

کالبد انعطاف‌پذیر با تلفیق معماری و سازه با بهره‌گیری از اوریگامی

آناهیتا زنده دلان^{۱*} - حسین خسروی^۲ - الهه صفائیان^۳

۱. استادیار گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران (نویسنده مسئول).
۲. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
۳. کارشناس ارشد معماری، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات خراسان رضوی، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۰۳ تاریخ اصلاحات: ۹۵/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۰۲/۳۰ تاریخ انتشار: ۹۸/۰۹/۳۰

چکیده

انعطاف‌پذیری یکی از مفاهیم کلیدی در الفبای شکل‌گیری معماری می‌باشد، که در بخش کالبدی کمتر به آن توجه شده و بیشتر از گونه تنوع‌پذیری یا طراحی پلان آزاد در مقیاس خرد به آن پرداخته شده است. زمانی که کالبد فضای معماری نیازمند انعطاف‌پذیری باشد، باید علاوه بر معماری، سازه نیز طراحی شود، زیرا مهم‌ترین چالش در بررسی انعطاف در کالبد معماری، سازه است و باید انعطاف در بدنه ساختمان یعنی در مقیاس کلان صورت پذیرد. هدف این مقاله بررسی انعطاف‌پذیری در کالبد معماری است که به این منظور باید سازه با معماری رفتاری هماهنگ داشته باشد. فناوری اوریگامی با استحکام و انعطاف‌پذیری ساختار خود انعطاف کالبدی و پایداری سازه را به همراه دارد و به همین علت مورد توجه مهندسان معماری و سازه واقع شده است. در این رابطه از اوریگامی به‌عنوان یک عامل پیونددهنده سازه و معماری استفاده شد. الگوی الماسی اوریگامی که دارای ویژگی‌های موردنظر در انعطاف‌پذیری معماری و پایداری سازه است با ورق فولادی به روش مدل‌سازی با نرم‌افزار المان محدود تحت آزمون بارگذاری قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوی اوریگامی الماسی با تلفیق معماری و سازه در کالبد بنا، انعطاف لازم را جهت انطباق با شرایط محیطی مختلف فراهم می‌سازد و انطباق‌پذیری الگوی الماسی در تمام زیرشاخه‌های تطبیق‌پذیری میسر می‌شود.

واژگان کلیدی: انعطاف‌پذیری، انطباق‌پذیری، کالبد، سازه، اوریگامی.

۱. مقدمه

انعطاف‌پذیری معماری یعنی پاسخگویی به شرایط جدید که همواره ضرورتی جدایی‌ناپذیر از معماری است (Mahdavi-nejad, Farajolahi-rad, & Karam, 2011, p. 1). این امر زمانی محقق می‌شود که سازه برای انعطاف معماری مانع تلقی نشود. امروزه روش‌های ساخت و ساز سنتی دیگر پاسخگوی شرایط جدید نیست، هرچند روش ساخت و ساز صنعتی نیز همواره موفق نبوده و موجب عدم انعطاف در ساختمان می‌شود، که در آن صرفاً به نیازهای متعارف حال حاضر توجه دارد و به نیازهای آینده توجهی نشده است (Einifar, 2003, p. 65). برای انعطاف‌پذیر نمودن کالبد ساختمان باید از فناوری در طراحی سازه بهره جست، چرا که از آغاز تاریخ مدون معماری سه مقوله «سازه، معماری و فناوری» به معنای اصلی خود در هر زمان یکی بودند (Baghaei, 2009, p. 28) و روشن است که معماری و سازه با هم خوشایندی نزدیک دارند، به نحوی که سیستم‌های سازه‌ای کارکردی به مثابه سیستم‌های اصلی محورسازی هستند و معمولاً به شیوه‌ای صادقانه بیانگر فرم معماری بودند (Ching, Onouye, & Zuberbuhler, 2013, p. 134). انعطاف‌پذیری در طراحی معماری به طور عمده مربوط به طراحی «فرم فضایی» و ساخت و ساز آن است، به این ترتیب معماران اغلب تمایل به توسعه فرم‌های معماری متنوع و غیرمعمول دارند.

سازه مهم‌ترین چالش در معماری انعطاف‌پذیر جهت حفظ ایستایی ساختمان، دارای فرم و موقعیتی ثابت است تا نیروهای استاتیکی و دینامیکی را کنترل کند (Moore, 1999, p. 10). بنابراین برای ایجاد انعطاف در کالبد باید سازه نیز منعطف طراحی شود تا از طریق کالبد فضا بین سازه و معماری هماهنگی ایجاد نمود.

اوریگامی با دو ویژگی استحکام ساختاری و شکل‌پذیری موجب پیوند مهندسی سازه و معماری می‌شود (Schenk & Guest, 2011, p. 4). چنین ترکیبی منجر به یک ساختار قوی و کارآمد با مزایای بیشتر نسبت به اشکال سنتی ساخت و ساز می‌شود (Ahmed, Wan Badaruzzaman, & Wright, 2000, p. 126). در علوم متعدد از اوریگامی به‌عنوان راهکار استفاده شده است و کاربردی بودن آن غیر قابل انکار است، اما هدف این تحقیق بهره‌گیری از ویژگی انعطاف‌پذیری اوریگامی الماسی جهت خلق معماری انعطاف‌پذیر کالبدی است. این انعطاف‌پذیری در مقیاس کلان و کاربردی زمانی میسر می‌شود که الزامات سازه نیز رعایت شود تا به ساختار متعادلی رسید.

بنابراین گونه‌ها و مقیاس‌های انعطاف‌پذیری در معماری و همچنین الزامات سازه و انواع ارتباط بین سازه و معماری بررسی شد و در ادامه با بیان مفهوم اوریگامی و بررسی ویژگی‌های آن تأثیر این فناوری بر سازه و انعطاف کالبد

مشخص شد. در نهایت بهترین روش هماهنگی سازه با معماری معین شد.

۲. مبانی نظری

جهت طراحی یک فضای انعطاف‌پذیر شناخت تعریف و عوامل دخیل در آن ضروری است. از این رو در ادامه به تعریف مفهوم انعطاف‌پذیری و گونه‌های انعطاف‌پذیری در معماری پرداخته می‌شود که به شرح ذیل می‌باشد.

۲-۱- تعریف و مفهوم انعطاف‌پذیری در معماری

انعطاف در لغت به معنی دوتاشدن و بازگردیدن و خم شدن است و انعطاف‌پذیر یعنی آنچه خمیدگی و برگشتگی‌پذیری دارد (Dehkoda, 1998, p. 3765). در زبان انگلیسی واژه Flexibility، به معنای قابلیت تغییر در اشیا و اجسام است و از نظر لغوی صفتی است به معنای قابل تغییر بودن به گونه‌ای که این تغییر به راحتی و طبق شرایط انجام می‌گیرد و با واژه (Changeable) معادل قرار داده شده (Cambridge Dictionary, 2013). واژه انعطاف‌پذیری در معماری عبارت است از فضای انسان ساخت برای پاسخگویی به شرایط و نیازهای جدید. انعطاف‌پذیری به‌عنوان سازگار شدن با تغییرات در فضا به مسائلی اشاره می‌کند که به نیازهای حال و آینده کاربران ارتباط دارد (Schneider & Till, 2005, p. 287).

۲-۲- گونه‌های انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری در سه گروه کلی زیر قابل دسته‌بندی می‌باشد:

۲-۲-۱- تنوع‌پذیری

قابلیت فراهم‌سازی استفاده مختلف از یک فضا را تنوع‌پذیری می‌گویند. تنوع‌پذیری آزادی انتخاب برای استفاده‌های متنوع می‌باشد و باعث می‌شود که کاربران براساس نیازشان انتخاب کنند (Albotan, 2009, p. 1). به‌عبارت دیگر همان خاصیت چند عملکردی یک فضا است، که در زمان‌های مختلف عملکردهای مختلف را پوشش دهد. به‌طور کلی دو مقوله زمان و فضا پیوستگی درهم آمیخته‌ای با هم دارند و از هم قابل تفکیک نیستند همانگونه که هرمان مینکوسکی^۱ بیان می‌دارد: «زمان به تنهایی و فضا به تنهایی محکوم به نیستی است، تنها وحدتی از این دو حیات آن‌ها را میسر می‌سازد» (Ching, 2014, p. 134). هر فضایی به‌صورت بالقوه امکان تبدیل شدن به مکان را دارد و این امر در طول زمان و توسط انسان شکل می‌گیرد (Erabi, 2011, p. 14).

۲-۲-۲- تغییرپذیری

قابلیت توسعه یا تجمیع از لحاظ افزایش و یا کاهش کمی زیر بنای فضا، یا تفکیک و امکان بازگشت به طرح اولیه پس

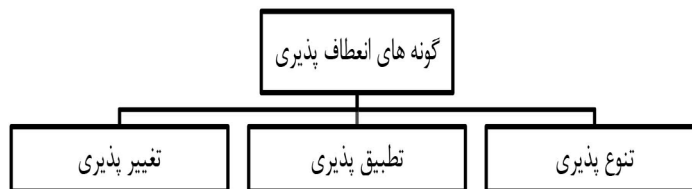
دستیابی به شرایط و نیازها و کاربست‌های جدید است (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989).

۲-۲-۳- تطبیق‌پذیری

به قابلیت هماهنگ شدن یک فضا با شرایط جدید و مورد نیاز تطبیق‌پذیری می‌گویند. این فضا در یک زمان و در زمان‌های مختلف می‌تواند پاسخگوی عملکردهای گوناگون باشد (Venturi & Scully, 1977, p. 49). پیروی از الگو و هندسه اصلی امکان طراحی فضای انعطاف‌پذیر و قابل تطبیق با شرایط در دوره‌های مختلف را برآورده می‌نماید (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989, p. 70). تطبیق‌پذیری شامل عوامل سازماندهی فضایی، عوامل کارکردی و عوامل کالبدی می‌شود. گونه‌های انعطاف‌پذیری در شکل ۱ نمایش داده شده است.

از گسترش و یا تقلیل مساحت را تغییرپذیری می‌گویند. این ویژگی ارتباط مستقیم با نوع عملکرد فضا، شکل، فرم و ابعاد مجموعه‌ای دارد که فضا در آن مستقر می‌شود. تغییرپذیری ممکن است به صورت ساختاری، عملکردی یا فضایی قابل مشاهده باشد (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989). این ویژگی بیشتر با کالبد فضا درگیر است، زیرا با توسعه و تجمیع کالبد می‌توان مساحت و ظرفیت را تغییر داد. بنابراین کالبد فضا باید قابلیت تغییر داشته باشد تا دارای انعطاف‌پذیری باشد، همانطور که از دیدگاه لنگ «انعطاف‌پذیری در معماری به فضایی گفته می‌شود که برای پاسخگویی به نیازهای مختلف قابل تغییر باشد» (Lang, 1987, p. 201). به بیان دیگر «انعطاف‌پذیری یعنی سازگار شدن با تغییرات فضا» (Schneider & Till, 2005, p. 2). به طور کلی انعطاف‌پذیری فضایی و سازماندهی فضای انسان ساخت و تغییر در آن، برای

شکل ۱: نمودار گونه‌های انعطاف‌پذیری



ب- محل قرارگیری عناصر معماری: ویژگی‌های کالبدی به عواملی دیگری چون محل قرارگیری درها و پنجره‌ها نیز وابسته است که به میزان زیادی تطبیق‌پذیری فضا را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Lang, 1987, p. 119). اصولاً نحوه نفوذ نور و گذر آن از پوسته به درون به دست آوردن روشنایی در فضا، سبب شکل‌گیری فرم و نمای ساختمان می‌شود و بدون نور مؤلفه‌های فرم و فضا غیر قابل درک می‌باشد (Erabi, 2011, p. 138).

ج- شکل و فرم: اگرچه خلق فضا هدف اصلی طراحی معماری است و این فضا است که ما را در بر می‌گیرد و رفتارها و فعالیت‌ها در آن رخ می‌دهد، اما جهت خلق این فضا نیازمند طراحی مناسب فرم هستیم. به کلیت، جسمیت و ظاهر یک پدیده فرم می‌گوییم که در راستای بیان موضوع، معنا یا محتوایی از موادی خاص شکل گرفته است. تأثیر مواد سازنده در شکل‌گیری فرم امکانات و محدودیت‌های هر ماده در فرم‌پذیری نیز بیانگر تعامل و تأثیر محتوای خواص و مواد اولیه در شکل‌گیری فرم است (Erabi, 2011, p. 64). گمبریچ^۲ معتقد است که عملکرد اجسام از طریق بازنمایی آن‌ها در ذهن تعریف می‌شود. در اندیشه سالیوان^۳ «فرم عملکرد را متجلی می‌سازد»، «فرم تأمین‌کننده عملکرد است». و نتوری ساختمان چند عملکردی را از لحاظ کالبدی فضایی می‌داند که از نظر برنامه و فرم دارای پیچیدگی، ولی قابل قبول به‌عنوان یک

۲-۲-۳-۱- عوامل کالبدی

با توجه به هدف مقاله در ادامه صرفاً به بیان بخش کالبدی تطبیق‌پذیری می‌پردازیم. مفهوم کالبد به قالب بنا بر می‌گردد، یعنی هر چیزی که قابل لمس و مشاهده در بنا باشد. یکی از عوامل تأثیرگذار بر ایجاد فضای «تطبیق‌پذیر» کالبد بنا است، که در روند طراحی خود را با شرایط وفق می‌دهد و به عواملی چون ابعاد و اندازه، هندسه، فرم و شکل، تنوع و گوناگونی فضا بستگی دارد (Sheppard & Town, 1974, p. 86).

الف- ابعاد و اندازه: همه ابعاد معماری از فرم و فضا، معنا و مفهوم، عملکرد و کارایی آن وابسته به سرشت و سرنوشت انسان، خواسته‌ها و نیازهای بشری شکل می‌گیرد. تناسبات فضا تحت تأثیر مصالح (آجر، بلوک و غیره)، مسائل و سیستم‌های سازه (دهانه تحت پوشش)، عناصر و اجزا استاندارد شده (در، پنجره، فرش و غیره) و محدودیت‌ها و امکانات آن‌ها دارد. همچنین تناسبات انسان، برداشت و ذهنیت آن، تعداد افراد، رفتار، عملکرد و مبلمان نقشی تعیین‌کننده در ابعاد و اندازه فضای معماری دارند (Erabi, 2011, p. 212). ابعاد و اندازه در عمق و ارتفاع کالبد و اندازه فضای داخلی و عناصر معماری قابل بررسی است و هرچه دسترسی به فضا راحت‌تر باشد فضا از تطبیق‌پذیری بیشتری برخوردار است (Bentley, 1985). (p. 178)

کل باشد. پیچیدگی باعث ایجاد ابهام می‌شود و ابهام باعث ایجاد تطبیق‌پذیری می‌شود (Venturi & Scully, 1977, p. 49). یکی از خصوصیات سیستم‌های پیچیده ماهیت انطباق‌پذیری آن‌هاست، این سیستم‌ها منفعل نیستند؛ بلکه به شکلی فعال از خود واکنش نشان می‌دهند تا هر رخدادی را به نفع خود واکنش نشان‌دهنده، گونه‌های مختلف خود را با محیط منطبق می‌کنند (Bemanian, Amirkhani, & Leilian, 2010, p. 91).

د- تنوع و گوناگونی: تنوع و گوناگونی در فضا جهت تطابق با محیط و عملکرد در زمان‌های مختلف مؤثر است. این گوناگونی می‌تواند در تعداد، اندازه و مساحت، شکل و فرم، رنگ و غیره صورت پذیرد. به طوری که به گفته هرترز برگر^۴ استفاده‌کنندگان بتوانند فضا را براساس خواسته خودشان انتخاب کنند (Albotan, 2009, p. 74). تولید فضا می‌تواند از تکثیر یک عنصر تکراری به‌طور آزادانه صورت گیرد. اگر راهکارهای گوناگونی جهت نحوه تداخل احجام بیافرینیم باعث تنوع‌پذیری می‌شویم. این کار با این‌که دارای یک پایه مدولار است اما دارای تنوع در ترکیب است زیرا آزادانه صورت می‌پذیرد. در این راستا، مشخصات قطعات، نوع تداخل و میزان نفوذ در هم آن‌ها در تنوع ترکیبی نهایی بسیار مؤثر است (Erabi, 2011, p. 132).

۲-۳- مقیاس‌های انعطاف‌پذیری

شناخت مقیاس‌های مختلف انعطاف‌پذیری به درک بهتر مفهوم انعطاف‌پذیری کمک می‌کند. عینی‌فر و همکارانش (۱۹۸۹) در مقاله تحت عنوان بررسی و مقایسه انعطاف‌پذیری در معماری مسکونی ایران و ژاپن مقیاس‌های انعطاف‌پذیری فضای خانه سنتی را تحلیل نمود و به گفته وی در مقیاس‌های شهری نیز قابل تعمیم می‌باشد (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989, p. 70). وی مقیاس انعطاف‌پذیری را به چند دسته تقسیم نموده که شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. مقیاس خرد: در این مقیاس انعطاف‌پذیری در ابعاد و اجزای فضایی و عملکردی (فضای خدمت‌دهنده، فضای خدمت‌گیرنده و فضای ارتباطی) تعریف می‌شود. در واقع در این مقیاس فضاها نام خود را از شکل‌گیری فضا کسب می‌کنند و یک فضا به صورت اختصاصی نام‌گذاری نمی‌شود تا پاسخگوی عملکردهای گوناگون باشند.

۲. مقیاس میانی: در این مقیاس انعطاف‌پذیری با لایه‌های عملکردی فضا درگیر می‌شود. به انسجام رسیدن و ایجاد وحدت بین عناصر سازمان‌دهنده فضا و چگونگی ارتباط این عناصر و نوع ارتباط درون با بیرون مورد بحث است. استفاده از نور و تهویه و بازشوها در این مقیاس حائز اهمیت هستند.

۳. مقیاس کلان: این مقیاس انعطاف‌پذیری عملکردی، ساختاری و فضایی را شامل می‌شود. توسعه عمودی و

افقی ساختمان فضا و نوع ارتباط آن با محله اطرافش مورد توجه است (Ibid, p. 71).

انعطاف‌پذیری کالبد فضا از بعد مقیاس، زیرمجموعه مقیاس کلان قرار می‌گیرد. چرا که در دو مقیاس خرد و میانی بیشتر بر لایه‌های درونی فضا دلالت دارد و مقیاس کلان شامل تغییراتی همچون تفکیک و تجمیع کالبدی فضا و نحوه ارتباط کالبد با محیط را شامل می‌شود (Ibid, p. 71). موضوع حائز اهمیت در مقیاس کلان ایجاد هماهنگی بین کالبد معماری و بدنه ساختمان است. بنابراین لازم است تا با انواع ارتباط بین سازه و معماری آشنا شویم.

۲-۴- انواع ارتباط بین معماری و سازه

به طور کلی سه نوع ارتباط بین فرم سازه و فرم معماری برقرار است:

الف- تضاد: زمانی بین فرم‌های معماری و سازه مشاهده می‌شود که نوعی همجواری بین پاره‌ای از کیفیت‌های معماری نظیر هندسه، مصالح، مقیاس و بافت رخ داده باشد. عدم تشابه هندسی بین فرم معماری و سازه معمول‌ترین کیفیت و منشا تضاد می‌باشد.

ب- تلفیق: سازه نقش بدنه ساختمان و معماری در عملکرد تعریف شده است. سازه‌های پوسته‌ای خالص‌ترین ترکیب بین سازه و معماری هستند.

ج- همسازی: سازه و معماری در عین استقلال به گونه‌ای مسالمت‌آمیز در کنار هم قرار دارند و مانعی برای یکدیگر ایجاد نمی‌کنند. بیشتر ساختمان‌ها در این دسته قرار دارند (Charleson, 2014, p. 42).

براساس این دسته‌بندی تلفیق بین سازه و معماری بیشترین حالت انعطاف در کالبد فضا را ایجاد می‌نماید. در حقیقت با ایجاد سازه‌ای انعطاف‌پذیر به‌عنوان بدنه ساختمان نوعی کالبد معماری منعطف ایجاد می‌کند. به این منظور باید سازه و معماری همزمان طراحی شوند و این امر علاوه بر دقت در طراحی معماری، نیازمند توجه به الزامات طراحی سازه نیز می‌باشد.

۲-۵- عوامل و الزامات اساسی در طراحی سازه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید مواد، تکنیک‌های اجرای ساختمان و روش‌های محاسبه سازه‌ها، آزادی نوینی را در طراحی معماری به‌وجود آورده‌اند و دامنه آن را به طور قابل ملاحظه‌ای گسترش داده‌اند. اما این آزادی‌های جدید، سازه‌های مدرن را از تأمین اصول اساسی و لازمی که همیشه پایه و اساس یک معماری خوب بوده‌اند معاف نمی‌کند. این عوامل عبارت‌اند از: تعادل، پایداری، مقاومت، عملکرد، اقتصاد و زیبایی (Salvadori, Heller, & Oakley, 2017, p. 32). بنابراین برای هر گونه طراحی فرمی و کالبدی توجه به تعادل و پایداری از الزامات محسوب می‌شود و باید مورد آزمون واقع شود.

تا خورده بر شکل‌پذیری و انعطاف فضا و پوشش در معماری تأکید می‌کند، این چین‌خوردگی‌ها نه تنها ایجاد ساختاری برجسته و فرورفته می‌کنند، بلکه ادراکی عمیق در فضا به وجود می‌آورند (Schenk & Guest, 2011, p. 3). ورق تاخورده اورینگامی استحکام و مقاومت بیشتری در برابر نیروهای وارده نسبت به صفحات صاف دارند. در اورینگامی سطوح نازک به کمک مجموعه‌ای از تاخوردگی‌ها و لایه‌های مقاوم و سخت‌شونده نه تنها فضا را پوشش می‌دهند؛ بلکه به‌عنوان عنصر تحمل‌کننده بار نیز عمل می‌کنند. الگوی الماسی نوعی اورینگامی است که اساس تاخوردگی آن بر مبنای شکل الماس است و توسط یک دانشمند ژاپنی پس از قرار دادن یک سیلندر تحت فشار و له شدن آن ابداع شد. این الگو دارای استحکام و فرم منعطفی است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود (Buri & Weinand, 2008, p. 2).

۲-۶- مفهوم اورینگامی و کاربرد آن در معماری و سازه

اورینگامی یک کلمه ژاپنی است که از دو واژه *ori* به معنی تاخورده و *kami* به معنی کاغذ استخراج شده است. اورینگامی روش ارائه اشکال است، که به طور عمد به خم کردن ماده مورد استفاده یعنی کاغذ حاصل می‌شود. اورینگامی هنر و اندیشه تا دادن کاغذ برای خلق شکل‌های مختلف، می‌باشد (LaFosse & Alexander, 2008, p. 5). صفحات تا خورده پانل‌های ثابت یا متحرک که از اورینگامی ایده گرفته شده در جهت طرح‌های معماری جنبشی، کاربردی فراوان دارد. ساختار صفحات خمیده و تاخورده آن به دلیل خاصیت توده‌ای و پیوسته بودن، خلق فضایی کاربردی و همچنین ویژگی پلاستیکی و انعطافی که دارد، مورد توجه دو گروه معماران و مهندسان سازه می‌باشد. تنوع و پراکندگی نور و سایه در طول صفحات

شکل ۲: انعطاف در الگوی الماسی



با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر انعطاف کالبدی فضا شکل ۲، اورینگامی علاوه بر تنوع دارای قابلیت انطباق‌پذیری لازم جهت ایجاد کالبد فضا است و با توجه به این امر که پایداری سازه در ایجاد انعطاف‌پذیری کالبد از مهم‌ترین چالش‌های معماری انعطاف‌پذیر است، بهره‌گیری از انعطاف الگوی اورینگامی الماسی و تولید آن با ورق فولادی به‌عنوان یک متریکال منعطف در قالب پوسته تشکیل‌دهنده فضا، نوعی تلفیق بین فرم معماری و سازه را ایجاد می‌کند که سازه و بدنه ساختمان را تشکیل می‌دهد. ورق فولاد با قابلیت تغییرپذیری در کالبد معماری با توجه به تاخوردگی‌های طرح اورینگامی انعطاف را میسر می‌سازد. از طرفی چین‌های اورینگامی بر روی پوسته فضا باعث استحکام بیشتر ورق فولاد جهت مقابله با بارها می‌شود. برای اثبات این فرضیه لازم است تا الگوی الماسی مدل‌سازی و بارگذاری شود تا قابلیت انعطاف‌پذیری و پایداری آن سنجیده شود.

۳. روش تحقیق

اغلب طرح‌ها قبل از اجرا به کمک نرم‌افزار و به صورت پارامتریک مدل‌سازی و محاسبه می‌شوند (Matcha & Ljubas, 2011, p. 327). مدل‌سازی اورینگامی با استناد به هندسه الگوی کاغذی آن جهت مدل‌سازی تعمیم‌پذیر است (Buri & Weindand, 2008, p. 2). مدل‌سازی به

مسائل غیر خطی را محاسبه می‌کند (Musavi, 2013, p. 60). در آزمون به بررسی تنش در بارگذاری قائم (ثقلی) جهت تعیین تحمل بارهای عمودی، تنش در بارگذاری جانبی (چرخه‌ای) و حداکثر نیرو و جابجایی (push-over) پرداخته شده تا واکنش ساختار الگوی الماسی در برابر انعطاف‌پذیری کالبد و همچنین پایداری و تغییرپذیری سازه تعیین شود.

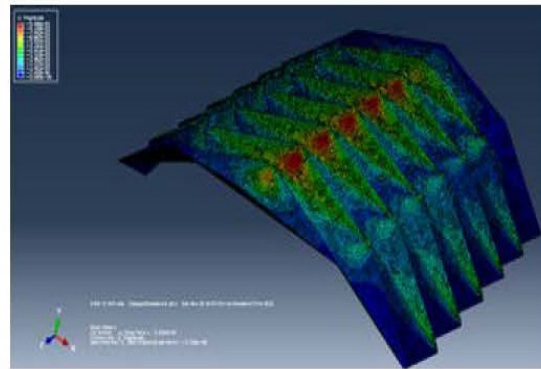
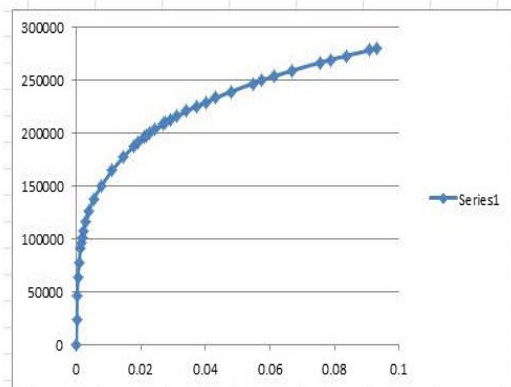
۴-۱- بررسی تنش در بارگذاری قائم (ثقلی)

بیشترین تنش در رئوس هندسه قالب ساختار مشاهده می‌شود که با رنگ قرمز مشخص شده. در شکل ۶ بخش‌های سازه هرچه به رنگ آبی پررنگ میل کند نشانه پایداری بیشتر است. نتیجه اعمال نیروی ثقلی با توجه به نمودار برابر با ۲۸۰۱۸۲ نیوتن و تغییر شکل ۹,۳۱۷۹ سانتیمتری بود. یعنی ساختار اورپگامی الماسی دارای تعادل و پایداری لازم است.

۴. یافته‌های پژوهش

مدل‌سازی الگو توسط نرم‌افزار Abaqus/Standard تحت انواع بارگذاری‌های تنش در بارگذاری قائم (ثقلی)، تنش در بارگذاری جانبی (چرخه‌ای) و حداکثر نیرو و جابجایی

شکل ۳: ظرفیت مدل الماسی ناشی از بارگذاری قائم



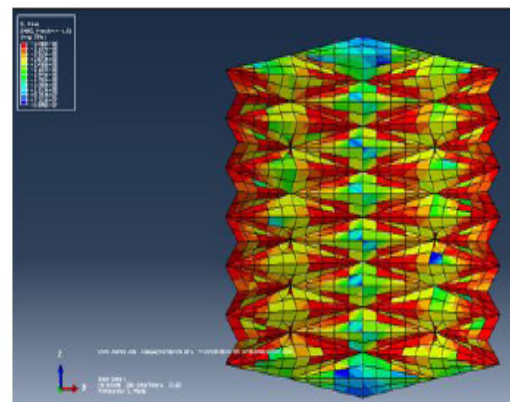
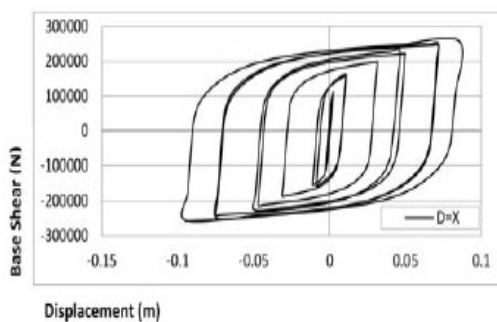
است. این نوع بارگذاری تحت دو محور صورت گرفت.

الف- بارگذاری چرخه‌ای در محور X: تنش ناشی از بار رفت و برگشتی (چرخه‌ای) در محور X نشان می‌دهد که این ساختار تا میزان ۲۵۸۴۸۱ نیوتن ۹,۵ سانتیمتر جابجایی دارد (شکل ۴).

۴-۲- بررسی تنش در بارگذاری جانبی (چرخه‌ای)

برای ترسیم نمودارهای هیستریزیس^۵ از بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد تا تنش نیروی جانبی بر سطح مقطع مشخص شود. در تمام مدل‌ها، بارگذاری به صورت اعمال تغییرمکان

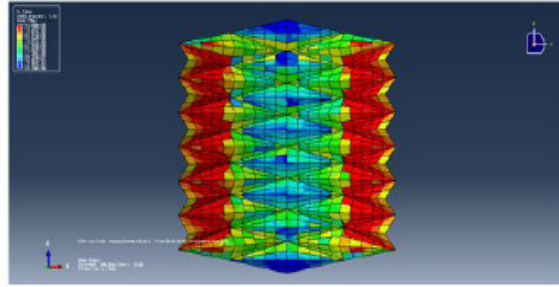
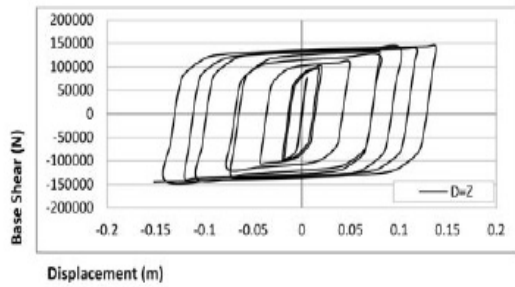
شکل ۴: توزیع تنش در سطح مدل الماسی با بارگذاری چرخه‌ای در محور X



پس از اعمال نیروی ۱۴۴۹۸۱ نیوتنی ۰,۱۵ متر تغییرات داشت (شکل ۵).

ب- بارگذاری در محور Z: بارگذاری رفت و برگشتی (چرخه‌ای) به عنوان بررسی نیروی جانبی در محور Z

شکل ۵: نحوه توزیع تنش و نمودار آن در سطح محور Z با بارگذاری چرخه‌ای در الگوی الماسی

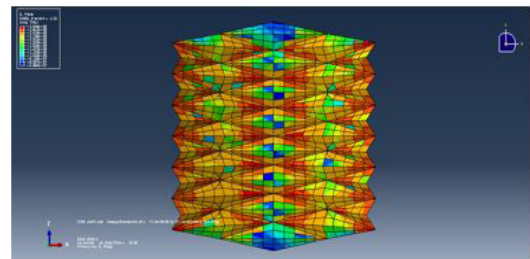
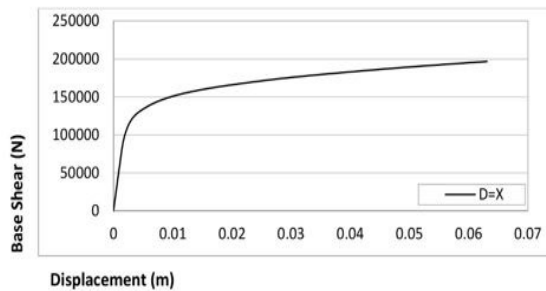


قرار گرفت تا حداکثر توانایی سازه مشخص شود.
الف- بارگذاری push-over در جهت محور X
میزان تحمل بار در محور X حداکثر نیرو معادل ۱۹۶۷۸۲ نیوتن و حداکثر جابجایی ۰٫۰۶۳ متر است (شکل ۶).

در نتیجه میزان تنش نیروی جانبی در محور X نسبت به Z کمتر است یعنی محور X رفتار سازه‌ای بهتر و محور Z تغییرپذیری کالبد را نشان می‌دهد.

۳-۴- بررسی حداکثر نیرو و جابجایی (push-over)
در این بخش دو محور عمود بر هم مورد تحلیل بارگذاری

شکل ۶: توزیع تنش در سطح مدل با بارگذاری Pouch-Over در جهت X

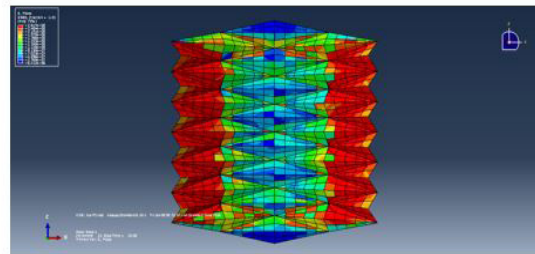
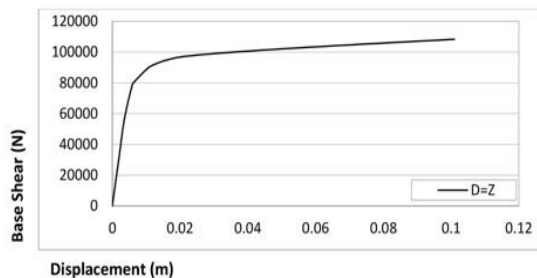


در نتیجه قیاس دو محور X و Z در برابر بار افزون درمی‌یابیم که محور X مقاومت سازه‌ای و محور Z تغییرپذیری کالبد معماری را به همراه دارد.

ب- بارگذاری Pouch-Over در جهت Z

در این محور حداکثر میزان نیرو ۱۰۸۳۰۹ نیوتن و حداکثر جابجایی ۰٫۱۰ متر است (شکل ۷).

شکل ۷: توزیع تنش در سطح مدل با بارگذاری Pouch-Over در جهت X



در پاسخگویی به انعطاف‌پذیری معماری و پایداری سازه می‌باشد، محور Y نیز بیشترین مقاومت در برابر نیروی ثقلی را نشان می‌دهد.

براساس نتایج جدول ۱، الگوی اورینگامی در محور D=Z در جهت ضعیف است که انعطاف‌پذیر عمل می‌کند و محور D=X در جهت قوی و دارای تعادل و پایداری است. تحلیل بار افزون نیز مبین دو بعدی بودن عملکرد این الگو

جدول ۱: نتیجه کلی انواع بارگذاری‌ها در محورهای مختلف

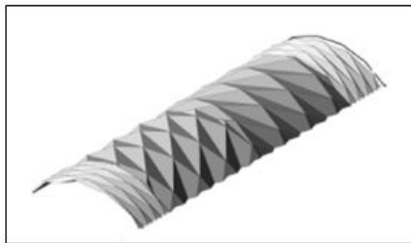
	جهت بارگذاری	بارگذاری قائم	بارگذاری Pouch-Over
حداکثر نیرو (نیوتن)	X	-	۱۹۶۷۸۲
	Y	۲۸۰۱۸۲	-
	Z	-	۱۰۸۳۰۹
حداکثر جابجایی (متر)	X	-	۰,۰۶۳
	Y	۰,۰۹۳	-
	Z	-	۰,۱۰

الگوهایی جهت احداث کالبد ساختمان که توانایی انطباق‌پذیری با شرایط محیطی مختلف را دارند ارائه داد.

مدل‌های مختلف تطبیق‌پذیری کالبد فضا با شرایط گوناگون با بهره‌گیری از اوریگامی الماسی بر مبنای زیرشاخه‌های تطبیق‌پذیری شامل موارد زیر می‌باشد:

الف- تطبیق‌پذیری در ابعاد و اندازه: در الگوی الماسی با تغییر در ابعاد طول و عرض الگوی تاشدگی‌ها می‌توان سازه‌هایی با ابعاد و اندازه منطبق با نیاز ایجاد نمود.

شکل ۹: سازه تطبیق‌پذیر با بهره‌گیری از الگوی الماسی



می‌توان ایجاد نمود که متناسب با محیط قابلیت تطابق دارند.

شکل ۱۱: الگوی الماسی با فرم مدور و مرکزی

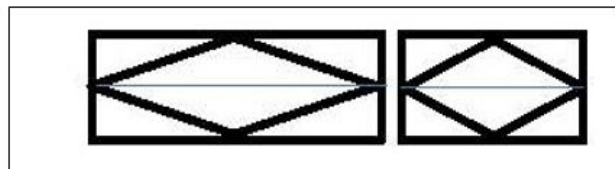


بنابراین این الگو به‌عنوان کالبد فضا در یک محور (X) مقاومت سازه‌ای لازم جهت پایداری و تعادل کالبد و در محور دیگر (Z) انعطاف‌پذیری و تغییرپذیری لازم در راستای انطباق کالبد با محیط پیرامون را شاهد هستیم.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

- عوامل مؤثر بر انعطاف‌پذیری کالبد فضا از روش تطبیق‌پذیری عوامل کالبدی و زیر شاخه‌های آن میسر می‌شود.
- براساس نتایج می‌توان با بهره‌گیری از اوریگامی الماسی

شکل ۸: انواع الگوهای الماسی

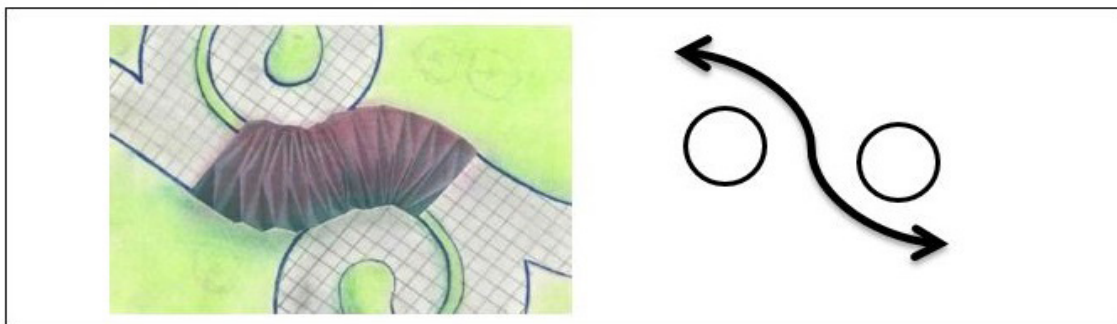


ب- تطبیق‌پذیری در شکل و فرم: در خلق پوشش فضایی با بهره‌گیری از اوریگامی الماسی فرم‌های مختلفی

شکل ۱۰: الگوی الماسی با فرم محور حرکتی خطی شکل

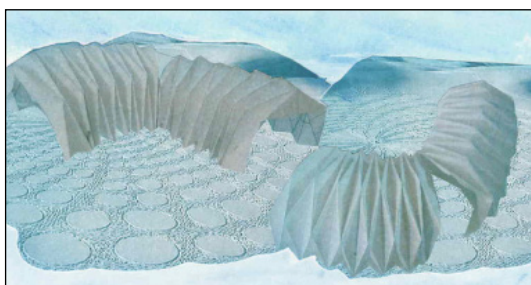


شکل ۱۲: فرم مارپیچ در راستای تطابق با محیط



ج- انطباق‌پذیری در محل قرارگیری عناصر معماری: چیدمان عناصر معماری مانند ورودی و خروجی را مناسب به کمک برش یا حذف برخی از اعضای سازنده الگو می‌توان با شرایط محیطی تعیین نمود.

شکل ۱۳: نمونه‌ای از چیدمان الگوها جهت شکل‌دهی عناصر معماری



د- تطبیق‌پذیری در تنوع و گوناگونی: الگوی الماسی ایجاد شده با ورق‌های فلزی دارای قابلیت تنوع در رنگ‌های مختلف است. از لحاظ ابعاد کلی کالبد فضایی نیز با محیط‌های گوناگون قابل تطابق می‌باشد.

شکل ۱۴: تنوع و تطابق در کالبد با بهره‌گیری از الگوی الماسی



پی‌نوشت

1. Hermann Minkowski
2. Cambridge
3. Sullivan
4. Herman Hertzberger
5. Hysteresis

REFERENCES

- Ahmed, E., Wan Badaruzzaman, W.H., & Wright, H.D. (2000). Experimental and Finite Element Study of Profiled Steel Sheet Dry Board Folded Plate Structures. *Thin-walled Structures*, 38(2), 125-143. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(00\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00039-2)
- Albotan, D. (2009). [Flexibility in multi- Residential Housing projects: Three innovative cases from Turkey](#), 1-74.
- Baghaei, A. (2009). [The Role of Structure in Aesthetic of Contemporary Architecture](#). *Hoviat Shahr*, 8(2), 5-14.
- Bemanian, M.R., Amirkhani, A., & Leilian, M.R. (2010). Order and Disorder in Architecture. Tehran: Tehran Press, 91.
- Bentley, I. (1985). [Responsive Environments: A Manual for Designers](#). New York: Routledge.
- Buri, H., & Weinand, Y. (2008). [ORIGAMI-folded Plate Structures](#). *Architecture* (No. CONF).
- Buri, H. U., & Weinand, Y. (2010). Origami aus Brettsperrholz. *DETAIL Zeitschrift für Architektur+ Baudetail*, (ARTICLE), 1066-1068.
- Cambridge Advanced Learner's Dictionary (2013), Fourth Edition
- Charleson, A. (2014). [Structure as Architecture: A Source Book for Architects and Structural Engineers](#). New York: Routledge.
- Ching, F.D. (2014). [Architecture: Form, Space, and Order](#). John Wiley & Sons. 201.
- Ching, F.D., Onouye, B.S., & Zuberbuhler, D. (2013). [Building Structures Illustrated: Patterns, Systems, and Design](#). John Wiley & Sons. 134.
- Dehkhoda, A.A. (1998). Dehkhoda Dictionary Encyclopedia. Tehran: Tehran University Press.
- Einifar, A.R. (2003). A Model to Analyze Residential Spaces: Based on Flexibility Criteria of Traditional Housing. *HONAR-HA-YE-ZIBA (FA)*, 13(461), 64-77. https://jhz.ut.ac.ir/article_10660.html
- Einifar, A.R., Shayan, H.R., & Garipour, M. (1989). Investigation and Comparison of Flexibility in Residence Architecture between Iran and Japan. *ABADI Journal*, 55, 12-19.
- Erabi, J. (2011). Form Creation, 6ed. Mashhad: Kasra Publishing, Mashhad, 14- 138.
- Felbrich, B., Nönnig, J.R., & Wiesenhütter, S. (2014). Rigid Folding in Robotic Multi-agent Systems. *Procedia Computer Science*, 35, 1342-1351. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.174>
- LaFosse, M.G., & Alexander, R.L. (2008). [Origami Art: 15 Exquisite Folded Paper Designs from the Origamido Studio: Intermediate and Advanced Projects: Origami Book with 15 Projects](#). Tuttle Publishing.
- Lang, J. (1987). [Creating Architectural Theory. The Role of the Behavioral Sciences in Environmental Design](#).
- Mahdavi-nejad, M.J., Farajolahi-rad, A., & Karam, A. (2011). [Flexible Architecture, an Approach toward Architecture and Structure Harmony. Published by Art and Architecture](#), Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. 1.
- Matcha, H., & Ljubas, A. (2011). [Parametric Origami. New Design Concepts and Strategies_eCAADe 28](#). 326
- Moore, F. (1999). [Understanding Structures. McGraw-Hill Science Engineering](#).
- Musavi, S.S. (2013). Analysis of Seismic Behavior and Impact of Opening on Composite Shear Wall Incorporating Flat and Corrugated Plates [MSc Thesis], Department of Civil Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.
- Salvadori, M.G., Heller, R., & Oakley, D.J. (2017). [Salvadori's Structure in Architecture: The Building of Buildings](#).
- Schenk, M., & Guest, S.D. (2011). [Origami Folding: A Structural Engineering Approach. In Origami 5: Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education](#). 291-304. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Schneider, T., & Till, J. (2005). [Flexible Housing: Opportunities and Limits](#). *Arq: Architectural Research Quarterly*, 9(2), 157-166.
- Sheppard, D., & Town, P. (1974). Housing Flexibility? *Architectural Design*, 43(11), 698-727.
- Venturi, R., & Scully, V. (1977). [Complexity and Contradiction in Architecture. The Museum of Modern Art](#). 1, 12-49.

نحوه ارجاع به این مقاله

زنده دلان، آناهیتا؛ خسروی، حسین و صفائیان، الهه. (۱۳۹۸). کالبد انعطاف پذیر با تلفیق معماری و سازه با بهره‌گیری از اوریگامی. نشریه معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۲(۲۸)، ۴۹-۵۸.

DOI:10.22034/AAUD.2019.97358

URL: http://www.armanshahrjournal.com/article_97358.html



Flexible Physical Body by Blending Architecture and Structure Using Origami

Anahita Zendehtelan^{a*} - Hossein Khosravi^b - Elahe Safaeian^c

^a Assistant Professor of Architecture, Department of Architecture, Faculty of Technical and Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran (Corresponding Author).

^b Assistant Professor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

^c M.A. of Architecture, Faculty of Technical and Engineering, Khorasan e Razavi Sciences and Research Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.

Received 24 October 2016; Revised 28 February 2017; Accepted 20 May 2017; Available Online 21 December 2019

ABSTRACT

Flexibility is one of the key concepts in the formation alphabet of architecture but it is less frequently taken into account in the area of physical body and it has more been dealt with of the diversity or free plan designing types in micro-scales. When the architectural spaces' context needs flexibility, the structure, as well as the architectural form, should be both designed because the most important challenge in investigating flexibility in architectural context is structure and flexibility has to be granted to the body of structure and that in a macro-scale. The present article aims at investigating flexibility in the architectural context for which the structure should be coordinated with the behavioral architecture. Origami technology solidifies and renders flexible its structure to be followed by physical flexibility and structural stability and this is why it has drawn the attention of the structural and architectural engineers. In this regard, origami is utilized as a factor linking the structure and architecture. The diamond origami pattern possesses the intended properties in terms of architectural flexibility and structural stability and it was subjected to loading in the form of a model made of steel plates in finite element software. The findings indicated that the diamond origami pattern provides the required flexibility for adaptation to the various environmental conditions by blending architecture and structure in the building's physical body and that the diamond pattern's adaptability is feasible in all the sub-branches.

Keywords: Flexibility, Adaptability, Physical Body, Structure, Origami.

* E_mail: anahita_ze@yahoo.com

1. INTRODUCTION

Architectural flexibility means responding to the new conditions that are always integral necessities of architecture (Mahdavinejad, Farajollahi, & Karam, 2011, p. 1). This can be actualized when the structure is not found barring the architectural flexibility from being objectified. Nowadays, the traditional methods of construction are no longer responding to novel conditions. This is while the industrial methods of construction are not always found successful and generally cause inflexibility in the building for attentions are solely paid in them to the current common needs expected to be satisfied by the building and the prospective requirements are mostly neglected (Einifar, 2003, p. 65). In order to render the building physical body flexible, use should be made of the technology when designing the structure because three topics, namely structure, architecture and technology, have been the same in their primary significations since the beginning of the recorded architectural history (Bagha'ei, 2009, p. 28) and it is clear that architecture and structure are closely interrelated in such a way that the functional structural systems are envisioned as main systems of building axis and have been usually honestly expressing the architectural forms (Ching, Onouye, & Zyber-buhler, 2013, p. 134). Flexibility in architectural designing substantially pertains to the designing of "spatial forms" and their construction. This way, architects often tend to develop diverse and uncommon architectural forms.

Structure is the most important challenge in the flexible architecture for preserving the building's stasis and features a fixed form and position parallel to the controlling of the static and dynamic forces (Moore, 1999, p. 10). Therefore, in order to create flexibility in the physical body, the structure should be also designed flexibly so that coordination can be brought about via the spatial context between the structure and architecture.

Featuring structural solidarity and formability, origami causes the bond between structural engineering and architecture (Schenk & Guest, 2011, p. 4). Such a composition leads to a strong and efficient structure with more advantages in contrast to the traditional forms of construction (Ahmed, Wan Badaruzzaman, & Wright, 2000, p. 126). Origami has been used as a solution in numerous sciences and its applicability is undeniable but the goal of this study is taking advantage of the flexibility attribute of diamond origami for creating physically flexible architecture. Such flexibility can be actualized in an applied manner and on a macro-scale when the structural requirements are observed in line with the achievement of a balanced structure.

Therefore, types and scales of flexibility in architecture, as well as the structural requirements and various kinds of the structure-architecture interrelationships, were investigated following which the effect of such a technology on the structure and physical flexibility was

determined based on the conceptualization of origami and investigation of its properties. In the end, the best method for coordinating structure and architecture was specified.

2. THEORETICAL FOUNDATIONS

In order to design a flexible space, it is necessary to recognize the flexibility's definition and factors involved therein. Thus, the following sections deal with the definition of flexibility and various kinds of flexibility in architecture.

2.1. Definition and Concept of Flexibility in Architecture

Literary, flexibility means bending and pliability and elasticity and flexible is the thing that is bendable, pliable and elastic (Dehkhoda, 1998, p. 3765). In English, flexibility means the changeability in the objects and things and it is lexically an adjective referring to the elasticity of an object in such a way that it is found easily changeable according to the conditions hence it is considered as an equivalent to the term changeability (Cambridge Dictionary, 2013). The term "flexibility" is used in architecture to mean a manmade space accountable to the novel conditions and needs. Flexibility means adaptation to the changes in the space and points to the issues related to the users' present time and future needs (Schneider & Till, 2005, p. 287).

2.2. Types of Flexibility

Flexibility can be categorized in either of the following groups:

2.2.1. Diversity

The ability to provide various uses of space is called diversity which is defined as the freedom in making choices for diverse uses enabling the users to make choices based on their needs (Albotan, 2009, p. 1). In other words, diversity is the very multifunctional property of a space serving various functions at various times. In general, the two concepts of time and space are in interlocking association with one another and cannot be separated as also pointed out by Herman Minkowski: "time alone and space alone are condemned to destruction and only their unity facilitates their survival" (Ching, 2014, p. 134). Every space is capable of being converted to a place and this is formed over time and by human beings (Erabi, 2011, p. 14).

2.2.2. Changeability

The ability of space for development or summation in the form of its substructure's quantitative increase or decrease or the ability of space's separation and restoration to the preliminary plan after expansion and/or area reduction is called changeability. This

attribute is directly related to the type of spatial function, form, shape, and dimensions of the collection wherein space is located. Changeability may be observed in structural, functional or spatial forms (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989). This property is more engaged with physical body of space because it is via the physical development and summation that the area and capacity can be changed. Thus, space's physical body should feature changeability so as to be flexible as held by Lang, "flexibility in architecture is the attribute of a space that can be changed for responding to the various needs" (Lang, 1987, p. 201). In other words, "flexibility means adapting to the spatial changes" (Schneider & Till, 2005, p. 2). In general, spatial flexibility and organization of the manmade space and the changes therein serve

the achievement of new conditions and needs and applications (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989).

2.2.3. Adaptability

The ability of space for adjusting to the new and required conditions is called adaptability. This space can respond to the various functions at one time and at different times (Venturi & Scully, 1977, p. 49). Following the primary pattern and geometry enables the designing of a flexible space that is also capable of getting adapted to the conditions during various times (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989, p. 70). Adaptability includes factors of spatial organization, functional factors, and physical factors. Figure (1) illustrates the types of flexibility.

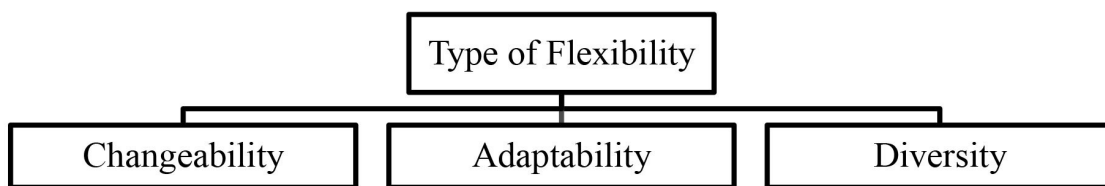


Fig. 1. Diagram Showing the Flexibility Types

2.2.3.1. Physical Factors

According to the study objective, the forthcoming section solely deals with the physical aspect of adaptation. Physical body refers to the format of the building, i.e. everything touchable and observable in a building. One of the factors influencing the creation of "adaptable" space is the physical body of building that gets adapted to the conditions in the course of designing process and depends on factors like dimensions and size, geometry, form and shape, diversity and space's variegation (Sheppard & Town, 1974, p. 86).

A) Dimensions and Sizes: all of the architectural dimensions are formed of form and space, meaning and concept, performance and efficiency depending on the human being's nature and destiny, wants and needs. The proportions of space are influenced by masonry materials (brick, block and so on), structural issues and systems (covered span), standardized elements and components (door, window, carpet and so forth) and their limitations and facilities. Moreover, the human proportions, human perception, and mentality, number of individuals, behavior, performance and furniture play determinant roles in the dimensions and sizes of the architectural spaces (Erabi, 2011, p. 212). Dimension and size can be investigated in the depth and height of the physical body and the size of the interior space and architectural elements and the more the access to space is easier, the more space enjoys adaptability (Bentley, 1985, p. 178).

B) Architectural Elements' Siting: physical properties depend on other factors like the placement location of doors and windows, as well, that largely influence the space's adaptability (Lang, 1987, p. 119). Essentially,

the method of light's infiltration and passing through the shell into the interior parts for lighting the space causes the formation of the building's form and façade so form and space would be indiscernible without light (Erabi, 2011, p. 138).

C) Shape and Form: although the creation of space is the primary goal of architectural designing and it is the space the encompasses us and also it is the space wherein our behaviors and activities occur, we need designing the proper form for the creation of this space. In general, the embodiment and appearance of a phenomenon are called form which, in line with the expression of the present study's subject, is a meaning or content formed of certain materials. The effect of the constituent materials on the formation of form as well as the abilities and constraints of every material in formability, as well, are expressive of the interaction and effect of special contents and raw materials on the formation of the form (Erabi, 2011, p. 64). Cambridge believes that the performance of the objects can be defined via their representation in mind. In Sullivan's mind, "form manifests performance". "Form enables performance and functioning". Venturi realizes multipurpose buildings as physically a space that is complex in terms of plan and form but at the same time acceptable as a whole. Complexity causes the creation of ambiguity which per se results in the creation of adaptability (Venturi & Scully, 1977, p. 49). One of the properties of complex systems is the nature of their adaptability. These systems are not passive rather they exhibit reactions in an active form so as to exhibit every incident in their favor and make various kinds adapted to the environment (Bemanian, Amirkhani, & Leilian, 2010, p. 91).

D) Diversity and Variagation: diversity and variegation in space are effective in space in line with bringing about adaptation to the environment and performance during various times. Such variegation can take place in number, size, and area, shape, and form as well as color and so on in such a way that, according to Hertzberger, the users can choose the space based on what they want (Albotan, 2009, p. 74). Production of space can be carried out by propagation of a repetitive element in a free manner. If various solutions are created for the method of the volumes' interference with one another, diversity can be created. Though featuring a modular basis, this task is diverse in composition for it is done freely. In parallel, the specifications of the segments, type of interference and amount of infiltration in one another by them are very effective in the final composition's diversity (Erabi, 2011, p. 132).

2.3. Scales of Flexibility

Recognition of various scales of flexibility contributes to a better understanding of flexibility. In an article titled "investigation and comparison of flexibility in Iran and Japan's residential architecture", Einifar et al. (1989) analyzed the flexibility scales of the traditional houses' spaces and, as put by them, these scales can be generalized to the urban spaces, as well (Einifar, Shayan, & Garipour, 1989, p. 70). They have divided flexibility scale into several sets, including the followings:

1) Micro-Scale: in this scale, flexibility is defined in the spatial and functional dimensions and components (service-providing, service-receiving and communication spaces). In fact, on this scale, the spaces acquire their names from the formation of the space and space is not given a specific name so that it can respond to the various performances.

2) Medium Scale: in this scale, flexibility is engaged with the functional layers. Getting the elements organizing a space coherent and creating unity between them as well as the quality of these elements' interrelationships and the type of their relationships inside and outside the building are discussed in this scale. The use of light and ventilation and openings on this scale is of great importance.

3) Macro-Scale: this scale incorporates functional, structural and spatial flexibility. Vertical and horizontal development of the space and the type of its relationship with the peripheral neighborhood are important in this scale (Ibid, p. 71).

The flexibility of the space's physical body in terms of the scale falls in a subset of the macro-scale because the micro- and medium scales mostly deal with the space's internal layers and macro-scale largely deals with the changes like the space's physical separation and connection and the method in which the physical body is connected to the environment (Ibid, p. 71). The important subject in the macro-scale is the creation of coordination between the architectural physical body

and the building's body. Therefore, it is necessary to become familiar with various kinds of relationships between structure and architecture.

2.4. Various Kinds of Relationship between Architecture and Structure

In general, there are three types of relationships between the structural form and architectural form:

A) Paradox: it is seen between the architectural and structural forms when there is occurred a sort of adjacency like geometry, masonry, scale, and texture between some parts of the architectural qualities. The geometrical dissimilarity between the architectural and structural forms is the most common quality sourcing the paradox.

B) Blending: structure plays the role of the building's body and architecture grants function thereto. The shell structures are the purest combinations of the structure and architecture.

C) Symbiosis: while being independent, structure and architecture peacefully live at one another's side and do not cause any barriers for each other. Most of the buildings fall in this set (Charleson, 2014, p. 42).

Based on this classification, the blending of the architecture and structure creates the highest amount of flexibility in the physical body of space. In fact, it is via the creation of a flexible structure as the body of a typical building that a flexible architectural context is created. To do so, the structure and architecture should be simultaneously designed and this adds to the precision in the architectural designing but entails paying attention to the structural designing requirements.

2.5. Essential Factors and Requirements in Structural Designing

Recent advances in the area of materials production, techniques of building construction and methods of structural calculations have brought about novel freedom in architectural designing the realm of which has also been extensively expanded accordingly. But this new freedom does not exempt the modern structures of the supply of the essential and required principles that have always been the foundation of good architecture. These factors are balance, stability, strength, performance, economy, and beauty (Salvadori, Heller, & Oakley, 2017, p. 32). Therefore, paying attention to balance and stability is considered amongst the requirements in every sort of formal and physical designing hence these have to be somehow tested.

2.6. Origami Conceptualization and Application in Architecture and Structure

Origami is a Japanese word made of two terms "oru", meaning folded, and "kami", meaning paper. Origami is the method of offering shapes and it is substantially obtained by folding the used material, i.e. paper.

Origami is the art and thought of folding paper for creating various shapes (LaFosse & Alexander, 2008, p. 5). The folded plates of the fixed or movable panels as inspired by origami are widely applied for motive architectural plans. The structure of the curved and folded plates in origami has drawn the attention of two groups of architects and structural engineers due to their possession of massiveness and continuousness, creation of applied spaces as well as the plastic and flexible characteristics. The diversity and scattering of light and shade along the folded plates emphasize the formability and flexibility of space and covering in architecture. These folds not only create protruded and indented structures but also enable a subtle

perception of the space (Schenk & Guest, 2011, p. 3). The folded origami sheets have more strength and solidarity against the imposed forces as compared to the flat papers. In Origami and by the assistance of a collection of resistant folds and layers capable of being hardened, the thin surfaces not only cover the space but also act as the load-bearing element, as well. The diamond pattern is a sort of origami the folding of which is essentially based on a diamond's shape which was invented by a Japanese scientist after subjecting a cylinder to pressure and its compression. This pattern features solidarity and flexible form as shown in Figure (2) (Buri & Weinand, 2008, p. 2).



Fig. 2. Flexibility in a Diamond Pattern

Considering the factors influencing the physical flexibility of the space in Figure (2), origami features diversity as well as flexibility required for creating the physical body of a space. According to the fact that the structural stability is one of the most important challenges in the flexible architecture for creating flexibility in physical body, application of flexibility in the diamond origami pattern and its production using steel plates, as flexible materials, within the format of space-constituting shell provides a sort of mixture between architectural and structural forms making the structure and the body of the building. Steel plates with the capability of changeability in the architectural context facilitate flexibility through folds in the origami plan. On the other hand, origami folds on space's shell cause more solidarity in the steel plates for withstanding the loads. To prove this hypothesis, it is necessary to model the diamond pattern and subject it to loading so that its flexibility and stability can be assessed.

3. RESEARCH METHOD

Most of the plans are modeled and calculated before implementation by the assistance of software (Matcha & Ljubas, 2011, p. 327). Origami modeling can be generalized based on the geometry of its paper patterns to real-world cases (Buri & Weindand, 2008, p. 2). The modeling process is carried out by the use of software simulating the real world's specimens in the virtual space enabling the designers and engineers to investigate the model's flexibility (Felbrich, Nönnig, & Wiesenhütter, 2014, p. 174).

The diamond pattern was modeled based on the geometry obtained in the prior research using finite element software using 0.6mm steel plates and subjected to subsequent analyses. In order to analyze the structure's stability and changeability in various axes, use was made of Abaqus/Standard, version 6.10, for its high speed and accuracy in structural modeling. Abaqus/Standard Software utilizes the Newton-Raphson Method for solving the nonlinear problems in which, unlike the linear problems, the answer cannot be calculated via solving a single equations' system. In other words, in the nonlinear method, the software divided the entire simulation problem into several loading steps and determines the approximate static balance configuration at the end of each step. Generally, the calculation of the balance conditions and the acceptable answer in every loading step necessitates the running of a trial and error and consecutive reiteration process. In the end, the sum of answers found in various steps gives an estimation of the nonlinear problem's solution. Resultantly, Abaqus/Standard Software concomitantly implements repetitive processes and performs load dividing to calculate the answer to the nonlinear problem (Musavi, 2013, p. 60). In this test, the stress in orthogonal (gravitational) loading has been investigated in line with the determination of the tolerance to the vertical loads, stress in lateral (cyclic) loading and maximum displacement and force (pushover) to figure out the reaction of the diamond pattern's structure to the physical body's flexibility as well as the structure's stability and changeability.

4. STUDY FINDINGS

Pattern modeling using Abaqus/Standard Software was investigated subject to various kinds of stress loading in the forms of orthogonal (gravitational) loading, lateral (cyclic) loading and maximum force and displacement (pushover) so that the accuracy of the stability and architectural flexibility acquired for the structure can be determined.

4.1. Investigating Stress in Orthogonal (Gravitational) Loading

The highest stress is observed in the apices of the structural format's geometry highlighted in red in Figure (3). The more the structural parts tend towards dark blue, the more they are found stable. The exerted gravitational force was equal to 280182 Newtons and the displacement was found equal to 9.3179 centimeters meaning that the diamond origami structure features the required balance and stability.

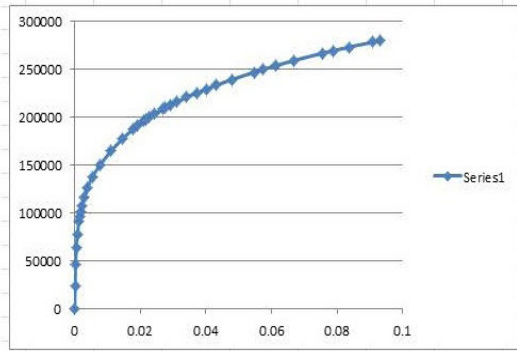
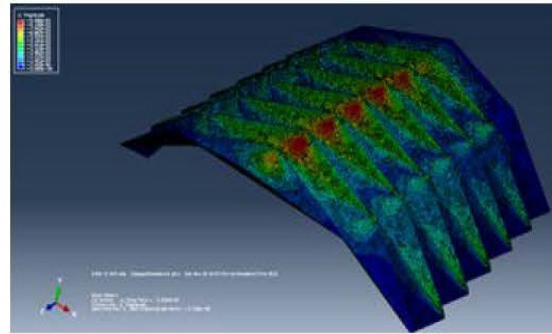


Fig. 3. The Capacity of the Diamond Model Following the Orthogonal Loading



4.2. Investigating Stress in Lateral (Cyclic) Loading

To delineate the hysteresis diagrams, use was made of cyclic loading to clarify the stress caused by lateral loads on the cross-sections. In all of the models, loading's

effect is calculated in the form of displacement. This type of loading was carried out on two axes.

A) Cyclic Loading in X-Axis:

Stress caused by reciprocal (cyclic) loading on x-axis shows that the structure undergoes displacement for 9.5cm up to a load equal to 258481 Newtons (Fig. 4).

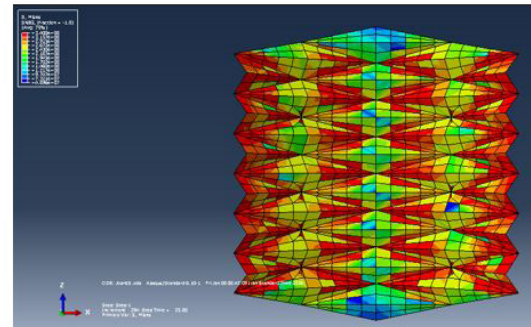
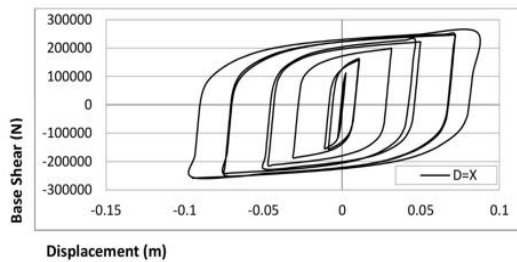


Fig. 4. Distribution of Stress on the Surface of the Diamond Model Subject to Cyclic Loading on X-Axis

B) Loading on Z-Axis:

Reciprocal (cyclic) loading was exerted in the form of

lateral force on z-axis for 144981 Newtons as a result of which displacement by 0.15 meters was observed (Fig. 5).

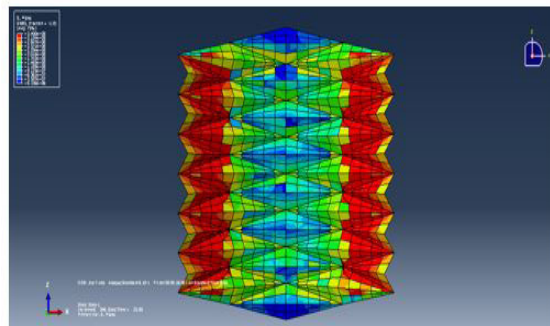
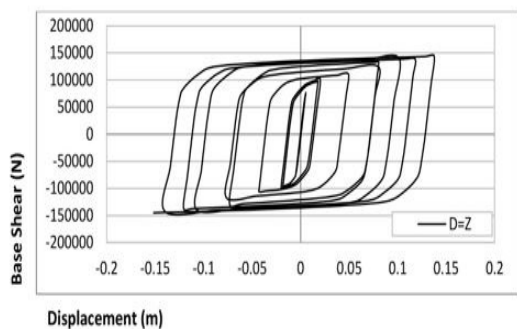


Fig. 5. Distribution of Stress and Its Diagram for Z-Axis after Subjecting the Diamond Pattern to Cyclic Loading

As it is observed, the amount of stress caused by lateral force is lower on x-axis in comparison to z-axis meaning that x-axis exhibits better structural behavior and z-axis shows the physical body's changeability.

4.3. Investigating Maximum Force and Displacement (Pushover)

In this section, two perpendicular axes were analyzed following being subjected to loading in terms of the structure's maximum ability.

A) Pushover Loading along x-Axis:

The load-bearing amount on x-axis was maximally equal to 196782 Newtons with the maximum displacement being equal to 0.063m (Fig. 6).

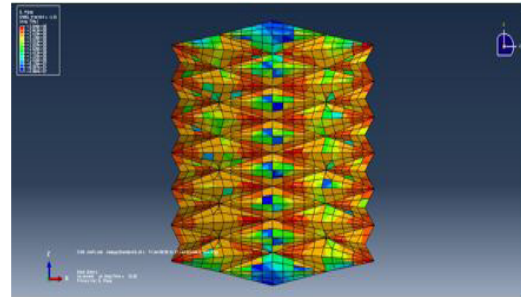
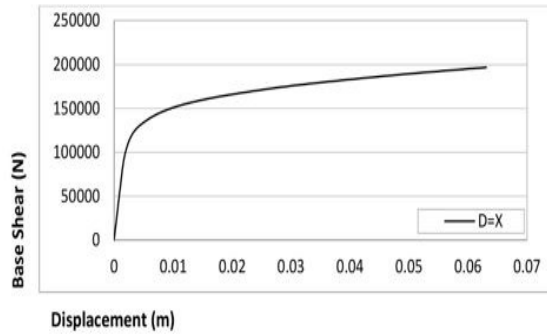


Fig. 6. Distribution of Stress along the Model's Surface with Pushover Loading along X-Axis

B) Pushover Loading along Z-Axis:

In this axis, the maximum force was 108309 Newtons and maximum displacement was 0.10m (Fig. 7). So,

it can be discerned in a comparison of the two x- and z-axes that x-axis demonstrates structural strength and z-axis shows the changeability of the architectural context.

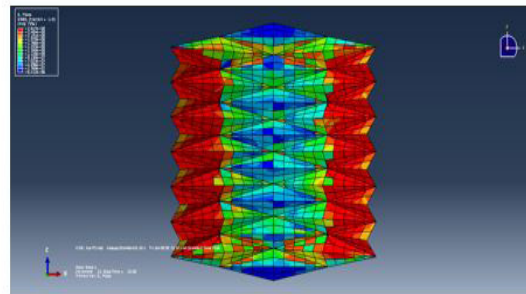
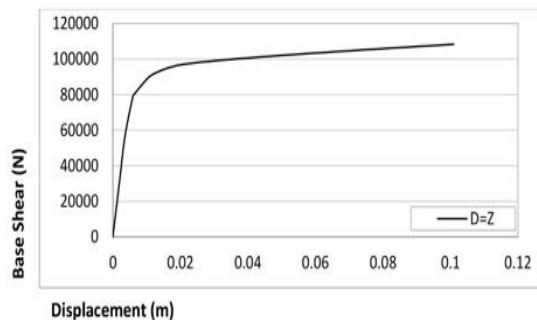


Fig. 7. Distribution of Stress Along with the Model with Pushover Loading Along X-Axis

Based on the results given in Table (1), D-Z axis of the origami pattern is the weak direction but it exhibits flexible behavior. D-X axis is the strong direction of the origami pattern that also features balance and stability. The extra loading analysis, as well, reflects

the bi-dimensional nature of this pattern's performance in response to architectural flexibility and structural stability. Y-axis, as well, showed the highest resistance against the gravitational forces.

Table 1. The General Results of Various Kinds of Loading in Various Axes

	Loading Direction	Orthogonal Loading	Pushover Loading
Maximum Force (Newton)	X	-	196782
	Y	280182	-
	Z	-	108309
Maximum Displacement (Meter)	X	-	0.063
	Y	0.093	-
	Z	-	0.10

Therefore, using this pattern as physical body of space gives the required structural strength on an axis (x) for stability and physical balance and the required

flexibility and changeability along with the other axis (z) for the context's adaptability to the peripheral environment.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

- Factors influencing the space’s physical flexibility can be obtained based on the analysis of the adaptability of the physical factors and their sub-branches.
- Based on the results, use can be made of a diamond origami pattern to figure out models for constructing the building’s physical body most capable of adaptability to the various environmental conditions.

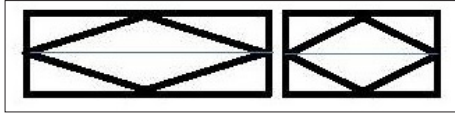


Fig. 8. Kinds of Diamond Patterns

B) Adaptability in Shape and Form:

In creating the spatial covering using diamond



Fig. 10. Diamond Pattern with the Axial form Enabling Linear Motion



Fig. 11. Diamond Pattern with Circular and Central Form

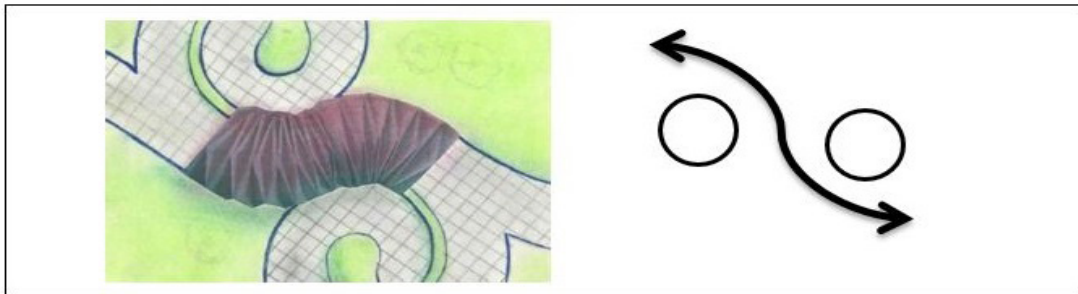


Fig. 12. Spiral Form in Line with Environmental Adaptation

C) Adaptability in the Siting of Architectural Elements:

By the assistance of cutting or omitting some

The various models of space’s physical adaptability to the various conditions include the followings considering the use of diamond origami pattern based on the adaptability sub-branches:

A) Adaptability in Dimensions and Size:

In a diamond pattern, the change in the length and width dimensions of the folding patterns enables the creation of structures with dimensions and sizes matching with the intended needs.

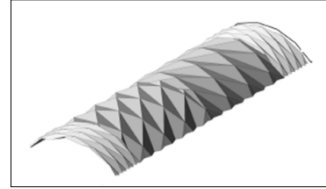


Fig. 9. Adaptable Structure Based on Diamond Pattern

origami, various forms can be created that possess adaptability in proportion to the environment.

constituent members of the pattern, the architectural elements such as the entrance and exit can be arranged in proportion to the environmental conditions.

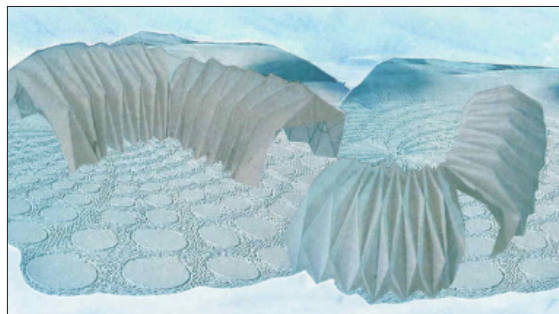


Fig. 13. An Example of Patterns’ Arrangement for Shaping the Architectural Elements

D) Adaptability in Diversity and Variegation:
Diamond pattern created by metal plates features
diversity in various colors. In terms of the general

dimensions of the spatial context, as well, it is
adaptable to the various environments.

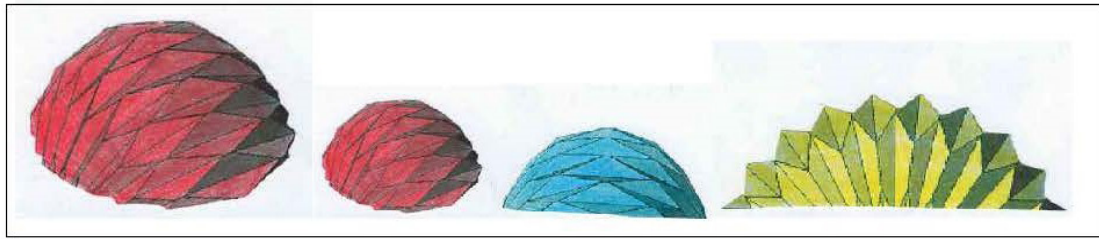


Fig. 14. Diversity and Adaptation in the physical body by the Use of Diamond Pattern

REFERENCES

- Ahmed, E., Wan Badaruzzaman, W.H., & Wright, H.D. (2000). Experimental and Finite Element Study of Profiled Steel Sheet Dry Board Folded Plate Structures. *Thin-walled Structures*, 38(2), 125-143. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(00\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00039-2).
- Albotan, D. (2009). [Flexibility in multi- Residential Housing projects: Three innovative cases from Turkey](#). 1-74.
- Baghaei, A. (2009). [The Role of Structure in Aesthetic of Contemporary Architecture](#). *Hoviat Shahr*, 8(2), 5-14.
- Bemanian, M.R., Amirkhani, A., & Leilian, M.R. (2010). Order and Disorder in Architecture. Tehran: Tehran Press, 91.
- Bentley, I. (1985). [Responsive Environments: A Manual for Designers](#). New York: Routledge.
- Buri, H., & Weinand, Y. (2008). [ORIGAMI-folded Plate Structures](#). *Architecture* (No. CONF).
- Buri, H. U., & Weinand, Y. (2010). Origami aus Brettsper Holz. *DETAIL Zeitschrift f, r Architektur+ Baudetail*, (ARTICLE), 1066-1068.
- Cambridge Advanced Learner's Dictionary (2013), Fourth Edition
- Charleson, A. (2014). [Structure as Architecture: A Source Book for Architects and Structural Engineers](#). New York: Routledge.
- Ching, F.D. (2014). [Architecture: Form, Space, and Order](#). John Wiley & Sons. 201.
- Ching, F.D., Onouye, B.S., & Zuberbuhler, D. (2013). [Building Structures Illustrated: Patterns, Systems, and Design](#). John Wiley & Sons. 134.
- Dehkhoda, A.A. (1998). Dehkhoda Dictionary Encyclopedia. Tehran: Tehran University Press.
- Einifar, A.R. (2003). A Model to Analyze Residential Spaces: Based on Flexibility Criteria of Traditional Housing. *HONAR-HA-YE-ZIBA (FA)*, 13(461), 64-77. https://jhz.ut.ac.ir/article_10660.html
- Einifar, A.R., Shayan, H.R., & Garipour, M. (1989). Investigation and Comparison of Flexibility in Residence Architecture between Iran and Japan. *ABADI Journal*, 55, 12-19.
- Erabi, J. (2011). Form Creation, 6ed. Mashhad: Kasra Publishing, Mashhad, 14- 138.
- Felbrich, B., Nönig, J.R., & Wiesenhütter, S. (2014). Rigid Folding in Robotic Multi-agent Systems. *Procedia Computer Science*, 35, 1342-1351. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.174>.
- LaFosse, M.G., & Alexander, R.L. (2008). [Origami Art: 15 Exquisite Folded Paper Designs from the Origamido Studio: Intermediate and Advanced Projects: Origami Book with 15 Projects](#). Tuttle Publishing.
- Lang, J. (1987). [Creating Architectural Theory. The Role of the Behavioral Sciences in Environmental Design](#).
- Mahdavi-nejad, M.J., Farajolahi-rad, A., & Karam, A. (2011). [Flexible Architecture, an Approach toward Architecture and Structure Harmony. Published by Art and Architecture](#), Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. 1.
- Matcha, H., & Ljubas, A. (2011). [Parametric Origami. New Design Concepts and Strategies_eCAADe 28](#). 326
- Moore, F. (1999). [Understanding Structures. McGraw-Hill Science Engineering](#).
- Musavi, S.S. (2013). Analysis of Seismic Behavior and Impact of Opening on Composite Shear Wall Incorporating Flat and Corrugated Plates [MSc Thesis], Department of Civil Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.
- Salvadori, M.G., Heller, R., & Oakley, D.J. (2017). [Salvadori's Structure in Architecture: The Building of Buildings](#).
- Schenk, M., & Guest, S.D. (2011). [Origami Folding: A Structural Engineering Approach. In Origami 5: Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education](#). 291-304. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Schneider, T., & Till, J. (2005). [Flexible Housing: Opportunities and Limits](#). *Arq: Architectural Research Quarterly*, 9(2), 157-166.
- Sheppard, D., & Town, P. (1974). Housing Flexibility? *Architectural Design*, 43(11), 698-727.
- Venturi, R., & Scully, V. (1977). [Complexity and Contradiction in Architecture. The Museum of Modern Art](#). 1, 12-49.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Zendehdelan, A., Khosravi, H., & Safaeian, E. (2019). Flexible Physical Body by Blending Architecture and Structure Using Origami. *Armanshahr Architecture & Urban Development Journal*. 12(28), 49-58.

DOI:10.22034/AAUD.2019.97358

URL: http://www.armanshahrjournal.com/article_97358.html

