نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی • شماره ۳۹ • پاییز ۱۳۸۸

# مروری بر سازه‌های تنسگریتی (کش بستی)
## با تاکید بر کاربرد آن در معماری

دکتر هاشم هاشم نژاد*[۱]، مهندس سارا سلیمانی[۲]

[۱] دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

[۲] عضو هیأت علمی دانشگاه کردستان و دانشجوی دکترای معماری دانشگاه علم و صنعت ایران ، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۶/۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۸۸/۹/۲۱)

## چکیده:

در حدود پنج دهه پیش، سازه های تنسگریتی به عنوان یکی از انواع سازه های فضاکار مطرح گردیدند. این سازه ها به دلیل دارا بودن مزایای بیشماری چون سبکی، زیبایی، کارآیی، قابلیت باز و بسته شدن و تطبیق پذیری با نیروهای ایجاد شده در سازه در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از معماران، مهندسین، ریاضیدانان و متخصصین بسیاری از علوم دیگر را به خود جلب نمودند. کابرد این سیستم در مجسمه سازی و در طراحی صنعتی و ساخت اشیا کاربردی و تزیینی، اندیشه استفاده از آن را در معماری مطرح نمود. اما به علت پیچیدگی نسبی و البته عدم آشنایی معماران با این نوع سازه در ایران علاوه بر اینکه نمونه قابل توجه ساخته شده‌ای از سازه تنسگریتی وجود ندارد، منابع بسیار محدود و مختصری نیز در ارتباط با آن در اختیار می باشد. بسیاری از معماران و مهندسین، سازه تنسگریتی را نمی شناسند و نهایتا" فقط در حد اسم با آن آشنایی دارند. از این جهت این مقاله به منظور آشنایی بیشتر معماران و مهندسین سازه با این نوع سازه و با هدف گام نهادن به سوی بکارگیری عملی آن در معماری و مهندسی سازه به معرفی سازه های تنسگریتی، ویژگی ها و کاربرد عملی آن در عرصه معماری امروز جهان پرداخته است.

## واژه های کلیدی:

سازه، فضاکار، تنسگریتی، کشش، فشار.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۷۷۲۴۰۴۶۷-۰۲۱، نمابر: ۷۷۲۴۰۴۶۸-۰۲۱، E-mail: hashemnejad@iust.ac.ir.

## مقدمه

سازه های فضاکار[۱] از اوایل قرن بیستم به عنوان گروهی از سازه ها که از نقطه نظر سبکی، مقاومت، تطبیق پذیری و نیز سرعت اجرا پاسخ مناسبی برای تخیلات معمارانه تلقی می‌گردیدند، در عرصه ساخت و ساز وارد گردیدند. رفتار سه‌بعدی این سازه ها، پیش ساختگی و امکان تولید انبوه باعث گردید که سازه های فضاکار به عنوان یکی از مؤثرترین روش ها برای پوشش سقف ها و اجرای ساختمان ها مورد توجه معماران و مهندسان قرار گیرند.

تلاش های بسیاری از متخصصین به ابداع سیستم های گوناگون سازه های فضاکار منجر گردید. این دستاوردها، دریچه‌های جدیدی را به روی معماران و مهندسان برای طراحی فرم های بدیع و نو باز کرد و اجرای ساختمان هایی با ابعاد گوناگون را با پایدارترین و اقتصادی ترین روش ها امکان پذیر ساخت.

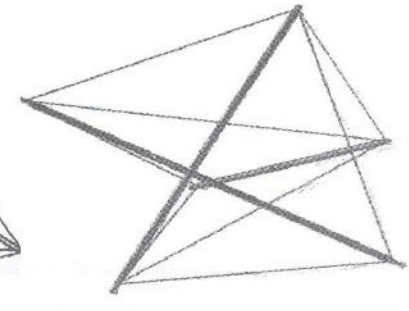
در این بین سازه های تنسگریتی[۲] نیز به عنوان یکی از انواع سازه های فضاکار مطرح گردیده و محبوبیت فراوان یافتند.

## تعریف مفهوم تنسگریتی

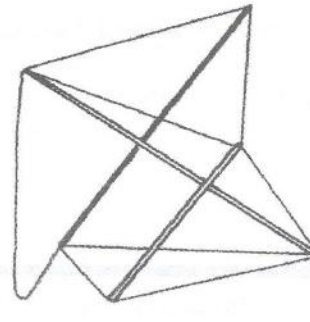
کلمه تنسگریتی از ادغام دو کلمه Tensional و Integrity تشکیل شده است، سازه های تنسگریتی سازه های سه بعدی پایداری هستند که ساختارشان از طریق تعادل پیچیده ای از نیروها در بین عناصر فشاری منقطع و عناصر کششی ممتد فراهم می گردد (Robin,1996, 26).

به بیان دیگر سیستم های تنسگریتی شبکه های خود پایدار[۳] با اتصالات لولایی هستند که از ساختار به هم پیوسته ای از کابل ها در کنار ساختار ناپیوسته‌ای از میله ها تشکیل یافته‌اند (Tibert, 2002, 24).

از نظر تئوری میله ها اجزا مستقیم الخطی هستند که جهت تحمل فشار طراحی شده اند و کابل ها اعضا مستقیم الخطی هستند که در حالت عادی حداکثر طولشان را دارند اما می توانند به طور آزادانه تغییر طول یافته و کوتاه تر گردند، بنابراین نمی توانند فشار را تحمل کنند مگر آنکه پیش تنیده شوند (Bing, 2004,10) (تصویر ۱).



تصویر ۱- مفهوم تنسگریتی.
ماخذ: (Robin,1996)



تصویر ۲- اثر loganson.
ماخذ: (Tibert, 2002)

## تاریخچه ظهور مفهوم تنسگریتی

### مجسمه سازی، نخستین جایگاه ظهور مفهوم تنسگریتی

اولین نمونه از آنچه که سازه تنسگریتی نامیده می شود، توسط هنرمند کانستراکتیویست روسی Karl loganson ساخته و در نمایشگاه Obmokhu در ۱۹۲۱ به نمایش درآمد. او می گوید: "- از نقاشی تا مجسمه سازی، از مجسمه سازی تا ساخت و از ساخت تا تکنولوژی و نوآوری- این مسیر انتخابی من است و مطمئنا" مسیر انتخابی هر هنرمند انقلابی خواهد بود." او در اثرش سه تکیه گاه را در تعادل قرار داده است، میله های تحت فشار به کمک ریسمانِ پیوسته تحت کشش که از سوراخ میله ها از رأس تا رأس کشیده شده است در تعادل قرار گرفته اند (تصویر۲). با استناد به تعریف، این سازه نمی تواند یک سازه تنسگریتی واقعی باشد چرا که کشیدن نخها می تواند موقعیت میله ها را تغییر دهد، اما شباهت نزدیکی به سازه تنسگریتی دارد.

متأسفانه این ایده در روسیه ادامه داده نشد، از این جهت ابداع سازه های تنسگریتی را به اسنلسون[۴] در ۱۹۴۸ نسبت می دهند. او با طراحی اولین فرم های مجسمه گونه به صورت ترکیبی از اعضاء فشاری غیرممتد و کابل های کششی پیوسته، عنوان ابداع کننده این سازه را بخود اختصاص داده است. اسنلسون تعدادی سازه تنسگریتی با تنوع شکلی فراوان ساخت و در نمایشگاه های هنری به نمایش درآورد. تعدادی از این مدل ها به کمک میله های X شکل طراحی گردیدند. این مقاطع X شکل از قطعات چوبی ساخته شده اند که رئوس آنها با کابل به یکدیگر اتصال یافته است. دو واحد X شکل در یکدیگر در یک مسیر سه بعدی قرار داده شده و نهایتا" به یک صفحه چوبی اتصال یافته اند (تصویر۳). مطابق با توصیفات اسنلسون، با این روش مدل تنسگریتی ای بدست می آید که شامل دو میله و چهار کابل است. اگرچه که کابل ها در انتهای میله ها، به آنها اتصال یافته اند، اما در واقع پیوسته هستند. بعدها اسنلسون

تلاشش را جهت جداکردن اعضا فشاری در نقاطی که یکدیگر را قطع می کنند، ادامه داد.

مشهورترین کار اسنلسون Needle Tower می باشد (تصویر ۴)، که با ارتفاع ۹۰ فوت در فضا مجسمه وار بصورت نامنظمی پیش رفته است. این کار در ۱۹۶۸ در واشنگتن به نمایش درآمد. جالب توجه است که در آن زمان مجسمه ساز باور نداشت که سازه او در نقش تحمل کننده بار نیز، موفق بوده است.

در اولین نمونه ثبت شده توسط اسنلسون، واحد تنسگریتی، یک شکل بادبادک مانند بصورت لوزی ساده می باشد. دو میله در وسط همدیگر را قطع کرده و تارهای کششی پیرامون از چهار انتهای میله‌ها امتداد یافته اند. مقاومت آنها در حالت افقی بسیار زیاد است، اما در فضای سه بعدی ناپایدار هستند (وقتیکه بر لبه ها قرار می‌گیرند) که البته با قرار دادن دو نمونه از این واحدها در کنار یکدیگر می توان شرایط پایداری را فراهم ساخت (تصویر ۵).

### ورود مفهوم تنسگریتی به حوزه مهندسی و معماری

اگرچه که آغازگر و پدیدآورنده این سازه اسنلسون است، اما برای اولین بار فولر[5] بود که از دریچه معماری به آن نگریست. فولر سریعا" پتانسیل های ایده اسنلسون را شناسایی، نامگذاری و اصلاح کرد و سرانجام در ۱۹۶۲ به ثبت رسانید. فولر در اختراعش نشان داد که چگونه می توان مفهوم تنسگریتی را برای ساختِ یک گنبد تک لایه بکار گرفت (تصویر ۶). مدل فولر از سه میله فشاری و کابل کششی تشکیل شده بود به گونه ای که کابل ها در انتهای میله ها قطع نشده و بصورت پیوسته ای ادامه یافته بودند.

سازه های تنسگریتی بطور مستقل از این دو، توسط امریخ[6] در دهه ۶۰ نیز معرفی شدند. او یک روش سیستماتیک را جهت استخراج فرم های تنسگریتی از محدوده ای از چندضلعی های افلاطونی و ارشمیدسی بدست آورد.

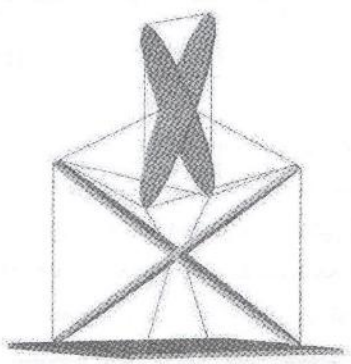
## شکل شناسی سازه های تنسگریتی

فولر باور داشت که تنسگریتی قانون طبیعت است. او باور داشت که سازه های تنسگریتی بطور طبیعی فرم های سازه ای بهینه ای هستند، بدون آنکه آنها را آزموده باشد. باور او تأثیر مهمی بر پیرامونش برجای گذاشت. مطالعات شکل شناسی نهایتا" تأثیر مفهوم تنسگریتی بر معماری را نشان داد.

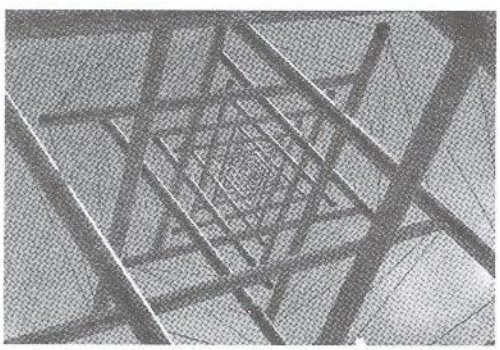
## مدول تنسگریتی[7]

مدول تنسگریتی به منشور تنسگریتی[8] مثلثی بر می گردد. یک حجم خود پایدار که از تعادل بین میله های مجزا و کابل های پیوسته شکل گرفته است. در آن میله های مایل، رئوس مخالف هم را جهت شکل گیری منشور به هم وصل کرده اند. شرایط تعادل برای هر اتصال یکسان است. میله ها در حجم سه بعدی توسط سه گروه کابل بسته شده و به تعادل رسیده اند (Bing, 2004, 185) (تصویر ۷).

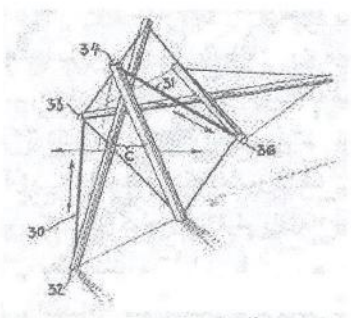
در بلوک های سازه ای مدول های تنسگریتی می توانند با طرح‌بندی های متنوعی مورد استفاده قرار گیرند. در یک



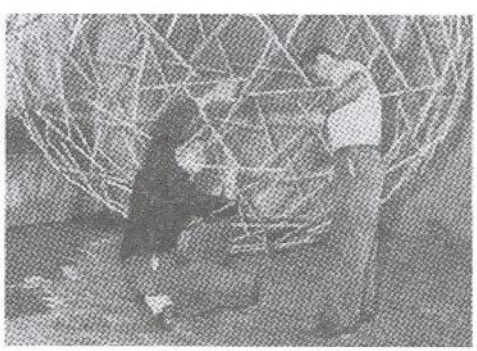
تصویر ۳- مدل X شکل.
ماخذ: (Tibert, 2002)



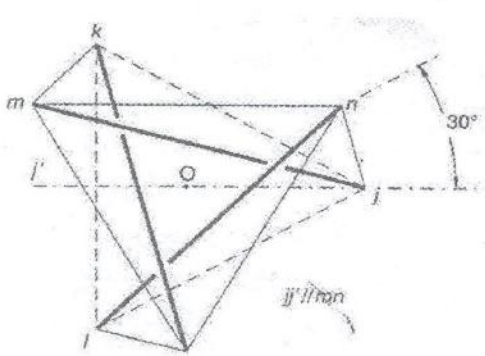
تصویر ۴- Needle Tower.
ماخذ: (Robin,1996)



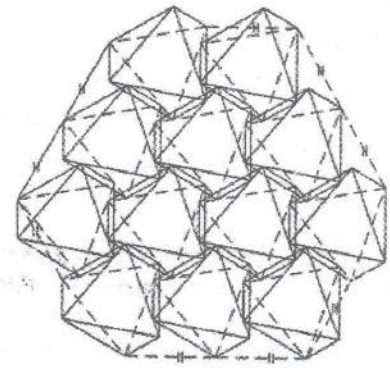

تصویر ۵- اولین نمونه ثبت شده.
ماخذ: (Robin,1996)



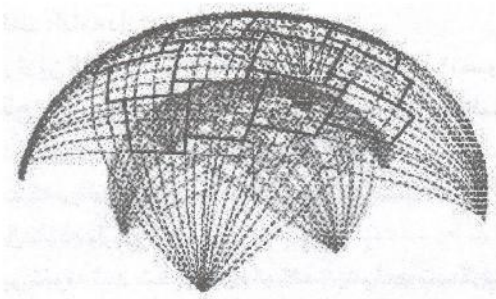
تصویر ۶- گنبد ساخته شده توسط فولر.
ماخذ: (http://www.bfi.org/images/content/coming soon/15_tensegrity.png)-




تصویر ۷- مدول تنسگریتی.
ماخذ: (Bing,2004)



تصویر ۸- اشکال با میله های منفصل.
ماخذ: (Bing,2004)



تصویر ۹- فرمهای منحنی دو لایه با پایه مربعی.
ماخذ: (Marshall, 2003)

تقسیم‌بندی اشکال نشأت گرفته از مدول های تنسگریتی در دو گروه دسته بندی می گردند.

O اشکال با میله های منفصل (اتصال میله به میله وجود ندارد)؛ در اینجا مدول ها مستقیما" در رئوس به یکدیگر اتصال دارند. هر کابلی به دو قسمت تقسیم می شود ضمن آنکه میله ها در تماس با یکدیگر نیستند. این اشکال، اشکال هندسی خالص تلقی می گردند. بنابراین حتی شبکه هایی که از طریق اتصال منشورهای از نظر هندسی صلب تشکیل یافته اند، همچنان انعطاف پذیر هستند (تصویر ۸).

O اشکال با میله های پیوسته؛ روش دیگری که توسط مُترو[9] پیشنهاد شده است، اتصال گره به گره می باشد. در این حالت میله ها در انتها به یکدیگر اتصال یافته اند. این فرم ها مفهوم جزیره های از فشار در دریایی از کشش را نقض می کنند. اما با این وجود در دسته سیستم‌های تنسگریتی قرار می گیرند و از طریق مفهوم گسترش‌یافته فرض اولیه، شکل گرفته اند. دو روش برای شکل گیری اشکال با میله‌های پیوسته وجود دارد. یکی اتصال رأس به رأس است. در این حالت مدول ها در هر دو لایه تنها از طریق رئوس به یکدیگر اتصال یافته اند. روش دیگر اتصال رأس به لبه می باشد (Bing, 2004,194).

O اشکال تک لایه؛ Vilanay یک سیستم تنسگریتی تک لایه را ابداع کرد که در آن میله ها به‌جای آنکه بصورت عمودی آویزان شوند، در محیط و پیرامون یک شکل کروی استقرار یافته اند. این نمونه بصورت یک طرح مطالعاتی باقی ماند و مقیاس واقعی پیدا نکرد. در گنبد فولر دهانه ها افزایش و انحناء کاهش یافته و میله ها نیز به یکدیگر اتصال یافته اند، اما Vilanay از این ایده دوری جست، از این جهت به خاطر اضافه طول لوله‌ها قیمت شدیدا" بالا رفت (Hanaor,1997).

O اشکال دولایه؛ به کمک واحدهای منشوری تعریف شده اند. آغاز این مفهوم از ایده اشکال تک لایه Vilanay آغاز گردید. ساده‌ترین شکل آن از سه میله فشاری و ۹ کابل کششی تشکیل یافته است. با هندسه منقطع در میله ها، ممان های خمشی در آنها به حداقل می‌رسد (Irving et. Al, 2001, 84) (تصویر ۱).

O شکل دولایه با پایه مربعی؛ مُترو یک روش متفاوت را برای طراحی سازه های تنسگریتی از طریق مورد توجه قرار دادن اتصالات، ارائه کرده است. وی یکسری منشورهای تنسگریتی ایجاد کرده که در یک آرایش گره به گره اتصال یافته اند (Kahala, 2000). در این حالت میله‌ها مستقل از یکدیگر نبوده و ساختار آنها ساده تر شده است. اتصال میله های فشاری به یکدیگر منجر به سادگی هندسی و پیوستگی کابل ها گردیده است.

**فرم های گنبدی دولایه با پایه مثلثی:** Hanaor بر بررسی و مطالعه فرم های گنبدی تأکید داشت و آزمایشاتش را در ارتباط با یک ساختار گنبدی که خود پیشنهاد کرده بود، انجام داد. او در هندسه سازه های تنسگریتی دو لایه، یک ساختار گنبدی با واحدهای مثلثی را بکار گرفت و استحکام واحدهای مثلثی را مورد بررسی قرار داد.

**فرم های منحنی دولایه با پایه مربعی:** بر اساس اتصالاتی که Hanaor پیشنهاد کرده بود، Liapi آرایش منحنی واری از واحدهای تنسگریتی منشوری با پایه مربعی را بجای واحدهای مثلثی Hanaor، مورد بررسی قرار داد. او امکان ایجاد انحنا در دو محور عمود بر هم را نشان داد (MARSHALL, 2003, 28) (تصویر ۹).

## مدل سازی و تعیین مشخصات هندسی سازه‌های تنسگریتی

پیچیدگی مفهومی وهندسی و ناتوانی در ارائه مدل های ریاضی برای تحلیل رفتار سازه های تنسگریتی از جمله فاکتورهای مهمی هستند که روند پیشرفت این سازه را کند ساخته و تحت تأثیر قرار داده است. از موارد دیگری که به عنوان عامل بازدارنده توسعه به آن اشاره شده است، فقدان استانداردهای ساخت و ساز برای این نوع از سازه هاست. تربیت طراحان، کارگران ساختمانی، بیمه، خطرپذیری اقتصادی و ...از جمله دیگر عوامل تأثیرگذار هستند (Corgan, 2002).

اما همچنان مهم ترین عامل، عدم توانایی طراحان در تجسم ذهنی این سازه ها بواسطه پیچیدگی ساختاریشان، شناخته شده است. در ادامه به روش های متداولی که برای مدل سازی و تعیین مشخصات هندسی سازه های تنسگریتی بکار می رود، اشاره می‌گردد.

### مدل سازی سازه های تنسگریتی

برای سیستمی که هم از نظر هندسی و هم از نظر مفهومی پیچیده است، یک روش سیستماتیک برای یافتن فرم ضروری است. جبر فرمین توسط هوشیار نوشین ارائه شده و می تواند جهت تعریف یک فرم پیچیده بکار رود، هم چنین برنامه نرم افزاری فرمین برای این

سیستم در مرکز تحقیقات سازمان مهندسی سیویل در دانشگاه ساری در گیلفورد انگلستان طراحی گردیده است[۱۰].

فرمین ممکن است برای کسب اطلاعات مربوط به اعضای یک سیستم سازه ای از جمله مختصات گره ها، بارگذاری های ویژه، تعداد اتصالات و ... نیز بکار رود، به علاوه اطلاعات بدست آمده برای تصور بصری سیستم سازه ای یا حتی به‌عنوان اطلاعات ورودی جهت انجام تحلیل، می تواند بکار رود (Nooshin,1991,1202). با اینحال روش فرمین برای نمونه های سازه های تنسگریتی دولایه‌ای که توسط Hanaor و Liapi ارائه شده اند، قابل استفاده نمی‌باشد.

### تعیین مشخصات هندسی سازه های تنسگریتی

موضوع یافتن فرم یا تعیین شکل هندسی یک سازه تنسگریتیِ پایدار توجه زیادی را بخود جلب کرده است. دو موضوع قابل بررسی وجود دارد:

- o تعیین چگونگی اتصال اعضا فشاری و کششی برای تشکیل یک سازه پایدار؛
- o تعیین طول اعضا کششی و فشاری برای تشکیل یک سازه پایدار.

یافتن فرم پایدار برای این نوع سازه ها بسیار پیچیده است. در سازه های اولیه ای که توسط فولر و اسنلسون ارائه شد، از چندوجهی های محدب به عنوان مدول اولیه در تشکیل فرم استفاده شد که بعدها این روش به اَشکال متنوعی منجر گردید که در کارهای Pugh خلاصه شد. به هرحال تمام اینها براساس هندسه‌های منظمی شکل گرفته اند.

متدولوژی مشخص و واضحی برای یافتن فرم پایدار گنبدهای تنسگریتی تک لایه ارائه نگردیده است. اما در ساختاری که بیشتر عناصر آن یکسان هستند، فرم می تواند به کمک یک روش پارامتریک تعریف گردد.

تعریف سازه های تنسگریتی دولایه به روش هندسی امکان پذیر می باشد، چراکه تمام ارتباطات بین عناصر به کمک قوانین هندسی تعریف شده اند. سیستم های تنسگریتی که براساس یک واحد ساده شکل گرفته اند، طرح های پارامتریک هستند. با این وجود هیچکدام از راه حل هایی که در صنعت و محیط آکادمیک وجود دارند، جوابگوی هندسه سازه های تنسگریتی دولایه و پارامترهای مرتبط با آن نیستند.

Liapi روشی را برای واحدهای تنسگریتی دولایه با پایه مربع جهت ایجاد گنبد کروی ساده عرضه کرده است. او براساس مشاهداتش یک روش هندسی را برای تعریف ساختار فضایی سازه های تنسگریتی کروی پیشنهاد کرده است (۲۰۰۱).

روشی برای تولید شبکه های تنسگریتی کروی با استفاده از نرم افزار اتوکد به کمک هندسه توصیفی ارائه شده است. این روش تمامی پارامترهای شبکه های تنسگریتی کروی را از قبیل تناسب واحدها، هم پوشانی واحدها و ... را دربرمی گیرد و از مسیر گرافیکی گام به گامی که از روش های هندسی تبعیت می‌کند، بهره جسته است (Kin & Liapi, 2004, 28).

لازم بذکر است تاکنون هیچگونه متدولوژی مشخصی که بتواند ثبت گردد، تکرار شود و منتهی به شکل سازه نهایی گردد، ثبت نشده است و هنوز نیاز بوجود روشی جهت قانون مند کردن این هندسه و استانداردی جهت خواسته ها و اولویت هایی که توسط طراح مطرح می گردد، احساس می شود (Bing, 2003, 85).

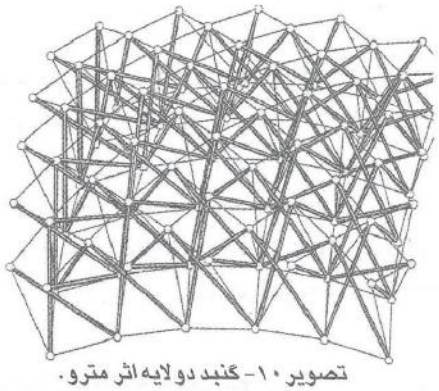
## مزایای سازه های تنسگریتی

همانطور که ذکر شد سازه های تنسگریتی دارای فوائد متعددی هستند که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره داشت:

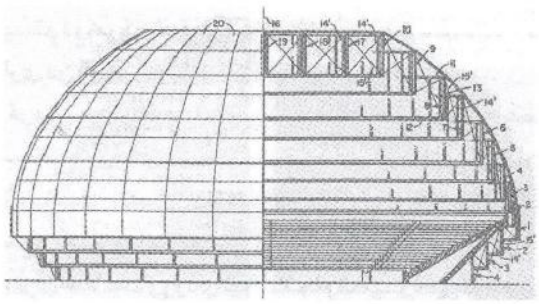
- o قابلیت باز و بسته شدن؛ سازه های صلب قابلیت جابجایی و تغییر کمی دارند، این در حالی است که در سازه های تنسگریتی با توجه به اینکه عناصر فشاری بصورت غیرممتد می باشند، جابجایی و تغییر مکان در این نوع سازه ها با حداقل عناصر سازه ای امکان پذیر می باشد. این امر در ساخت دکل های مخابراتی و تجهیزات مورد نیاز فضانوردان در فضا تاثیر فراوانی دارد (Furuya, 1992).
- o سازه های سبکی هستند که نسبت مقاومت به وزنشان بالاست.
- o با حداقل مصالح ساخته می شوند.
- o تمامی اعضا فقط تحت بارگذاری محوری قرار دارند که منجر به سبکی و استحکام آنها می گردد.
- o می توانند به صورت یک سیستم مدولار عمل کنند.
- o بقای سیستم؛ عملکرد سازه ای المان های موجود در سیستمهای تنسگریتی و چگونگی انتقال بار در آنها به نحوی است که در صورت عملکرد نامناسب یک المان انتقال نیرو به سادگی از طریق سایر اعضا صورت گرفته و از این طریق سازه پایدار باقی مانده و خاصیت خود را حفظ می‌نماید (Sultan, 2004).
- o مقیاس پذیری؛ وجود مدول پایه در هندسه سازه های تنسگریتی امکان ساخت آن را در ابعاد گوناگون با کارکرد سازه ای مناسب فراهم می سازد (Hernandez Juan, Mirats Tur, 2008, 27).
- o ساخت آن ساده بوده و خطر کمی در موقع حادثه ایجاد می کنند.
- o فرم های زیبایی ایجاد می کنند که می توانند نظر بیننده را بخود جلب کنند.

## ظهور مفهوم تنسگریتی در معماری

مهندس لهستانی، زالوسکی[۱۱] اولین گنبد تنسگریتی را در یک استادیوم ورزشی ۱۲۰۰۰ نفره در فاصله سال های ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۲ در Katowice اجرا کرد. او این گنبد را قبل از آنکه فولر حق



تصویر ۱۰- گنبد دو لایه اثر مترو.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۱۱- گنبد Aspension اثر فولر.
ماخذ: (Robin,1996)

امتیاز گنبد Aspension را بگیرد و ۲۶ سال قبل از اینکه گایگر[۱۲]، اولین گنبد تنسگریتی خود را بسازد، ساخت. سقف Katowice 400 فوت دهانه دارد و از اولین تلاش گایگر نیز بزرگ تر است. او یک سیستم ۱۲ حلقه ای را به همراه میله هایی به ارتفاع سه متر ایجاد کرده است که سقف فلزی و گنبد مرکزی را حفظ می کنند.

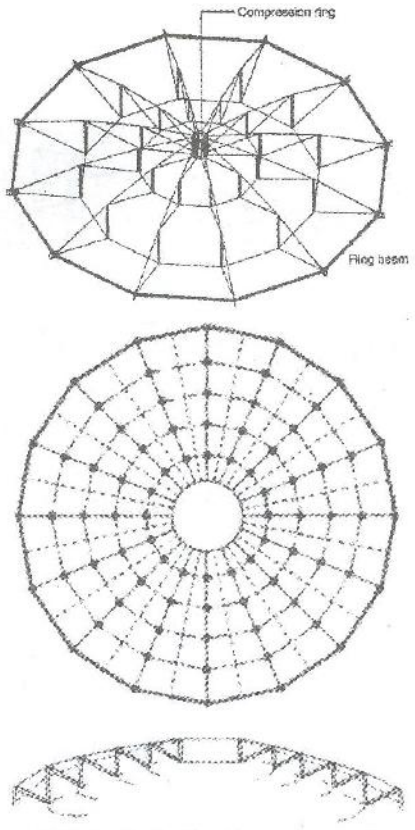
در یک مثال دیگر از یک سیستم تنسگریتی ناخالص[۱۳]، مُترو رئیس آزمایشگاه مهندسی سیویل دانشگاه مانتلیر[۱۴]، جهت ایجاد یک گنبد دولایه، اعضا فشاری را بهم متصل ساخت (تصویر ۱۰). همانند شبکه تنسگریتی دو لایه امریخ، سطح بالایی و پایینی کاملا" از کابل تشکیل یافته و میله های فشاری در اقطار این شبکه کابلی قرار گرفته اند. نوآوری کار مُترو در اتصال میله ها به همدیگر در قسمت انتهایی اشان می باشد. در صفحه پایینی به هر گره چهار میله و در صفحه بالایی به هر گره دو میله وارد می شود. کابل ها در بالا و پایین شبکه های مربعی را ایجاد کرده اند، شبکه بالایی در هماهنگی با شبکه پایینی کمی چرخش دارد. شبکه کابل های بالا و پایین همچنان از کابل های ممتد تشکیل یافته اند. ویژگی شاخص گنبد مُترو این است که شلوغی نمونه کارهای Hanaor, Emmerich, Vilnay را تخفیف داده است. این مدل نسبت به انواع قبلی آن ساده تر است، چراکه اعضا بصورت غیرقابل پیش بینی نچرخیده و گسترش نیافته اند، از این جهت قابل توجه می باشد.

در ۱۹۶۴ فولر سیستم گنبد Aspension خود را ثبت کرد (تصویر ۱۱). دلیل نامگذاری او سازه معلق بالارونده آن می باشد که در آن حلقه های داخلی از میله هایی که بر حلقه های بیرونی قرار دارند، آویزان شده اند. بیرونی ترین حلقه که از کابل های کششی آویزان است به بالای دیوارهای پایینی سازه اتصال یافته است. در هر حلقه میله ها بصورت عمودی قرار گرفته اند، از این میله ها کابل‌هایی آویزان شده که حلقه کوچک تر داخلی را نگه می دارند. فولر در مورد پوشش این سازه سکوت کرده است، اما واضح است که سقف می تواند بصورت یک پوسته سبک ضدآب اجرا گردد. سقف توسط تعدادی میله نگه داشته می شود، هیچکدام از این میله‌ها به زمین نمی رسند. فولر در توضیح این گنبد در کتابش می‌نویسد: "من در دنیای تنسگریتی متوجه شدم که ساخت آنچه را که من گنبد Aspension نامیده ام، آسان است. این گنبد می تواند بصورت تدریجی از سمت بیشترین قطر در زمین سوار شده و به بالا انتقال یابد. این سازه حالت آکاردئونی دارد و مثل چراغ دریایی ژاپنی قابلیت تاشدن دارد و نهایتا" می تواند گسترش یابد." فولر در توضیح ابداعش بیان می دارد که این اختراع وابسته به ذهن اوست و مردمی که این سازه ها را می بینند آنها را همانند مجسمه های اسنلسون به خاطر خواهند آورد.

برخی ادعا دارند که این اثر فولر به دو دلیل شکست خورده است. اول اینکه سیستم بسته ندارد و نهایتا" میله ها به یک حلقه فشاری در پیرامون می رسند و دیگر اینکه میله های عمودی به حلقه های نسبتا" محکمی اتصال یافته اند و ساختار یک سازه تیر و ستون را تداعی می کنند. اما برخی دیگر اعتقاد دارند که می توان بصورت منصفانه‌ای این گنبد را جزء سازه های تنسگریتی بحساب آورد و حتی آن را اولین کاربرد معمارانه این نوع سازه تلقی کرد. حتی می‌توان این گنبدها را بدون حلقه فشاری پیرامونی ساخت بطوریکه شبیه تر به سازه های تنسگریتی گردند. فولر نتوانست صورت واقعی ایده اش را ببیند و بکام مرگ رفت.

گایگر نیز چهار نوع از ا ین گنبدهای تنسگریتی را در زمان کمی پیش از مرگش ساخت (تصویر ۱۲). برای او تنسگریتی راهی برای برپا ساختن سقف های پارچه ای بدون استفاده از سازه های بادیِ گران قیمت و بدون خطرات ناشی از تخریب آنها بحساب می آید.

گایگر با همراهی معمارانی چون Kim swoo-Guen و Kum-Hee Kang ساخت دو گنبد کوچک در سئول را تجربه کرد. او یک زمین ژیمناستیک با قطر ۳۹۳ فوت و یک استادیوم شمشیربازی با قطر ۲۹۵ فوت را طراحی کرد. در زیر سقف یک لایه عایق بندی به ضخامت ۸ اینچ، یک آستر آکوستیک و یک مانع تولید بخار قرار داد. گایگر دریافت که در حدود ۲۵ تن از تجهیزات، شامل نورپردازی و دوربین ها می بایستی از نقاط منفردی از سازه آویزان گردند، از این رو می بایستی دوباره اطمینان می یافت که گنبدها می توانند بارهای نامتعادلی چون بار برف را تحمل کنند. گایگر بار برف را ۲۵ پوند بر فوت مربع در نظر گرفت و سازه را به گونه ای طراحی کرد که می‌توانست در حدود ۸۰۰ تن یعنی بیش از ۱۰ برابر وزن خودش را تحمل کند. گنبدهای گایگر مثل آنچه که فولر پیشنهاد داده بود شامل سطوح سه بخشی (مثلث بندی) نیستند.[۱۵] کابل ها و میله‌ها، خرپاهای مسطح عمودی ای را شکل داده اند که بر حلقه های بالارونده واقع گردیده اند. گایگر می گوید که من دریافته ام که مثلث‌بندی یک التزام در سازه های کابلی نیست، مثلث‌بندی اعضاء اضافه‌ای را به سازه می افزاید که ضروری نیست و مشکلاتی را



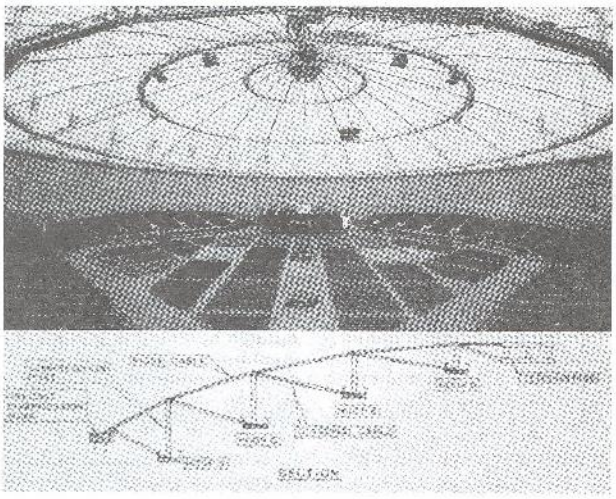

تصویر ۱۲- گنبد تنسگریتی اثر گایگر.
ماخذ: (Robin, 1996)

فراهم می سازد. در حالت مثلث بندی نیروها در تعدادی کابل متمرکز می گردند، در حالی که بدون آن، به کمک پوسته بارها در سطح وسیعی گسترش می یابند. سقف پارچه ای پس از آنکه تمامی اجزا در محلشان قرار گرفتند، به سازه سوار گردید.

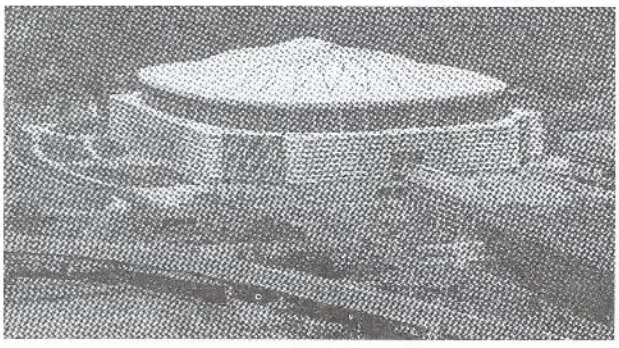
گنبد SunCoast (تصویر ۱۳) که اکنون Thunder Dome نامیده می‌شود در فلوریدا توسط گایگر طراحی و در ۱۹۸۹ تکمیل گردید. شکل آن با کارکرد اولیه اش که یک استادیوم بیس بال است سازگار می باشد. این گنبد ۶۹۰ فوت قطر دارد و بصورت چهار حلقه با زاویه ۶درجه اجرا شده است. در بالای هر میله تعدادی کابل جدا می شوند و تبدیل به کابل های قطری می گردند و حلقه داخلی بعدی را نگه می‌دارند. ویژگی این سیستم این است که هر حلقه، از حلقه فشاری مرکزی و کابل های مرزی بصورت غیرمستقیم آویزان شده است، ضمن اینکه حلقه ها به سمت مرکز گنبد سبک تر می شوند.

در گنبد جورجیا[۱۶] در آتلانتا (تصویر۱۴)، Mathhys Levy و همکارانش در شرکت Weidlinger به ساختار مثلث بندی فولر بازگشتند. با قطر ۷۸۴ فوت، این گنبد طولانی ترین دهانه برای سازه‌های تنسگریتی است که تاکنون ساخته شده است. در این طرح کابل های مرزی بصورت مستقیم از حلقه فشاری پیرامونی به سمت مرکز سازه حرکت نمی کنند، بلکه ساختاری لوزوی را ایجاد می کنند. طراحی مثلث بندی آن به این صورت است که از بالای هر کدام از میله ها دو کابل برای نگهداری حلقه داخلی بعدی پایین می آید و تشکیل یک مثلث کششی را می دهند. از هر گره ۶ کابل خارج می‌گردد. گره ها حجیم هستند و در حدود دو تن وزن دارند، از این جهت اقتصادی ترین راه برای ایجاد آنها استفاده از دو صفحه جوش خورده می باشد.

عملکرد این ساختمان، زمین بازی فوتبال است. بنابراین پلان کشیده برای کاربری آن مناسب می باشد. پلان بیضوی یا تخم مرغی



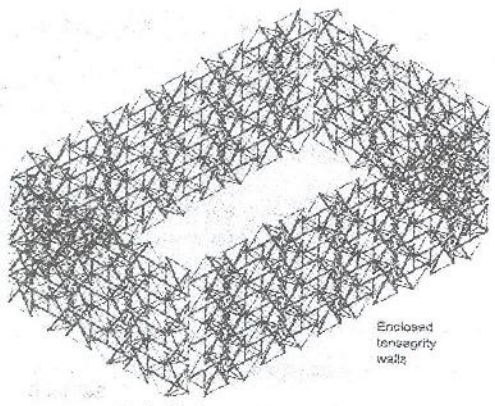
تصویر ۱۳ - گنبد SunCoast.
ماخذ: (http://www.columbia.edu/cu/gsappl/ BT/DOMES/TIMELN/suncoast/sun-06.jpg)



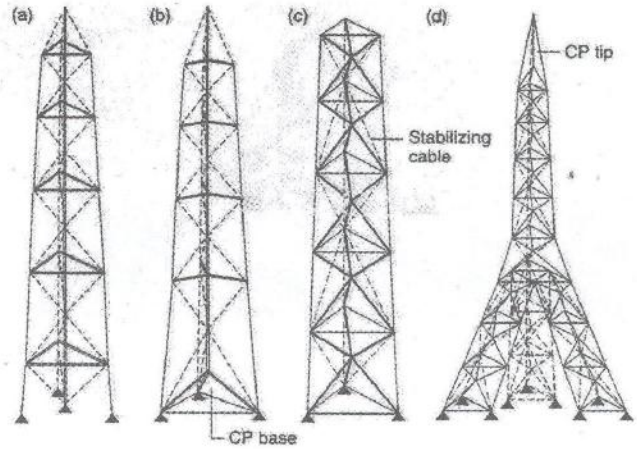
تصویر ۱۴- گنبد جورجیا.
ماخذ: (http://glassssteelandstone.com/Images/ US/GA/ATL/GeorgiaDome-001.jpg)

آن از دو دایره ای که توسط مقطع پروانه‌ای شکل بهم اتصال یافته اند، تشکیل شده است. آویزان ساختن حلقه اول در زیر حلقه فشاری مزاحم دید تماشاچیان در ردیف های بالا بود، از طرف دیگر اگر به اندازه کمی حلقه بالا برده می‌شد، کشش در کابل ها نیز بالا می رفت. محاسبات نشان داد که زاویه ۴۵ درجه، بهینه می باشد، اما حلقه های بعدی می توانند زاویه کمتری داشته باشند چراکه بار کمتری را تحمل می کنند.

در ادامه تکنیک تقریبی برای طراحی گره های تنسگریتی با ساختار قطری، فصل جدیدی را در سازه‌های تنسگریتی آغاز کرد.




تصویر ۱۵- دیوار شیشه ای.
ماخذ: (Bing, 2004)




تصویر ۱۶ - دکل‌های تشکیل یافته از کابل و میله.
ماخذ: (Bing, 2004)

## کاربردهای معمارانه سیستم های تنسگریتی

فرم های سازه ای که در مباحث قبل مورد بررسی قرار گرفتند در عرصه معماری بسیار کاربردی هستند و می توانند بخوبی در یک مسیر سه بعدی برای پاسخگویی به عملکردهای معماری گسترش یابند. به عنوان مثال به کاربرد سازه های تنسگریتی در دیوارهای قائم شیشه ای می توان اشاره داشت (تصویر ۱۵).

علاوه بر فرمهای اولیه تنسگریتی، فرم های معمارانه دیگری ایجاد شده است که در ادامه به آنها اشاره می گردد.

### کاربرد عمومی

**فرم های تنسگریتی خطی، صفحه ای و فضایی:** بلوک های ساختمانی هستند که کارآیی سازه ای دارند.

**فرم های خطی:** دو نمونه از کابل های خطی در اینجا نشان داده شده است. یکی برجی شکل است (تصویر ۱۶) و دیگری به شکل پیاده رو می باشد (تصویر ۱۷).

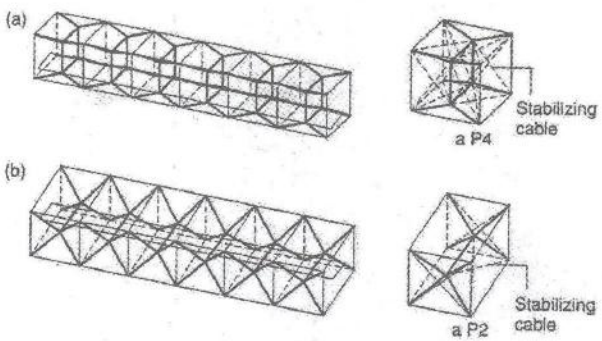
**فرم های مسطح:** در اشکال با میله های پیوسته (تصویر ۱۸)، بازشوها توسط مدول های دایره ای، مدول های ۵ وجهی یا ترکیب مربع و شش رخی احاطه شده اند. تمام این مدول ها نمونه های میله‌های ناپیوسته متناظری دارند که در جای خود کاربرد دارند.

**اشکال فضایی:** اشکال مسطح در یک مسیر سه بعدی گسترش یافته و فرم های فضایی ایجاد می نمایند.

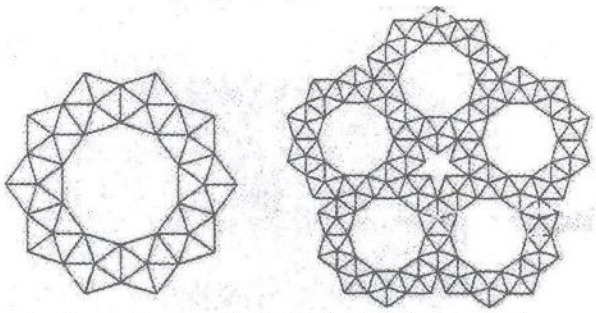
### کاربرد در طراحی سازه‌ای سقف

**سقف غشایی هذلولوی:** در اینجا سقف غشایی به چهار لبه هرم اتصال یافته است. هرم با زاویای چرخشی دیگر نیز در این روش کاربرد دارد (Hanaor,1998,193) (تصویر ۱۹).

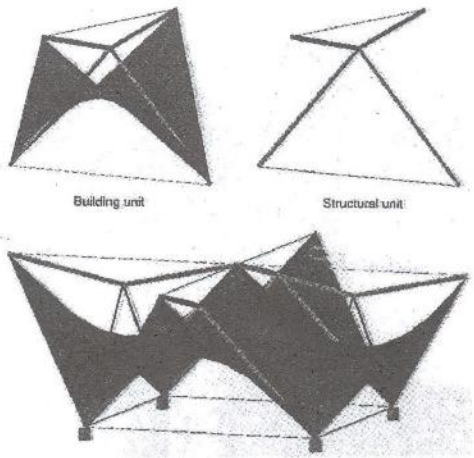
**سقف گلبرگی:** این سقف ممکن است برای معماران جدید نباشد. استفاده از سیستم های کابل- میله شانس بیشتری را برای طراحی این سقف ها ایجاد کرده است. میله های مایل پایین و کابل های قطری می توانند از طریق اتصال به لایه بالا انحناء یابند. غشاهای انعطاف پذیر گلبرگی می توانند برای احاطه حجم بکار روند (تصویر ۲۰).



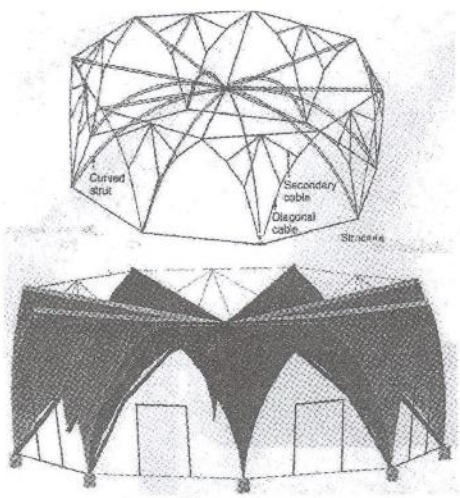

تصویر ۱۷ - راهروهای تشکیل یافته از کابل و میله.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۱۸ - بازشوهای احاطه شده توسط مدول های چندرخی.
ماخذ: (Bing, 2004)




تصویر ۱۹ - سقف غشایی هذلولوی.
ماخذ: (Bing, 2004)




تصویر ۲۰ - سقف گلبرگی.
ماخذ: (Bing, 2004)

**کاربرد ساختارهای تنسگریتی با الحاقات تزیینی**

سازه های تنسگریتی به عنوان اعضا تزیینی می توانند به معماری اضافه گردند. این الحاقات می توانند پانل هایی با اشکال ویژه باشند بدون آنکه بر عملکرد سازه تأثیر داشته باشند.

**پانل های تزیینی اضافه شده به مدول ها:** در این ایده پانل های تزیینی به مدول های کابل و میله جهت زیبایی اتصال یافته اند.

**خانواده مدول های ستاره‌ای شکل:** مدول های کابل و میله می‌توانند در اشکال ستاره ای نظم یابند.

## سازه های بازوبسته شونده[۱۷]

یکی از مهمترین مباحثی که محققین به آن پرداخته اند، قابلیت گسترش در سیستم های تنسگریتی می باشد. در پی تصمیم دولت ایالت متحده آمریکا در سال‌های ۱۹۸۰ برای تاسیس یک پایگاه فضایی، ناسا هزینه تحقیق در خصوص سازه‌های باز و بسته شونده را فراهم کرد. هدف از این تحقیق ساخت سیستم‌های مهندسی باز و بسته شونده‌ای بود که بتواند جهت حمل به فضا در فضاپیما جای گیرد. این سازه‌ها می‌بایست پس از حمل به فضا گسترش یافته و به اصطلاح منبسط شوند. حجم بسته‌بندی کم، سرهم بندی سریع و گسترش و بسته شدن آسان از معیارهای طراحی این سازه‌ها بود (Furuya,1992,12).

در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ نه مرتبه مسابقات تنیس ویمبلدون در شرایط آب و هوای بارانی برگزار گردید. به دلیل نیاز چمن زمین به نور خورشید و لزوم سرباز بودن زمین، یافتن راهی برای سرپوشیده نمودن مرکز زمین در زمان‌های مقتضی ضرورت یافت. برای غلبه بر چنین مشکلاتی ساخت استادیوم‌ها و استخرها با سقف متحرک رواج یافت.

اجزا سازه های باز و بسته شونده عبارت از عناصر ثابتی بصورت کابل یا میله که طول آنها در فرآیند باز و بسته شوندگی ثابت است، کابل های شل شونده و عناصر باز و بسته شونده می‌باشند (Tibert, 2002, 25).

این سازه ها هنگامیکه به عنوان نگهدارنده مورد استفاده قرار می‌گیرند، حداکثر حجمشان را دارند، در حالیکه هنگام حمل و نقل بصورت کاملا" فشرده قرار گرفته و کمترین حجم را دارند (تصویر ۲۱). انعطاف پذیری سیستم در حالت بازوبسته شدن و پایداری آن در حالت گسترش یافته بسیار حائز اهمیت است.

تصویر ۲۱- سازه باز و بسته شونده.
ماخذ: (Tibert, 2002)

بازو بسته شوندگی می تواند از طریق یک انرژی خارجی از قبیل الکتریسیته، نیروی دستی یا انرژی داخلی ذخیره شده در اجزا اتفاق بیفتد. مهم ترین ویژگی این سازه ها قابلیت استفاده مجددشان می باشد و اینکه می توانند در ابعاد بسیار کوچکی نگهداری شوند و با حداقل نیروی ماشینی یا دستی سریعا" نیز قابل استفاده و باز شدن هستند (Tibert, 2002, 26).

موردی که می بایستی در طراحی این سازه ها مورد توجه قرار گیرد، اتصالات اعضا به یکدیگر می باشد. طراحی اتصالات عملکرد سازهای، زیبایی سازه و .... را تحت تأثیر قرار می دهد. در انتخاب اتصالات مسائلی چون قیمت ساخت و سوار و سرهم کردن اجزا حایز اهمیت است، اجرای آنها می بایستی راحت باشد، سریع اجرا گردند، ساده و سبک باشند و در ضمن می بایستی پاسخگوی نیازها باشند.

یکی از مشکلاتی که در نمونه های اولیه مشهود بود این است که هیچ مکانیسمی جهت جلوگیری از بی نظمی اعضا پیچیده وقتیکه سازه بسته شده و اعضا شل می شوند، وجود نداشت. Liapi برای رفع این مشکل سوار کردن واحدهای تنسگریتی در سایت را پیشنهاد داد.

## روش های گسترش

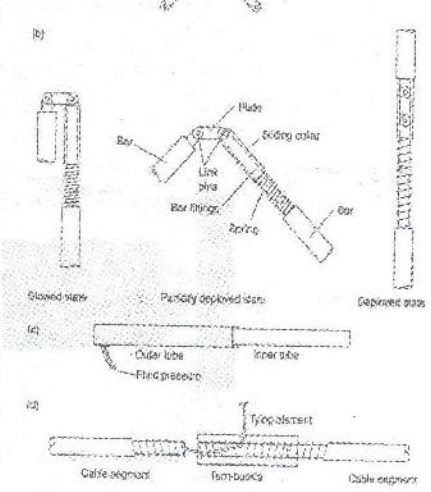
**استفاده از میله های تلسکوپی**[۱۸]: عمل ازدیاد طول در این حالت به کمک فشار صورت می گیرد. در این حالت نیاز به یک منبع انرژی خارجی است (تصویر C -۲۲).

**روش پیچاندن:** در این حالت عمل گسترش فارغ از نیاز به عرضه انرژی می باشد و معمولا" برای تغییر طول های کم مورد استفاده قرار می گیرد. به هر حال می توان جهت ازدیاد طول از طریق اتصال یک لولا (Pin) برای قفل کردن دو قسمت یک میله استفاده کرد قبل از آنکه به کمک پیچ ثابت گردند (تصویر a-۲۲).

**استفاده از میله های Energy- Loaded**: در زمانی که انرژی آزاد می‌گردد میله ها باز می شوند و وقتی که انرژی ذخیره میگردد، حجم بسته می گردد (تصویر b-۲۲) مکانیسم گسترش در این حالت به این ترتیب است که پس از باز شدن اعضا لولایی که دو تا میله را به هم وصل می کنند، قفل می گردند و سپس هر دو به عنوان یک قطعه پیوسته عمل می کنند (Furuya,1992, 37).

**استفاده از کابل های آزاد شونده**[۱۹]: در این حالت کابل ها بصورت منفرد یا جمعی به کمک اتصالات گسترش می‌یابند. بطور مرسوم گسترش کابل ها از طریق یک قرقره اتفاق می افتد.

محققین در پی آنند که این سازه ها را در اثر پیشرفت هایی که در عرصه تکنولوژی رخ می‌دهد، توسعه دهند، بطوریکه قادر باشند بطور اتوماتیک گسترش یافته و تنظیم گردند.




تصویر ۲۲- روش های گسترش.
ماخذ: (Tibert, 2002)

## نتیجه

سازه های تنسگریتی با داشتن قابلیت هایی چون امکان باز و بسته شدن، سبکی، استفاده حداقل از مصالح و زیبایی در معماری و طراحی صنعتی می توانند بکار گرفته شده و کارگشا باشند، خصوصا" خاصیت باز و بسته شوندگی این سازه ها ویژگی درخور توجهی را ایجاد نموده است. سازه های باز و بسته شونده می توانند بطور وسیعی در سقف های موقت، سقف بازارچه ها، سقف انبارهای موقت، استادیوم‌ها، استخرها، پارکینگ ها و گلخانه ها مورد استفاده قرار گیرند، در ارتش در ساخت بیمارستان های موقت و اردوگاه ها کاربرد دارند، با گسترش علم نجوم آنتن های فضایی بازوبسته شونده بکار گرفته می شوند. همچنین در ساخت تجهیزاتی که همراه فضانوردان به فضا ارسال می گردند و در طراحی المان های شهری کاربرد دارد.

با وجود داشتن چنین قابلیت های درخور توجه و با وجود آنکه مفهوم تنسگریتی بیش از ۵۰ سال قدمت دارد و بزرگان معماری و مهندسی آن را از جهات مختلف مورد آزمایش و بررسی قرار داده اند؛ این مفهوم هنوز هم تحت عنوان نوآوری شناخته می شود. دلیل این ادعا تعداد کم کارهای ساخته شده در این سیستم می باشد.

متاسفانه معماران یا با این مفهوم آشنایی ندارند و یا در حد عنوان با آن آشنایی دارند. در مهندسی سازه نیز اگرچه که پژوهش های زیادی در ارتباط با تحلیل این نوع سازه صورت گرفته، اما این پژوهش ها تنها در حد مباحث تئوری باقی مانده و در عمل بکار گرفته نشده اند. همکاری معماران و مهندسین می تواند به تحقق عملی این پژوهش ها منجر گردد.

در این مقاله سعی بر آن بود با توجه به در اختیار نبودن منابع جامع فارسی، آشنایی اولیه با این سیستم، ویژگی ها و کاربرد آن در معماری صورت پذیرد تا این آشنایی رهگشای پژوهش های دیگر و همکاری مهندسین و معماران در جهت استفاده بهینه از قابلیت های آن باشد.

### پی‌نوشت‌ها:

۱ Space Structures.
۲ سازه تنسگریتی در فارسی به سازه کش بستی ترجمه شده است.
۳ Self-Stress.
۴ Kenneth Snelson.
۵ Buckminster Fuller.
۶ Emmerikh.
۷ Tensegrity Simplexes.
۸ Tensegrity Prisms.
۹ Rene Motro.
۱۰ http://www.surrey.ac.uk/eng/research/ems/ssrc/formian.htm.
۱۱ Waclaw Zalewski.
۱۲ Geiger.
۱۳ از این جهت ناخالص نامیده می شوند که در آنها میله ها مستقل نبوده و اتصال دارند.
۱۴ Montpellier.
۱۵ در اینجا مثلث بندی به این معنی است که دو انتهای هر میله با قرار گرفتن در رأس یک مثلث بصورت کامل در جایشان محکم شده اند.
۱۶ Georgia Dome.
۱۷ Deployable Structure.
۱۸ Telescopic Strut.
۱۹ Releasing Cable.

### فهرست منابع:

Binbing, W.(2004) , *Free Standing Tension Structures*, Spon Press, London.
Brooks, W.(2002), *Kinematic Analysis of Tensegrity Structures*, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
Charalambides, J.(2004), *Computer Method for The Generation of The Geometry of Tensegrity Structures*, PhD Thesis, The University of Texas, Austin.
Domer, B. and Smith, I.(2002), An active structure that learns, *Journal of Computing and Civil Engineering*, Pittsburgh.
Furuya, H.(1992), Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Applications, *Journal of Space Structures*, vol.7, no 2, 143-151.
Hernandez Juan, S. - Mirats Tur, J.M. (2008), *Tensegrity Frameworks: Static Analysis Review*, Mechanism and Machine Theory, Barcelona, Spain.
Marshall, M.(2003), *Analysis of Tensegrity-Based Parallel Platform Devices*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
McGinley, P.(2002), *Design of Large Space Structures Derived From Line Geometry Principles*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
Nooshin, H., Disney, P., (1991), Elements of Formian. *Computers and Structures*, vol.41, no. 6, 1183-1215.
Paul, C., Lipson, H., Cuevas, F.(2005), Evolutionary Form Finding of Tensegrity Structures, Mechanical and Aerospace Engineering Cornell University, New York.
Robin, T.(1996), *Engineering A New Architecture*, Quebecor-Eusey Press, Massachussets.
Tibert, G.(2002), *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
Tran, T. M.(2002), *Reverse Displacement Analysis for Tensegrity Structures*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
Sultan, C.- Skelton, R. (2004), A Force and Torque Tensegrity Sensor, *Sensors and Actuators*, Vol.112, no. 2-3, 220–231.