگاه است. با اين هدف تلاش شد تا با بهره گيري از دانش باليونيك از ساختار استخوان الهام گرفته شود و با مطالعه ساختار فرم ماريپيج و مکانيزم انتقال نيرو در ساختار آن، راه حل مناسبی برای ایجاد فرم بهينه پيشنهاد گردد. برای بررسی تأثير چرخش در مقاومت سازه های، ستون خripai چرخانده شده (حول محور اصلی) و ستون خripai متعارف (غيرMariPig) در نرم افراز SAP2000 مدل سازي شد. در اثر اعمال نيروي افقی و نيروي عمودي به طور جداگانه، چنین نتیجه گرفته شد که تغيير در نحوه انتقال نيرو در اعضای ماريپيج شكل باعث می شود تا ستون مذکور نيروي افقی را بهتر از ستون متعارف تحمل کرده و در نهايیت وزن کمتری داشته باشد. با تعریف کاربری نظرگاه برای ستون ماريپيج شکل، رفتار ستون در تحمل وزن سکوی نظرگاه و بار زلزله تحلیل شد. با مقایسه ستون متعارف و ستون ماريپيج تحت زوایای مختلف، مشاهده گردید که در اثر اعمال چرخش به اعضای

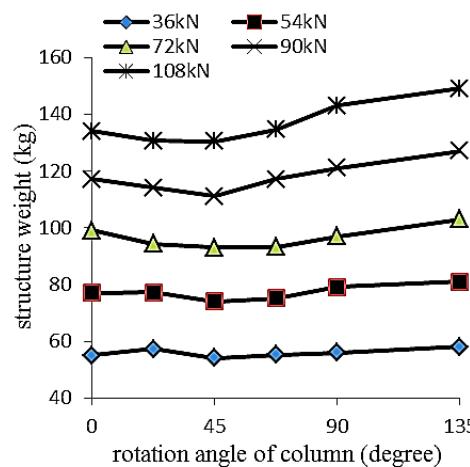


Fig. 19 Maximum weight of structure in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (with corresponding earthquake load)

همانطور که در بخش مکانیزم انتقال نيروي عمودي بيان شد، در اعمال نيروي عمودي به ستون ماريپيج، اعضای مورب بخشی از نيروي عمودي را تحمل نموده و در نتیجه به مقاطع قوي تری نسبت به ستون متعارف نياز دارند. از سوي ديگر با افزایش زاويه چرخش، وزن اعضای ماريپيج شکل کمتر می شود. بر پایه نتایج مدل سازی، ایجاد چرخش محدود در پلان ستون، باعث پایین آمدن وزن کلى سازه می شود. اين کاهش وزن ستون، حاصل برآيند کاهش وزن اعضای ماريپيج شکل و افزایش وزن اعضای مورب است. حال آنکه با رشد زاويه چرخش، وزن کلى سازه افزایش می یابد. از اين رو با توجه به محدود بودن تعداد زوایای چرخش انتخابی در مدل سازی چنین برداشت می شود که سازه تقریباً در زاويه ۴۵ درجه کمترین وزن را دارد. بررسی های تكميلي نشان می دهد که در حالت اعمال نيروي قائم ۷۲ کيلونيوتونی در قیاس با سایر حالات بارگذاري، بیشترین کاهش وزن نسبت به سازه غير ماريپيج رخ می دهد که کاهشي معادل ۶ درصد است.

نکته ديگر آنکه هرچه بارگذاري بيشتر شود، مقدار افزایش وزن ستون در زاويه چرخش ۱۳۵ درجه نسبت به ستون متعارف افزایش می یابد. برای مثال تحت بار قائم ۳۶ کيلونيوتون (همراه با بار زلزله متناظر)، افزایش وزن تها ۵ درصد است در حالیکه در نيروي ۱۰۸ کيلونيوتون اين مقدار به ۱۱ درصد می رسد. دليل اين پديده می تواند واستگی زياد جابجايی سازه به نيروي اعمال شده به ستون باشد زيرا هرچه جابجايی سازه بيشتر شود، لنگر خمشی بيشتری در درون اعضای ماريپيج ستون (که با اتصال صلب به يكديگر متصل شده اند) ایجاد گردیده و در نتیجه به اعضای قوي تری نياز است.

بودن اضافه وزن سازه و نیز ارضای همزمان محدودیت تغییر مکان، کاربرد این ساختار با زوایای مختلف چرخش (زوایایی که در مدلسازی بررسی شده‌اند) در سازه‌های نمایان و یا نمادین، می‌تواند قابل توجیه باشد.

در واقع زیبایی و تراش فرمی در ستون مارپیچ امکان طراحی فرم سازه‌ای نمایان را به معمار می‌دهد و از طرف دیگر، تخلخل این فرم، باعث ظرافت و شفافیت ساختار می‌شود. در عین حال، این فرم علاوه بر چشم‌نویز بودن در منظر شهری، تداعی‌گر مفهوم کمال نیز می‌باشد.

طولی ستون، نیروی فشاری اعضای مارپیچ شکل و در نتیجه وزن آن‌ها کاهش می‌باید. نظر به اینکه اعضای مارپیچ شکل همان اعضای بحرانی ستون خربایی هستند و بیشترین نیرو را تحمل می‌کنند، قوی ترین مقاطع اعضا در ستون را به خود اختصاص داده و کمتر شدن وزن آنها باعث می‌شود تا وزن سازه مارپیچ شکل در محدوده زاویه ۴۵ درجه، کمتر از سازه غیرمارپیچ شود. اگرچه با افزایش زاویه چرخش، به دلیل افزایش وزن اعضای مورب (که اعضای مارپیچ شکل را به هم متصل می‌کنند)، وزن کل سازه روند صعودی پیدا می‌کند، اما به دلیل زیبایی سازه‌ی مارپیچ شکل و محدود

#### پی‌نوشت:

۱. مارپیچ معادل انگلیسی آن Helix است و در فرهنگ فارسی عمید به مسیری که براساس پیچیده شدن جسم به دور یک استوانه ساخته می‌شود، گفته می‌شود.

2. Diagrid
3. Gherkin
4. Vladimir Shukhov
5. Columns Hyparabolic
6. Hypar
7. Polibino
8. Isotruss
9. Osteon
10. Collagen Fiber
11. Collagen Fibril

۱۲. بحرانی‌ترین حالت در تحمل نیروی زلزله هنگامی است که جهت اعمال نیرو همراستای قطر خرپا باشد زیرا فقط در این حالت است که تنها یکی از چهار عضو عمودی خربای نیروی فشاری را تحمل می‌کند.

#### 13. Observation Tower یا Sightseeing Tower

۱۴. فرم‌های سازه‌ای نمایان (اکسپوز) به فرم‌های مانند طرح‌های کالاتراوا اشاره دارند که در آنها فرم سازه‌ای به لحاظ ظاهری بر فرم معماري غلبه داشته و ظهور بیشتری دارد.

#### 15. Jubilee Tower

#### 16. Vienna

۱۷. طبق جدول ۱-۵-۶ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار زنده در مراکز بر ازدحام ۵ کیلونیوتون بر مترمربع است و بار مرده با فرض فلزی بودن سازه‌ی سکو، در حدود یک کیلونیوتون بر مترمربع است. در نتیجه مجموع بار مرده و زنده ۶ کیلونیوتون بر متر مربع تعیین می‌شود.

۱۸. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، جابجایی مجاز در ساختمان‌های تا ۵ طبقه برابر ۰.۲۵ ارتفاع سازه است. بنابراین در صورت کاربرد همین محدودیت برای نظرگاه:

$$120 = 25 \times 4.8 = \text{تغییر مکان مجاز}$$

تغییر مکان واقعی ساختمان از ضرب تغییر مکان ساختمان در اثر بار زلزله تخفیف یافته در ضریب  $C_d$  بدست می‌آید. طبق جدول ۲-۵ در استاندارد ۲۸۰۰ ضریب  $C_d$  برای سازه‌های تفریحی و بنای‌های یادبود برابر ۰.۵ است و طبق مدل سازی، حداقل تغییر مکان سازه در اثر بار زلزله تخفیف یافته برابر ۰.۳ میلی‌متر است، بنابراین:

$$2.5 = 0.3 \times 25 = \text{تغییر مکان واقعی سازه‌ی نظرگاه}$$

تغییر مکان سازه‌ی نظرگاه کمتر از تغییر مکان مجاز در سازه‌های ساختمانی است ( $2.5 < 120 < 75$ )؛ چون جابجایی مجاز در سازه‌های ساختمانی کمتر از سازه‌های غیر ساختمانی است، بنابراین تغییر مکان نظرگاه کمتر از تغییر مکان مجاز در سازه‌های غیرساختمانی است.

#### 19. Expose

#### فهرست منابع:

۱. پور جعفر، محمدرضا و موسوی‌لر، اشرف (۱۳۸۱). بررسی ویژگی‌های حرکت دورانی مارپیچ اسلامی یادمان تقسیم، وحدت و زیبایی، علوم انسانی الزهرا، ۱۲(۴۳)، صص. ۱۸۴-۲۰۷.
۲. مک دونالد، آنگوس (۲۰۰۱). سازه و معماری، ترجمه: محمد احمدی‌نژاد، تهران: خاک.
۳. مؤسسه‌ی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۹۴). آینین‌نامه طراحی ساختمان‌ها دربرابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۴.
۴. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲). مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بارهای وارد بر ساختمان.
۵. سالوادری، ماریو (۱۹۸۶). سازه در معماری، ترجمه: محمود گلابچی، تهران: دانشگاه تهران.

۶. طبیی فر، مهسا (۱۳۸۹). بررسی نقش نظرگاهها در منظر شهری، مجله علمی - ترویجی منظر، ۲ (۹)، صص. ۵۴-۵۲
۷. فرشاد، مهدی (۱۳۵۳). فرم‌های ساختمانی، شیراز: انتشارات دانشگاه شیراز.

8. Boake TM (2014). Diagrid Structures: Systems, Connections, Details, Walter de Gruyter.
9. Chen PY, McKittrick J, Meyers MA (2012). Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs, *Progress in Materials Science*, Vol. 57, No. 8, pp. 1492-1704.
10. Graham S (2004). *Biotensegrity: The Structural Basis of Life*, Handspring Publishing.
11. Baohua J, Gao H (2004). Mechanical properties of nanostructure of biological materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 52, No. 9, pp. 1963-1990.
12. Hamed E, Jasiuk I (2012). Elastic modeling of bone at nanostructural level, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 73, No. 3, pp. 27-49.
13. Gavade MS, Roy S, Barhatte SH, Mujumdar SS. (2016). Study of tensile load carrying capacity of Iso-Truss with two different positions of longitudinal members, *International Journal of Current Engineering and Technology*.
14. Changliang L, Chuang L, Junbiao W (2014). Fabrication and mechanical property test of IsoTruss ultra-lightweight composite structures, *AMCS*, Vol. 31, No. 2, pp. 375-382.
15. Meyers MA, Chen PY, Lin AYM, Seki Y (2008). Biological materials: structure and mechanical properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-206.
16. Ritchie RO, Buehler MJ, Hansma P (2009). Plasticity and toughness in bone, *Physics Today*, Vol. 62, No. 6, pp. 41-47.
17. Graham S (2011). Helical tensegrity as a structural mechanism in human anatomy, *International Journal of Osteopathic Medicine*, Vol. 14, No. 1, pp. 24-32.
18. Silver P, McLean W (2008). *Introduction to Architectural Technology*, London, Laurence King.
19. Sui Q, Fan H, Lai Ch (2015). Failure analysis of 1D lattice truss composite structure in uniaxial compression, *Composites Science and Technology*, Vol. 118, pp. 207-216.
20. Weiner S, Traub W, Wagner HD (1999). Lamellar bone: structure-function relations, *Journal of structural biology*, Vol. 126, No. 3, pp. 241-255.
21. national institute of standards and technology, accessed September 4, 2016, <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?refer=ap&matno=119>.
22. debney, peter. 2012. Hyperboloid Structures in GSA. Oasys-software, accessed November 14, 2016, <http://www.oasys-software.com/blog/2012/03/hyperboloid-structures-in-gsa/>.