

## 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 صادقیپور<sup>۳</sup> (نویسنده مسئول)، علی‌رضا پاچناری<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

#### چکیده

طراحی فرم با عملکرد سازه‌های 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 سازه‌های 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 سازه‌های 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 خرپای متعارف داشته، مصالح کمتری در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و از این رو ضمن برآورده کردن اقتضانات اقتصادی می‌تواند منجر به فرمی بهینه شود؛ این فرم می‌تواند در ایجاد یک فضای معماری 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

۱- مقدمه

سازه یکی از وجوه مهم معماری و از عوامل شکل‌گیری فرم است و از آنجاکه باعث دوام و ایستایی فرم می‌شود، در پیدایش آن اهمیتی کلیدی دارد. این نکته نه تنها فرم مصنوع و دست‌ساخته‌های بشر را در برمی‌گیرد بلکه فرم طبیعی را شامل می‌شود؛ زیرا فرم‌های طبیعی الگوی پیدایش ایده‌های ساختمانی بوده و فرم‌های ساختمانی همواره تقلیدی 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. در واقع 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، وجوه دیگری را نیز شامل شود. این وجوه، شامل انطباق فرم با مسیر انتقال نیرو و همچنین رعایت وجوه اقتصادی از جمله استفاده از حداقل مصالح و در نظر 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 برمی‌گزینند؛ بنابراین بهره‌گیری از اصول به‌کاررفته 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 راه‌حل زیستی؛ ۳. تعریف راه‌حل بیولوژیک؛ ۴. استخراج اصول؛ ۵. کاربری 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 خرابی با هدف به‌کاربردن آن در فضای معماری است.

۲. جستجو راه‌حل زیستی؛ به این منظور، عناصر طبیعی که از مقاومت استاتیکی مناسبی برخوردارند، نظیر صدف

آبالون، چوب، لانه‌ی مورخانه، استخوان، نوک پرندگان، 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 راه‌حل 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 به‌ازای 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 بدنبال بهینه‌سازی سازه ستون خرابی 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 گرکان<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 & McLean, 2008: 166). این خطوط، از پایین به بالا، در جهت ساعتگرد و پادساعتگرد چرخیده‌اند (دیاگرید<sup>۳</sup>). چون اعضای سازه‌ای مورب هستند، نیروی افقی، بهتر به زمین منتقل می‌شود (نسبت به سازه‌هایی که اعضای اصلی‌شان خطوط عمودی و افقی هستند). مزیت دیگر مارپیچ بودن اعضای سازه‌ای، انتقال یکنواخت‌تر نیروی افقی به زمین است. انتقال مناسب نیروهای سازه‌ای توسط فرم سازه‌ای دیاگرید، باعث شده است تا این سازه در دهه‌ی 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 اسبی<sup>۵</sup> به فرمی گفته می‌شود که در یک جهت انحنای محدب و در جهت عمود بر آن جهت

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

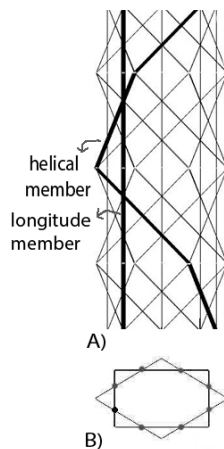


Fig. 3 Isotruss structure. A) Elevation. B) Plan (Gavade et al. 2016)

مثال‌های بیان‌شده در زمینه‌ی سازه‌های مارپیچ شکل، نشان‌دهنده‌ی نقش فرم مارپیچ در بهینه‌سازی سازه است. بنابراین با هدف بهره‌گیری و توسعه‌ی 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 برعهده استخوان‌ها، مفاصل، ماهیچه‌ها و تاندون‌ها است. در این سیستم، استخوان‌ها عمدتاً نیروهای فشاری و ماهیچه‌ها و تاندون‌ها نیروی کششی را تحمل می‌کنند. برای بررسی مکانیزم انتقال نیرو در استخوان، شناخت ساختار استخوان

انحنای مقعر داشته‌باشد (سالوادری، ۱۹۸۶: ۲۳۸). سازه‌ی تصویر ۲ در راستای طولی سازه، 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 انتهایی خطوط نسبت به ابتدای آن، به دور محور ستون چرخیده است. «ولادیمیر شوخوو»<sup>۹</sup> در دهه ۱۸۹۰ اولین سازه‌ی هذلولی (تصویر ۱ و ۲) در شهر «پلیبینو»<sup>۱۰</sup> در کشور روسیه با کاربری سازه نگهدارنده‌ی منبع آب را طراحی کرد. تحقیقات شوخوو در سال ۱۸۹۰ نشان داده است که ستون‌های به فرم زین‌اسبی یا هایپار<sup>۱۱</sup> می‌توانند عملکرد سازه‌های بهینه‌ای را از خود نشان‌دهند (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. هم‌اکنون نیز سازه‌ی هایپار در سازه‌ی برج‌های خنک‌کننده، برج دیدبانی، مخابرات و ... کاربرد دارد (Debney, 2012).

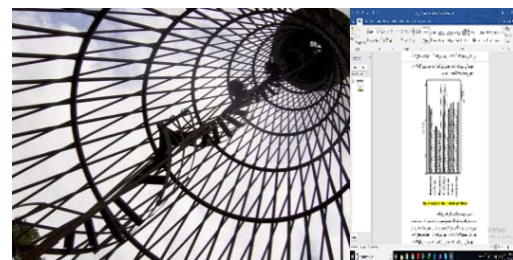


Fig. 1 Left: Hypar structure (wikivisually.com) Right: Gherkin Tower, London (www.arup.com)

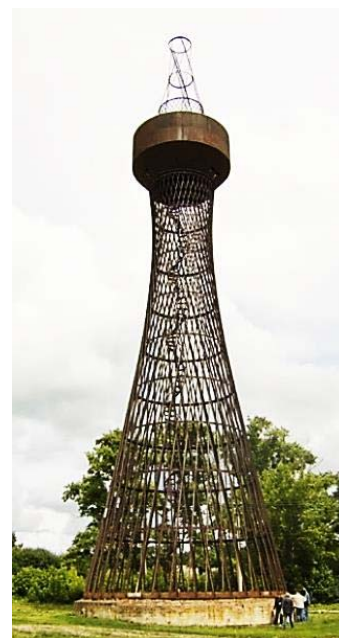


Fig. 2 Hypar structure (Debney 2012)

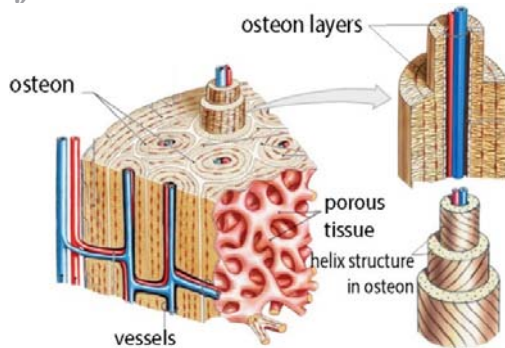


Fig. 5 Left: the section of cortical bone. Right: osteon structure. (www.easynotecards.com)

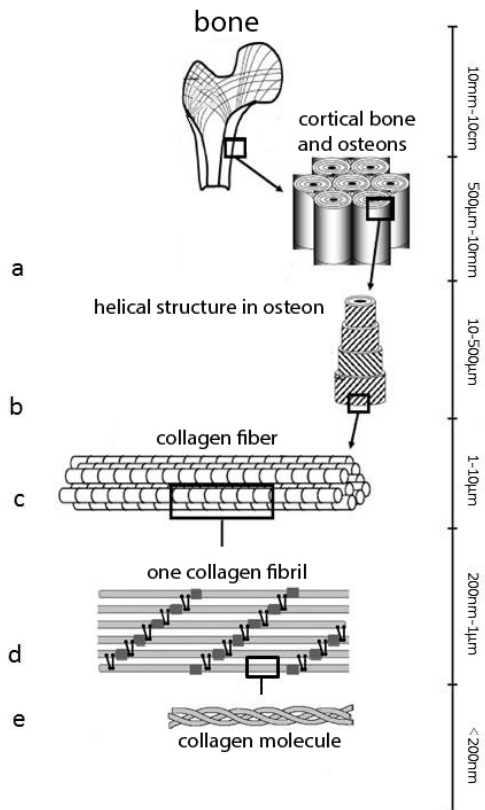


Fig. 6 Bone structure. A: cortical bone. B: helical structure in osteon. C: collagen fiber (one strand of osteon). Strands of the fiber are also helical; in the schematic form they are pictured linear. D: each strand of collagen fiber is called collagen fibril which is made by twisting collagen molecules. 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 با کاربرد 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 صورتی‌که چگالی بافت فشرده استخوان و فولاد نرمه به ترتیب برابر ۱.۸۵ (National Institute of Standards and Technology) و ۷.۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب (مبحث ۶ مقررات ملی ۱۳۹۲) می‌باشد.

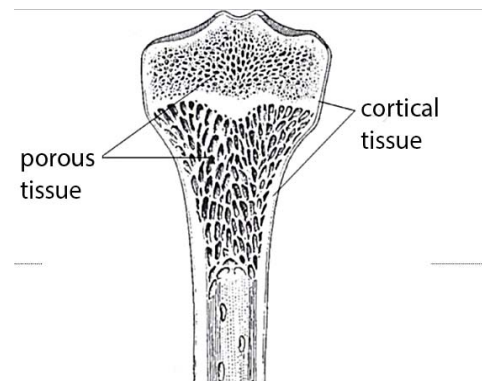


Fig. 4 Cortical and porous tissue in bone (Meyer et al. 2008)

از آنجا که در استخوان و فولاد نسبت مقاومت به چگالی به ترتیب حدوداً ۵۵۱.۳۵ و ۳۰۵.۷۳ به دست 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 تشکیل دهنده بافت فشرده‌ی 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 (تصویر ۶) (Scar, 2011).



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

جدا از مظاهر زیباشناسی فرم ماریچ، شناخت ساختار استخوان و نمونه‌های بررسی شده در بخش ادبیات موضوع نشان داد که فرم ماریچ دارای قابلیت‌های گسترده‌ای 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 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 خریای چرخانده‌شده به‌دور محور عمودی خود (ستون ماریچ)، مدل‌سازی شده و نحوه انتقال نیرو در آن با یک ستون خریای متعارف مقایسه می‌شود. در مدل‌سازی یکبار عملکرد سازه‌ها در برابر نیروی افقی یکسان (10kN)، و بار دیگر تحت نیروی عمودی یکسان (10kN)، بررسی می‌گردد. با توجه به اینکه (مطابق روال معمول تحلیل سازه‌ای) نیروی افقی و عمودی به بالای ستون وارد می‌شود، 4 نیروی مشابه 2/5 کیلونیوتنی، به بالای اعضای عمودی ستون متعارف و همچنین اعضای ماریچ 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 = 6 متر
- فاصله بین المان‌های افقی = 0.5 متر
- قطر سازه = 1 متر
- زاویه چرخش اعضای ماریچ = 90 درجه

وارد شده به استخوان را تحمل می‌کنند. در هر لایه‌ی استخوان شیب ماریچ‌ها متفاوت است (در تصویر 7 زوایای ماریچ در لایه‌های 1 تا 5 متفاوت است). براین اساس لازم است برای تعیین زاویه چرخش بهینه در ساختارهای ماریچ شکل، عملکرد سازه‌های ماریچ شکل در زوایای مختلف چرخش بررسی شود. ولی در ابتدا باید نحوه‌ی انتقال نیرو در ساختار ماریچ و تأثیر این فرم بر فضای معماری را بررسی کرد.

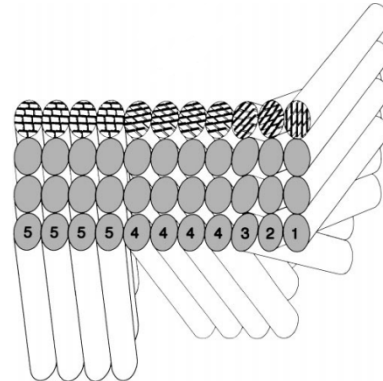


Fig. 7 Rotation angle of helices in osteon layers (Weiner, Traub, and Wagner, 1999)

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

پیش از این به مصادیق استفاده از ساختار ماریچ پرداخته شد و مزیت‌های این سیستم معرفی گردید با این حال جا دارد که به نقش فرم ماریچ از وجه زیبایی‌شناسی در معماری اشاره نمود. فرم ماریچ در معماری فرمی ملموس و آشناست و کاربرد آن در نقوش معماری، تداعی‌گر حرکت به سوی بالا و کمال است (پورجعفر و موسوی‌لر، 1381). از نمونه‌های آن می‌توان به فرم ستون‌های مسجد وکیل شیراز، حاشیه پیچ محراب مسجد حکیم (تصویر 8) و طرح زیر گنبد مسجد جامع اصفهان (تصویر 9) اشاره کرد.



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

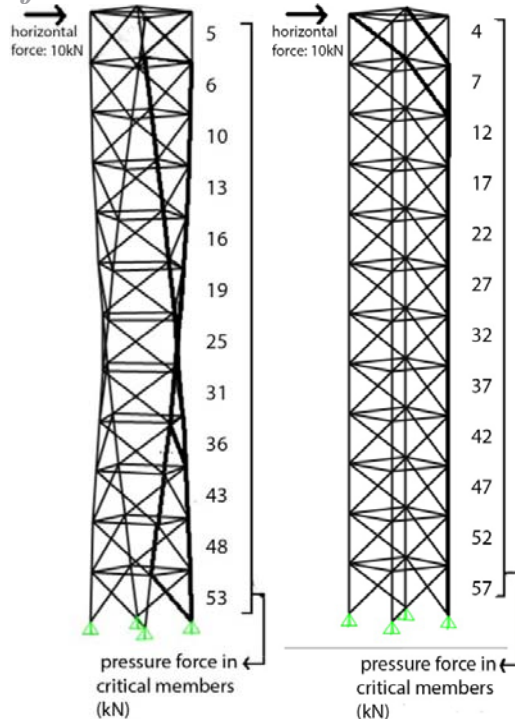


Fig. 12 maximum pressure force in simple and helical column (critical members at each level are presented thicker)

#### 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 برعهده 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 کامپیوتری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر نیروی فشاری در اعضای طولی ستون غیر مارپیچ برابر ۲.۵ کیلونیوتن و در اعضای مورب برابر صفر است. در ستون مارپیچ شکل نیروی فشاری اعضای مارپیچ و مورب به ترتیب برابر ۲.۲ و ۰.۵ کیلونیوتن بوده و توجیه تئوری ارائه شده تأیید می‌گردد.

#### 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>۱۲</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 خنثی پلان ستون، نیروی فشاری نزدیک به صفر است. طبیعی است که نیروی عضو ۴ بصورت کششی می‌باشد.

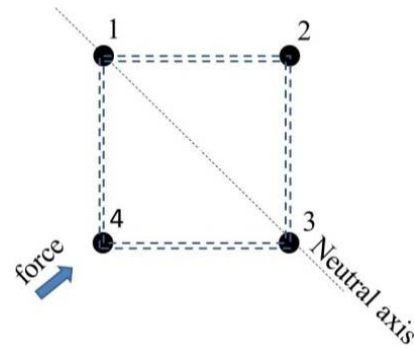


Fig. 10 Plan of helix and simple column at the height of 0 meters (the base level)

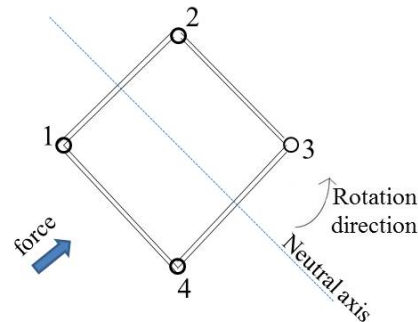


Fig. 11 Plan of helix column with 90 degree rotation at the height of 3 meters

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 بحرانی‌ترین 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 مقادیر 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)

#### ۵-۱- مدل‌سازی

شبه‌سازی و مدل‌سازی در نرم‌افزار تحلیل سازه SAP2000 انجام شده و در مدل‌سازی بار زلزله و بار وزن سکو همزمان 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 خریایی مارپیچ تحت زوایای مختلف مدل‌سازی شده و تحلیل سازه‌ی آن تحت بارگذاری‌های مختلف انجام گردیده است. در نهایت وزن سازه مارپیچ با ستون خریایی متعارف مقایسه شده است.

در فرآیند یافتن فرم بهینه، حالات چرخش مارپیچ، با زاویه‌های چرخش صفر، ۲۲.۵، ۴۵، ۶۷.۵ و ۹۰ و ۱۳۵ درجه (تصویر ۱۶)، مدل‌سازی شده و وزن سازه طراحی شده در هر یک از این حالات برای مقاومت در برابر بارهای وارده با یکدیگر مقایسه شده است. مجموع بار مرده و زنده برای کاربری مذکور، ۶ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است.<sup>۱۷</sup>

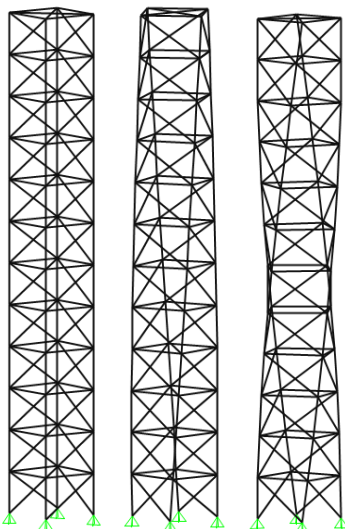


Fig. 16 form of columns with 0, 45, and 90 degrees (The rotation states of 22.5, 67.5 and 135 degrees have not been displayed)

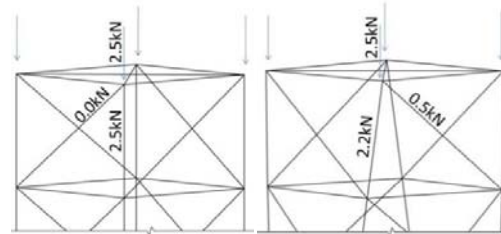


Fig. 13 Pressure force in effect of vertical load in upper part of helix and simple columns (For greater clarity, forces are only shown in one of the nodes)

#### ۵- ارزیابی سازه ستون نظرگاه<sup>۱۳</sup> و بهینه‌سازی زاویه چرخش اعضا

در این بخش با تعریف کاربری برای ستون و تحلیل سازه‌ی آن، عملکرد فرم مارپیچ بررسی می‌شود. با توجه به تراش فرمی که در فرم ستون مارپیچ وجود دارد، این ستون می‌تواند برای فرم‌های سازه‌ی نمایان<sup>۱۴</sup>، کاربرد بیشتری داشته باشد. با این پیش‌فرض، عملکرد نظرگاه کاربری مناسبی است؛ بنابراین، کاربری ستون مذکور، سازه‌ی نگهدارنده‌ی نظرگاه فرض شده است.

نظرگاه به سکویی مرتفع برای نگاه کردن و اندیشیدن به مناظر اطراف، گفته می‌شود (طیبی‌فر، ۱۳۸۹)، مانند دو نظرگاه در بوستان حضرت ابراهیم (آب و آتش) در تهران (تصویر ۱۴) و برج جوبیلی<sup>۱۵</sup> در شهر وینای<sup>۱۶</sup> 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 سازه‌ی آن، 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)

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

مقطع اعضای ستون، لوله از جنس فولاد St-52 با نسبت قطر به ضخامت ۲۷/۳ در نظر گرفته شده است که متناظر با لوله‌ای به قطر ۸۸/۹ mm و ضخامت ۳/۲mm (مستخرج از جدول اشتال) به‌عنوان پیش‌فرض می‌باشد. همچنین ابعاد مقاطع مارپیچ در طول ستون ثابت اختیار شده است به نحوی که بار وارد بر مقطعی از مارپیچ که بیشترین نیرو را تحمل می‌کند، حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد (نسبت تنش یا Stress Ratio) نیروی مجاز آن باشد. البته مقاطع اعضای افقی و مورب متناسب با نیرویی که بر آنها وارد می‌شود، متغیر بوده و با استفاده از مقاطع تعریف شده، (لوله به قطر ۱۳، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۷، ۲۹، ۳۱، ۳۳ و ۳۶ میلیمتر) مقطع مناسب با کمترین وزن توسط نرم‌افزار انتخاب شده است.

با توجه به تأثیر مساحت سکو بر میزان بار وارده بر ستون، سطح سکو به صورت پیش‌فرض، پنج حالت ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ مترمربع در نظر گرفته شده است. در این حالات، بار کل سکو ۳۶، ۵۴، ۷۲، ۹۶ و ۱۰۸ کیلو نیوتن بوده و بار زلزله با توجه به ضوابط بند ۵-۳ ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، ۱۰ درصد وزن سکو، محاسبه شده است.

#### ۵-۲- فرض‌های مدل‌سازی

ابعاد سازه‌ی نظرگاه به شرح زیر فرض شده است:

- ارتفاع سازه ستون = ۶ متر
- فاصله بین المان‌های افقی = ۰.۵ متر
- قطر سازه = ۱ متر

بار وزن سکو و نیروی زلزله به بالای اعضای مارپیچ وارد شده و مقاطع ستون مقاومت کافی در برابر بار افقی در دو جهت اصلی و دو راستای فرعی با زاویه ۴۵ 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

Total	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.
	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

شکل کاهش یافته و در نتیجه قطر لوله مارپیچ کاهش می‌یابد. با وجود افزایش کلی طول مارپیچ‌ها در اثر افزایش زاویه چرخش به دلیل کمتر شدن قطر لوله مارپیچ، وزن کل اعضای 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 ستون تا حدود زاویه‌ی ۴۵ درجه، وزن سازه رو به کاهش می‌گذارد، ولی با افزایش بیشتر 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 مدل‌سازی‌های فوق تأثیر عملکرد همزمان این دو نوع نیرو بررسی شده است. نظر به

#### ۵-۳- تحلیل داده‌ها بر اساس سیستم‌های انتقال نیرو

به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی مارپیچ بر رفتار سازه‌ی ستون 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 ۳۰ حالت مختلف، مدل‌سازی و تحلیل‌ها انجام شده است. در هر یک از این مدل‌ها، براساس مقادیر مختلف زاویه چرخش برای ستون، مشخصات فیزیکی لوله‌های مارپیچ، نیروی بحرانی‌ترین 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 ستون با سکویی به مساحت ۱۸ مترمربع در جدول ۱ آورده شده است، با اعمال چرخش در مرکز پلان ستون، 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 فوقانی 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.

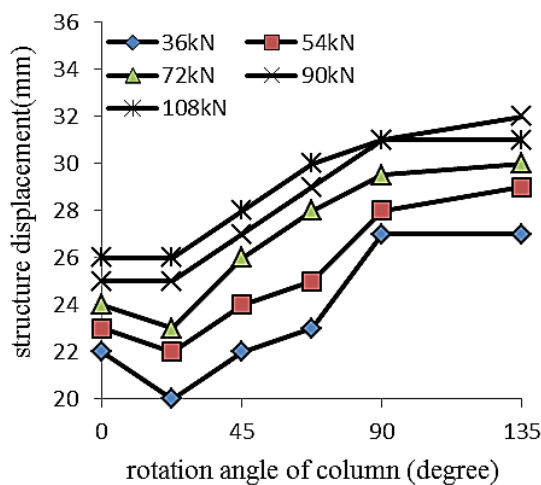


Fig. 18 Maximum displacement of structure in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (horizontal load corresponding to the vertical load are imposed to the structure)

در تصویر ۱۹ تغییرات وزن سازه برحسب تغییرات زاویه چرخش ماریچ در ستون به‌ازای مقادیر مختلف بارهای قائم طراحی شده (همراه با بار زلزله‌ی متناظر) ارائه شده است. همانطور که در این تصویر دیده می‌شود به‌ازای کلیه‌ی ترازهای بارهای قائم مورد بررسی، با افزایش زاویه چرخش ستون تا حدود ۴۵ درجه، وزن سازه‌ی ماریچ کاهش یافته ولی با رشد بیشتر زاویه‌ی مذکور، این پارامتر فزونی می‌یابد. برای مثال در حالت بارگذاری ۱۰۸ کیلو نیوتن 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 ماریچ شکل ایجاد می‌گردد، بحرانی‌ترین اعضای سازه، ماریچ‌ها بوده و در تصویر ۱۷ روند تغییر نیروی فشاری در اعضای ماریچ شکل با افزایش زاویه چرخش ستون به‌ازای مقادیر مختلف بار قائم و زلزله ارائه شده است.

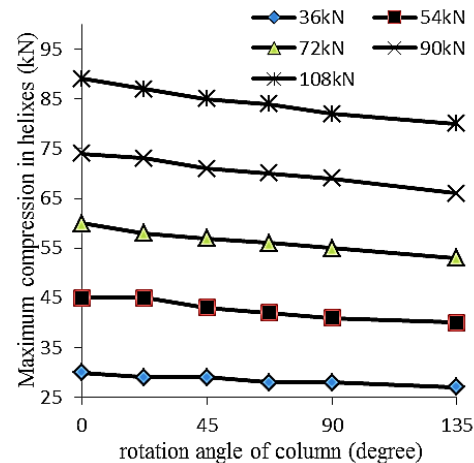


Fig. 17 The variation of the maximum compressive force in the helices in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (horizontal load corresponding to the vertical load are imposed to the structure)

در تصویر مذکور، در تمام حالات بارگذاری با افزایش زاویه چرخش ستون، حداکثر نیروی فشاری در اعضای ماریچ شکل، روند نزولی و یکنواختی پیدا می‌کند. برای مثال در حالتی که بار قائم اعمالی برابر با ۹۰ kN باشد، در خریای متعارف (ستون با چرخش پلان صفر درجه)، حداکثر نیروی فشاری در اعضای ماریچ شکل حدود ۷۴ کیلو نیوتن است. با افزایش زاویه چرخش ستون، حداکثر نیروی فشاری در اعضای ماریچ شکل، کاهش یافته به طوری که در زاویه چرخش ۱۳۵ درجه حداکثر نیروی فشاری به عدد ۶۶ کیلو نیوتن می‌رسد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که چرا با افزایش زاویه چرخش المان‌های سازه‌ای، وزن کلی سازه تا زاویه ۴۵ درجه، کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که با افزایش زاویه چرخش بیش از ۴۵ درجه، با وجود کاهش نیروی فشاری در المان‌های ماریچ، به دلیل افزایش نیرو در المان‌های مورب، وزن سازه روند صعودی پیدا می‌کند. بنابراین، زاویه مناسب برای طراحی ستون ماریچ مورد نظر، زاویه ۴۵ درجه است و با انتخاب این زاویه، فرم بهینه حاصل می‌شود.

در تصویر ۱۸ بیشترین جابجایی در مفصل‌های ستون بر

بدهی است که برای بررسی بهینه بودن طرح از نظر اقتصادی، علاوه بر در نظر گرفتن وزن مصالح مصرف شده هزینه اتصالات سازه و نیروی کار نیز باید بررسی شود. با توجه به تشابه نسبی اتصالات در اعضای ستون متعارف و ماریچ با زاویه چرخش محدود، هزینه‌های مذکور احتمالاً تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. از این رو می‌توان با در نظر گرفتن وزن مصالح مصرف شده نتیجه گرفت که سازه نظرگاه مدل‌سازی شده در زاویه چرخش ۴۵ درجه، می‌تواند از نظر اقتصادی، بهینه باشد. همچنین با توجه به زیبایی ستون ماریچ، افزایش وزن سازه در زوایای بیشتر از ۴۵ درجه برای کاربری‌های خاص مانند سازه‌های نمایان<sup>۹</sup> و یا نمادین می‌تواند قابل توجیه باشد.

ظرافت و زیبایی ستون ماریچ امکان طراحی ستون اکسپوز را به معماران می‌دهد، چرا که غالباً معماران با نازک‌کاری سعی در مخفی کردن سازه‌ی ستون‌هایی با پروفیل‌های فولادی دارند. چنین فرمی علاوه بر سازه‌ی نظرگاه می‌تواند در سالن‌های بزرگ، پل عابر پیاده، سازه‌ی نگهداره‌ی آنتن‌های مخابراتی و ... کاربرد داشته باشد. در عین حال، فرم ماریچ علاوه بر آنکه باعث زیبایی فضای معماری و منظر شهری می‌شود، تداعی‌کننده اوج و کمال بوده و تخلخل این فرم ارتباط بصری را افزایش و دید بهتری ایجاد می‌کند. این در حالی است که فضای داخل ستون نیز می‌تواند جزئی از فضای معماری باشد.

#### ۶- نتیجه

هدف این پژوهش بهینه‌سازی فرم از نظر سازه‌ای با تأکید بر طراحی فرم بهینه برای ستون یک نظرگاه است. با این هدف تلاش شد تا با بهره‌گیری از دانش بایونیک از ساختار استخوان الهام گرفته شود و با مطالعه ساختار فرم ماریچ و مکانیزم انتقال نیرو در ساختار آن، راه حل مناسبی برای ایجاد فرم بهینه پیشنهاد گردد. برای بررسی تأثیر چرخش در مقاومت سازه‌ای، ستون خریای چرخانده شده (حول محور اصلی) و ستون خریای متعارف (غیرماریچ) در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شد. در اثر اعمال نیروی افقی و نیروی عمودی به‌طور جداگانه، چنین نتیجه گرفته شد که تغییر در نحوه انتقال نیرو در اعضای ماریچ شکل باعث می‌شود تا ستون مذکور نیروی افقی را بهتر از ستون متعارف تحمل کرده و در نهایت وزن کمتری داشته باشد.

با تعریف کاربری نظرگاه برای ستون ماریچ‌شکل، رفتار ستون در تحمل وزن سکوی نظرگاه و بار زلزله تحلیل شد. با مقایسه ستون متعارف و ستون ماریچ تحت زوایای مختلف، مشاهده گردید که در اثر اعمال چرخش به اعضای

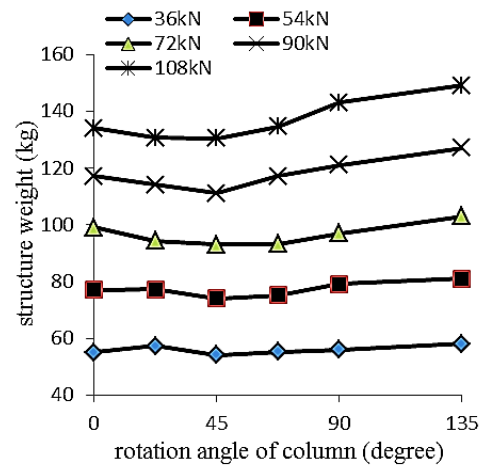


Fig. 19 Maximum weight of structure in terms of the rotation angle for different values of the vertical loads included in the design (with corresponding earthquake load)

همانطور که در بخش مکانیزم انتقال نیروی عمودی بیان شد، در اعمال نیروی عمودی به ستون ماریچ، اعضای مورب بخشی از نیروی عمودی را تحمل نموده و در نتیجه به مقاطع قوی‌تری نسبت به ستون متعارف نیاز دارند. از سوی دیگر با افزایش زاویه چرخش، وزن اعضای ماریچ شکل کمتر می‌شود. بر پایه نتایج مدل‌سازی، ایجاد چرخش محدود در پلان ستون، باعث پایین آمدن وزن کلی سازه می‌شود. این کاهش وزن ستون، حاصل برآیند کاهش وزن اعضای ماریچ شکل و افزایش وزن اعضای مورب است. حال آنکه با رشد زاویه چرخش، وزن کلی سازه افزایش می‌یابد. از این رو با توجه به محدود بودن تعداد زوایای چرخش انتخابی در مدل‌سازی چنین برداشت می‌شود که سازه تقریباً در زاویه ۴۵ درجه کمترین وزن را داراست. بررسی‌های تکمیلی نشان می‌دهند که در حالت اعمال نیروی قائم ۷۲ کیلو نیوتنی در قیاس با سایر حالات بارگذاری، بیشترین کاهش وزن نسبت به سازه غیر ماریچ رخ می‌دهد که کاهش معادل ۶ درصد است.

نکته دیگر آنکه هرچه بارگذاری بیشتر شود، مقدار افزایش وزن ستون در زاویه چرخش ۱۳۵ درجه نسبت به ستون متعارف افزایش می‌یابد. برای مثال تحت بار قائم ۳۶ کیلو نیوتن (همراه با بار زلزله متناظر)، افزایش وزن تنها ۵ درصد است درحالی‌که در نیروی ۱۰۸ کیلو نیوتن این مقدار به ۱۱ درصد می‌رسد. دلیل این پدیده می‌تواند وابستگی زیاد جابجایی سازه به نیروی اعمال شده به ستون باشد زیرا هرچه جابجایی سازه بیشتر شود، لنگر خمشی بیشتری در درون اعضای ماریچ ستون (که با اتصال صلب به یکدیگر متصل شده‌اند) ایجاد گردد و در نتیجه به اعضای قوی‌تری نیاز 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 توجه 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 چشم‌نواز بودن در منظر شهری، تداعی‌گر مفهوم کمال نیز می‌باشد

طولی ستون، نیروی فشاری اعضای مارپیچ‌شکل و در نتیجه وزن آن‌ها کاهش می‌یابد. نظریه‌اینکه اعضای مارپیچ شکل همان اعضای بحرانی ستون خریایی هستند و بیشترین نیرو را تحمل می‌کنند، قوی‌ترین 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

#### پی نوشت:

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 خریا باشد زیرا فقط در این حالت است که تنها یکی از چهار عضو عمودی خریا نیروی فشاری را تحمل می‌کند.

#### 13. Observation Tower یا Sightseeing Tower

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

#### 15. Jubilee Tower

#### 16. Vienna

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

۱۸. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، جابجایی مجاز در ساختمان‌های تا ۵ طبقه برابر ۰.۰۲۵ ارتفاع سازه است. بنابراین در صورت کاربرد همین محدودیت برای نظرگاه:

$$\text{مجاز} = ۰.۰۲۵ \times ۶۰۰۰ = ۱۲۰ \text{ mm}$$

تغییر مکان واقعی ساختمان از ضرب تغییر مکان ساختمان در اثر بار زلزله تخفیف یافته در ضریب  $C_d$  بدست می‌آید. طبق جدول ۵-۲ در استاندارد ۲۸۰۰ ضریب  $C_d$  برای سازه‌های تفریحی و بناهای یادبود برابر ۲.۵ است و طبق مدل‌سازی، حداکثر تغییر مکان سازه در اثر بار زلزله تخفیف یافته برابر ۳۰ میلی‌متر است، بنابراین:

$$۷۵ \text{ mm} = ۳۰ \times ۲.۵ = \text{تغییر مکان واقعی سازه‌ی نظرگاه}$$

تغییر مکان سازه‌ی نظرگاه کمتر از تغییر مکان مجاز در سازه‌های ساختمانی است (۷۵ > ۱۲۰)؛ چون جابجایی مجاز در سازه‌های ساختمانی کمتر از سازه‌های غیر ساختمانی است، بنابراین تغییر مکان نظرگاه کمتر از تغییر مکان مجاز در سازه‌های غیر ساختمانی است.

#### 19. Expose

#### فهرست منابع:

۱. پورجعفر، محمدرضا و موسوی‌لر، اشرف (۱۳۸۱). بررسی ویژگی‌های حرکت دورانی مارپیچ اسلیمی یادمان تقدس، وحدت و زیبایی، علوم انسانی الزهر، 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). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۴.
۴. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲). مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بارهای وارد بر ساختمان.
۵. الوادری، ماریو (۱۹۸۶). سازه در معماری، ترجمه: محمود گلابچی، تهران: دانشگاه تهران.

۶. طیبی فر، مهسا (۱۳۸۹). بررسی نقش نظرگاه‌ها در منظر شهری، مجله علمی - ترویجی منظر، ۲ (۹)، صص. ۵۲-۵۴.  
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 (2104). 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/hyperbolod-structures-in-gsa/>.