



space structure

Roholah pasban – Architecture- roholahpasban@yahoo.com

Abstract:

Space structure are structure that have three dimension as their behaviors couldn't to precast. To this definition many of frames such as some archs and brick cupolas are member of this bundle, but in here our scope are the special three dimension that usually have straight part whit rigid junctions or hinges. These constructions in ideal situation should build by same parts or right- angle triangle. Finally a regular several part structure will be shape. These process will be repeat to concoct a strength net-structure solidity of spacious make a special feature to portage big intensive and non concurrent forces. Additionally spacious are suitable for coliseums, showrooms, hangars, industrial factories, mosques and generally in structures that have limitation in centric base and display features of architecturing arts and constructions trait.

Nowadays spacious growth in architectures and engineers mind. This is'nt completely for sheen and suction rather many causes such as good behavior against earthquect by reducing mass of structures, good supple to design, possibility of conveyance, strength to dynamic forces, transmission of installations and etc. in this direct after quantification of spacious, proceed to detail of implementation of these structures and creation solidarity between construction and architecturing and finally ceration of architecture space by submitting case studys.

Key words: space structure, three dimension behavior, rigid junctions, hinges



سازه فضاکار

مقدمه

سازه های فضاکار به سازه هایی گفته می شود که اصولا رفتار سه بعدی داشته، به گونه ای که نتوان رفتار کلی آنها را با استفاده از یک یا چند مجموعه مستقل دو بعدی تقریب زد. با این تعریف طیف وسیعی از سازه ها از جمله برخی از قوس ها و گنبد های آجری نیز جزو سازه های فضاکار محسوب می شوند، اما در اینجا منظور سازه های سه بعدی خاصی هستند که معمولا دارای اعضای مستقیم با اتصالات صلب یا مفصلی می باشند. این سازه ها به طور ایده ال باید از شکل های با وجوه مساوی و یا مثلث هایی با زاویه قائمه ساخته شوند که در نتیجه، یک چندوجهی منتظم تشکیل می دهند که در کنار یکدیگر تکرار شده و با اتصال مکرر این اجزا شبکه ای مستحکم و یکپارچه با ساختاری سه بعدی ایجاد می شود. سختی و صلب بودن زیاد سازه های فضاکار قابلیت استثنایی برای حمل بارهای بزرگ متمرکز و غیر متقارن را بوجود می آورد. سازه های فضاکار برای پوشش سالن های بزرگ اجتماعات، ورزشگاه ها، سالن های نمایشگاه، آشیانه هواپیما، کارخانه های صنعتی، مساجد و تمام سازه هایی که به نحوی محدودیت تکیه گاه های میانی دارند، ایده ال بوده و از نظر جلوه های معماری و خصوصیات سازه ای حالت منحصر بفردی را نسبت به سایر سیستم های جایگزین ایجاد می کند. این سازه ها امروزه در سراسر دنیا به سرعت در حال پذیرش و مقبولیت در بین طراحان و مهندسين سازه می باشند. این امر را نمی توان فقط مرهون جذابیت و زیبایی بیشتر این سازه ها دانست، بلکه شامل دلایل متعددی می باشد. از جمله مهمترین مزایای سازه های فضاکار، رفتار مناسب لرزه ای به جهت سبکی وزن، انعطاف پذیری در طراحی، داشتن وزن کم و قابلیت جابجایی مقاومت در برابر نیروهای دینامیکی، عبور تاسیسات و نیز جنبه زیبایی شناسی معماری را می توان نام برد. این مقاله به توضیح انواع سازه های فضاکار، جزئیات اجرایی و اتصالات، روش تولید و همچنین توانایی این سازه ها در ایجاد تعامل میان سازه و معماری و خلق فضاهای معمارانه با ذکر نمونه های موردی می پردازد.

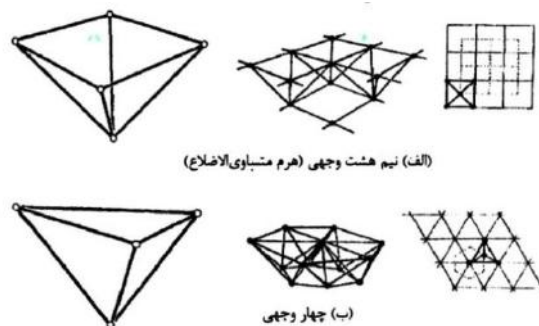
کلمات کلیدی: سازه های فضاکار، رفتار سه بعدی، اتصالات مفصلی، گنبدهای ژئودزیک

آشنایی با انواع سازه های فضاکار

سازه فضا کار سیستم سه بعدی است که دهانه های آن در دو جهت گسترش یافته اند و اعضای آن فقط در کشش و یا فشار می باشند. در حالی که اصطلاح قاب بدرستی به سازه هایی با اتصالات صلب اشاره می کند. سازه فضا کار به طور مشترک برای سازه هایی با اتصالات مفصلی و صلب به کار می رود. بیشتر سازه فضا کار از مدول های یکسان و تکرار شونده با لایه



های موازی در بالا و پایین (مشابه عناصر فوقانی و تحتانی خرپا) تشکیل می گردد. تا زمانی که هندسه سازه فضاکار امکان استفاده از اشکال مختلف را داشته باشد از نیمه هشت ضلعی (هرم چهار وجهی)، چهار ضلعی (هرم سه وجهی) و کلیه چند ضلعی ها به طور گسترده ای در ساختمان ها استفاده می شود (تصویر ۱). علاوه بر آنکه با استفاده از سازه های فضا کار، فضاهای وسیع با سقف های افقی پوشانده می شود. از این سیستم می توان برای سایر قسمت ها مانند دیوار ها و نیز سقف های شیب دار و یا دارای انحنا استفاده کرد. ارتفاع (ضخامت سقف) سازه فضاکار می تواند تا ۳ درصد طول دهانه می باشد، اگرچه اقتصادی ترین ارتفاع در حدود ۵ درصد طول دهانه آزاد و برای طره ها ۱۱ درصد طول طره است. بهترین اندازه برای مدول ها از نظر اقتصادی بین ۷ تا ۱۴ درصد طول دهانه می باشد، باید توجه داشت که تعداد اعضا (و هزینه دستمزد نیروی انسانی) با کاهش اندازه مدول به شدت افزایش می یابد. (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)

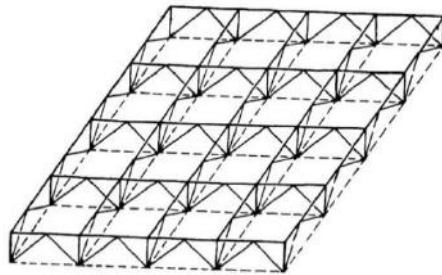


تصویر ۱

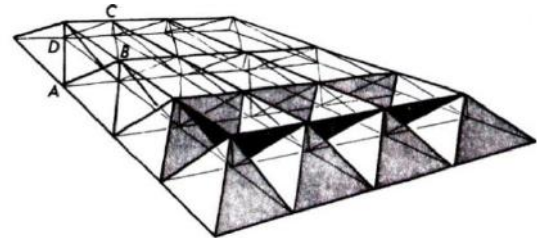
از مهمترین مزیت های سازه فضاکار رفتار لرزه ای خوب به جهت سبک وزنی آنها میباشد و درجه نامعینی زیادی نیز دارند. درجه نامعین این نوع سازه بالا بوده و معمولا خرابی موضعی باعث خرابی کل سازه نمی گردد و نیز مزیت هایی برای پوشش دهانه های زیاد بدون نیاز به ستون و نیز جنبه معماری از دیگر مزیت های اینگونه سازه ها میباشد که باعث میشود از اینگونه سقف ها برای مکان هایی همچون سالن های صنعتی، آشیانه هواپیما، نمایشگاه ها و ... استفاده گردد (گلابچی، د، ۱۳۸۵)

تحلیل سازه فضاکار

می توان با جایگزین کردن خرپاها بجای تیرها، عمل دو طرفه سیستم شبکه مستطیلی با مورب را برای پوشش سطوح بزرگ بکار برد. سسقفهای مستطیلی یا موربی که بدین ترتیب بدست می آیند به علت مقاومت پیچشی کم خرپا ها، تنها مقدار کمی از بار را با عمل پیچش تحمل می کنند. (شکل ۲)

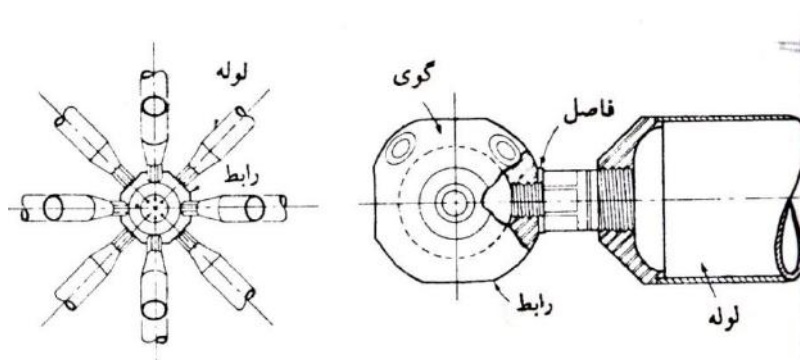


(شکل ۳) قاب خرپای فضایی



(شکل ۲) خرپای فضایی مستطیل شکل

در صورتی که نقاط اتصال هرچاهای موازی عمودی بوسیله میله های مورب به هم متصل و شند ، افزایش قابل توجهی در مقاومت پیچشی این سقفها حاصل می شود ، (این روش اولین بار توسط الکساندر گراهام بل پیشنهاد شد) ، شکل (۳) ، بدین ترتیب سیستم های خرپا بصورت فضایی مثلث بندی شده و رفتار آنها بجای آنکه شبیه شبکه ها باشند مشابه صفحات ضخیمی از جنس مصالح متخلخل می گردد. چنسن خرپاهایی فضایی مثلثی ، قابهای (خرپاهای) فضایی نامیده می شوند و معمولا به عنوان سازه های مسطح بامها برای پوشش سطوح بزرگ بکار می روند . این سازه ها شامل تعداد زیادی میله های مشابه (با اندک اختلافی در طول) هستند که می توانند به اشکال مختلف و زیبایی ساخته شوند. هر چند می توان کل اعضا قاب فضایی را بر روی زمین به یکدیگر متصل و آماده نصب نمود (با جوش دادن ، پیچ کردن و یا پیچ کردن انتهای لوله های فولادی به مفاصل رابط ها) و سپس با جک به ارتفاع اصلی انتقال داد ، با این حال بیشتر قابهای فضایی از مقاطع پیش ساخته ای تشکیل شده اند که قابل اجرا با استفاده از رابطهای استاندارد بوده ، (شکل ۴) و در محل بدون نیاز به قالبهای پر هزینه اجرا شده اند. (گلابچی ، الف، ۱۳۸۱)

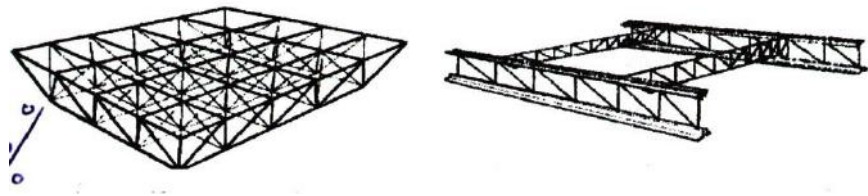


(شکل ۴)

سازه های فضاکار ، سیستم هایی با بازدهی سازه ای بابل و ایمن می باشند. زیرا هر یک از اعضای آن متناسب با مقاومت خود ، بار وارده را تحمل می نمایند . بارهای وارده از طریق کوتاهترین مسیر به تکیه گاه های مختلف و متعدد منتقل می شوند.



بیشترین بارها از طریق مقاوم ترین اعضا به تکیه گاه ها منتقل می شوند ، با حذف تعدادی از اعضا ایستایی و پایداری سازه فضاکار از بین نمی رود زیرا این امر باعث تعیین دوباره جریان نیروها می شود و اعضا ، متناسب با مقاوت یا سختی شان نیروهای اضافی را به طور مشترک تحمل می نمایند . این افزایش مقاومت ذاتی دلیل تعادل پایدار سازه فضاکار است ، حتی هنگامی که بار اضافی بر آنها وارد شود. (شکل 5)



(شکل 5) باربری سازه فضاکار در چند جهت و خرابا در یک جهت

با وجود چنین قابلیت هایی تعدادی از سازه های فضاکار بزرگ و مهم دچار خرابی و فرو ریختن گردیده اند . سقف سازه فضا کار مرکز شهری هارتفورد (Hartford) به ابعاد (۹۰*۱۱۰ متر) در زیر بار برف به یکباره فرو ریخت . تحلیل های بعدی طراحان را به این نتیجه رساندند که فرو ریختن این سازه فضاکار با ارتفاع برابر (۶/۴ متر) از کمانش اعضای پیرامونی که به خوبی مهاربندی نشده بود . شروع گردیده و بتدریج گسترش یافته تا منجر به فرو ریختن سقف گردیده است . (گلابچی ، ج، ۱۳۸۰)

انواع سازه فضاکار تقسیم بندی شکلی:

- 1- شبکه های تخت یک لایه ای Flat single layer grids
- 2- شبکه تخت دو لایه و چند لایه Double-layer grids
- 3- شبکه قوسی Barrel vaults
- 4- گنبد ها Domes

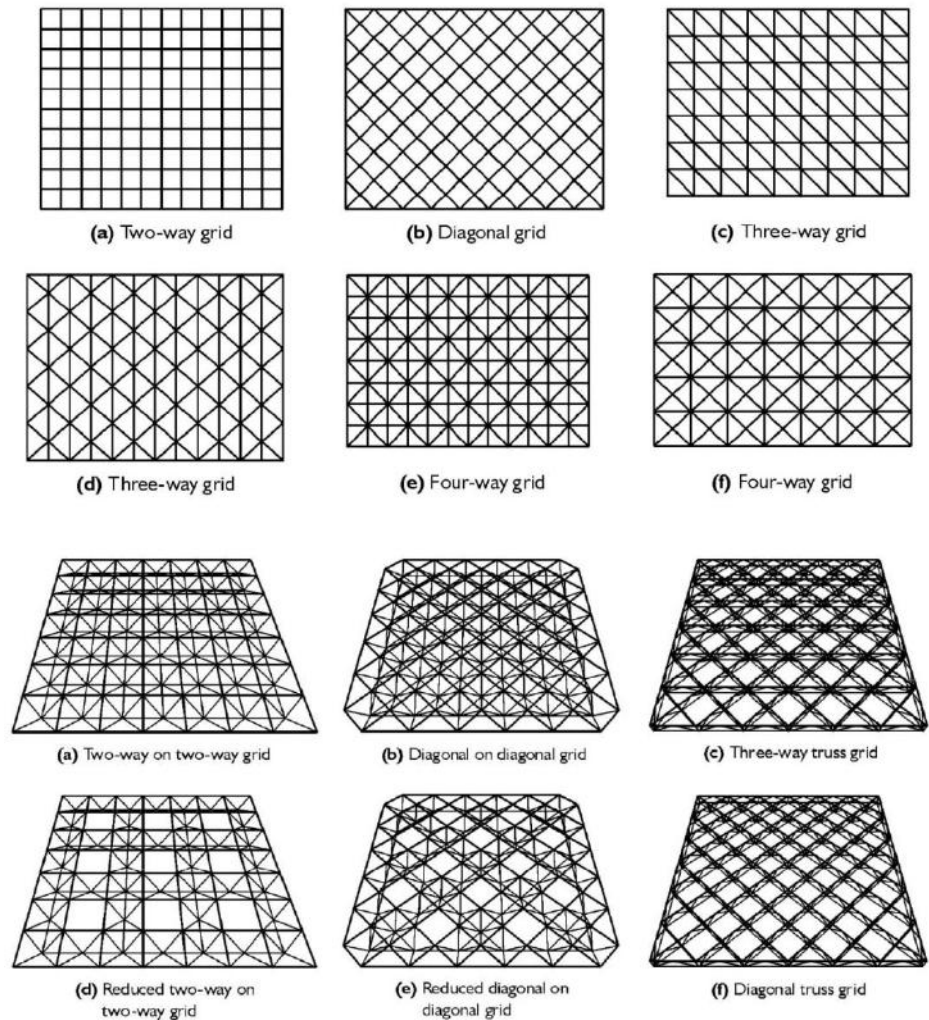
۱- شبکه های تخت یک لایه ای: Flat single layer grids

این نوع شبکه ها در واقع نوعی قاب مسطح هستند که امتداد بارهای وارده و خود شبکه در یک صفحه واقع نیستند. در شبکه و قاب مسطح در امتداد اثر بارهای موثر بر سازه می باشد. سازه ای که در آن بار وارده عمود بر واقع فرق بین یک صفحه سازه اثر می کند به شبکه موسوم است. سازه هایی نظیر سایه بان ها، عرشه ی پل ها و ... از این نوع می باشند. شبکه تک لایه نیز شبکه ای متشکل از یک سری المان و گره است که به دو صورت مورب و موازی تولید می شوند.



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸-شهریور ۱۳۹۲

(تصویر ۵) شبکه های تک لایه جهت دهانه های نسبتا کم بار به کار می روند و به اشکال تخت، نیم استوانه ای، گنبدی و زین اسبی ساخته می شوند. (نوشین، ۱۳۸۰)



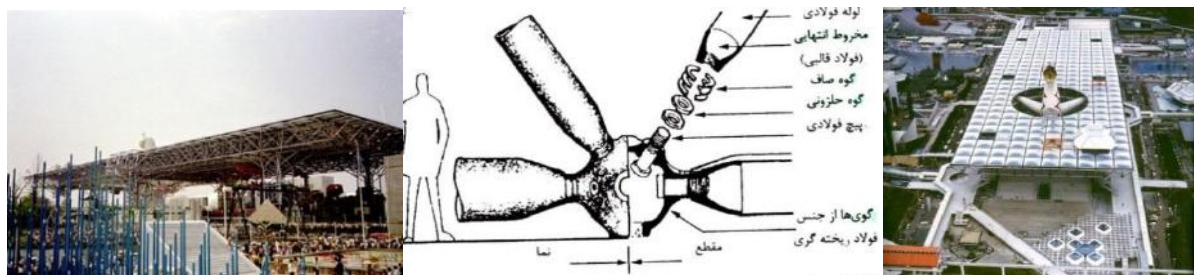
(تصویر ۵)

فضای مرکزی نمایشگاه اکسپو ۷۰ Expo Festival Plaza

در مرکز نمایشگاهی اکسپو ۷۰ در اوزاکای ژاپن، بزرگترین سازه فضاکار با اجرای سقفی بر روی فضای مرکزی نمایشگاه بر پا شده است. طراحی، برای ایجاد هماهنگی در ساختار کل مجموعه نمایشگاه و برای فراهم کردن فشایی جهت توسعه و تحقیق زمینه اصلی نمایشگاه یعنی پشرفت و هماهنگی می باشد. این فشایی مرکزی (پلازا) به فضای اصلی نمایش متصل شده است و برای جای دادن و نشستن طیف های مختلف افراد از ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰۰ نفر بر اساس نوع عملکرد طراحی شده است. میدان

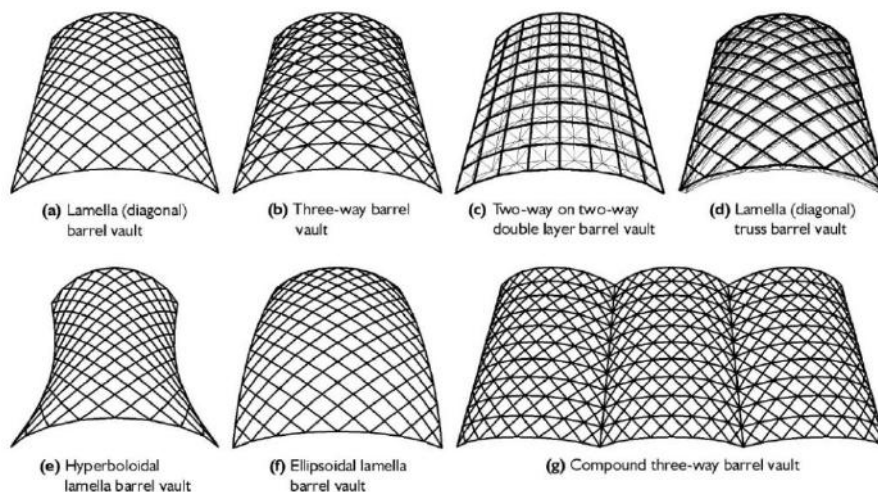


اصلی نمایشگاه از طریق پوشش سازه فضا کار بام، یکپارچه می باشد (تانگه Tange، ۱۹۶۹) (تصاویر ۶-۷-۸). به منظور رسیدن به این مقیاس بی نظیر، مهندسان به مشکلاتی از قبیل اندازه های سازه و دقت در ابعاد، زوایا و نیز محدودیت های ناشی از اجرای ساختمان در محل غلبه کردند. از آنجایی که رسیدن به دقت لازم در مراحل اولیه مشکل بوده، کل خطاهای حاصل با تنظیمات دوباره و استفاده از مدول های اضافی جبران می گردد. مشکل نصب قطعات با ایجاد یک سوراخ اضافی در گره کروی که اجازه می داد پیچ و مهره ها از طریق آن در جای خود قرار گیرند، حل گردید. این جزئیات اجازه انجام تنظیمات زاویه ای کوچک ما بین اتصالات اعضا را فراهم می ساخت. به علاوه واشر های گوه ای شکل مخصوص بین گره های کروی و اعضا امکان حداقل تغییر طول را فراهم می نمود. چنین ترکیبی میزان خطا در مجموعه را در شرایطی که سازه فضا کاری به این بزرگی برای اولین بار به طور عملی و اقتصادی اجرا می شد. (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)



(تصاویر ۶-۷-۸)

2- شبکه تخت دو لایه و چند لایه Double-layer grids

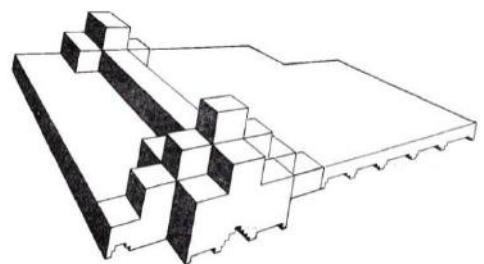
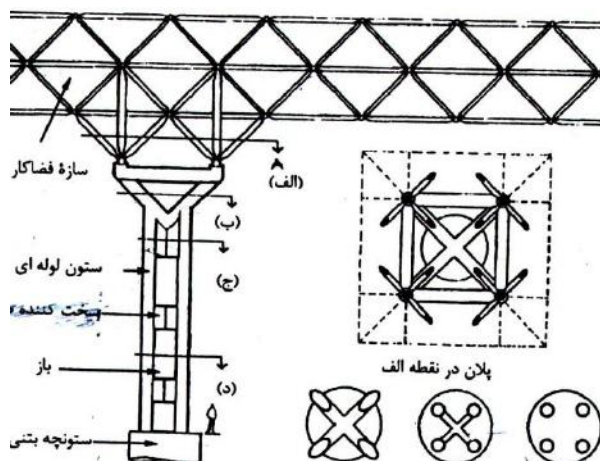


(تصویر ۹)



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸- شهریور ۱۳۹۲

این ساختمان با طول برابر ۵ بلوک حتی بزرگتر از فضای مرکزی نمایشگاه تانگه (Tange's Festival) نیز بزرگتر می باشد. مرکز جاویتس با طول (۳۱۵ متر) در طول خیابان های یازدهم و دوازدهم مانهاتان و با عرض (۱۵۷ متر) در کنار خیابان های سی و چهارم و سی و نهم قرار گرفته است. در مجموع، مساحت همکف آن (۱۴۸ هزار متر مربع) است. طراحان و کارفرما به طور جدی احساس می کردند که عامه مردم (مسانی که هزینه ساخت بنا را پرداخته بودند) باید به ساختمان دسترسی ساده و مستقیم داشته باشند. فضایی که به بخش عمومی با سالن بزرگ مربع شکلی به ضلع (۸۲ متر) اختصاص یافته بود، یا ورودی و جذاب و بدیع در خیابان یازدهم مشخص می گردید. ساختمان به وسیله پلی به طول (۱۱۰ متر) که مشرف به سالن اصلی نمایشگاه بود تا خیابان دوازدهم ادامه می یافت و به یک رستوران که چشم اندازی از رودخانه هودسون (Hudson River) داشت (تصویر ۹)، منتهی می گردید و به حداکثر ارتفاع خود می رسید. پوشش شیشه ای نیمه منعکس کننده ساختمان در طول روز، در اثر انعکاس نور آسمان مات به نظر می رسد. هنگام شب، در اثر نورپردازی داخلی، شیشه ها شفاف شده و دیوارها و سقف خرپای فضای نمایان می گردند. ورودی های شیشه های شفاف داشته و برای نورگیری از سقف (به وسیله سقفی) به کار رفته، برای دیوارها و فضاهای نمایشگاه از شیشه های مات استفاده شده است. اندازه دهانه (۲۸ متر) سازه از ابعاد نمایشگاه های تجاری متعدد با مدول استاندارد (۹ متر) الهام گرفته شده است. دو ردیف عرقه به عرض (۳ متر) که به وسیله یک راهروی ارتباطی به عرض ۱۰ فوت از یکدیگر جدا می شدند در آن طراحی شده است. ستون های چهار گوش که سازه فضا کار سالن و فضای اصلی نمایشگاه را نگاه می دارند سبک و شفاف هستند. به نظر می رسد که سازه فضا کار از درون این ستون های به شکل درخت، به طور طبیعی رشد کرده است. ستون های اصلی، مرکب از ۴ ستون فولادی لوله ای به قطر (۵۵ سانتیمتر) می باشند که در رئوس یک مربع (۱/۵ متر) قرار گرفته و با شبکه های فلزی به هم متصل شده اند. سر ستون های اصلی به شکل مربع و به ضلع (۳ متر) عناصر قطری را نگاه می دارد و هنگامی که با سازه فضا کار بالایی یکی می شوند، اندازه شان کاهش می باشد (تصویر ۱۰). مدول استاندارد این سازه فضا کار مربعی به ضلع ۱۰ فوت (۳ متر) است. سازه فضا کار به وسیله ی شرکت سازه های پی جی (PG Structures Inc) ساخته شده است. (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)



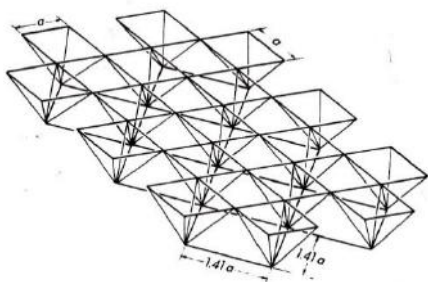


اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸-شهریور ۱۳۹۲

(تصویر ۹) تصویر ایزومتریک احجام

(تصویر ۱۰) جزئیات اجرایی سازه

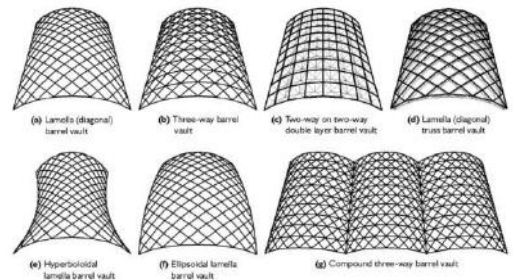
در سیستم PG که ساخته گویونا است، میله ها خرپا لوله های فولادی می باشند که توسط میلگردهای فولادی، که در داخل لوله ها قرار دارند، به زابطهای کره ای تو خالی متصل می شوند. به این ترتیب واحد های پیش فشرده یک قاب PG می توانند روی زمین به یکدیگر متصل شده و سپس به ارتفاع اصلی بالا برده شوند. از سیستم PG برای ساختن سقف ۵۳۰۰۰ متر مربعی مرکز انجمن جاکوب - جاویتس در نیویورک استفاده شده است که بزرگترین نمونه از نوع خود در جهان می باشد و مهندسی آن بر عهده کنسرسیوم ویدلینگر بوده است. (تصاویر ۱۱-۱۲) این قاب فضایی شامل واحد های مربع شکلی است که بر پایه های بتنی به فواصل ۲۷ متر قرار گرفته اند. می توان نشان داد که خرپای تاناکا تحت اثر بار گسترده یکنواخت از نظر استاتیکی سازه معینی است (تصویر ۱۳)، و در نتیجه دارای اعضا اضافی نیست در حالی که سایر انواع خرپاهای فضایی از نظر استاتیکی سازه های نامعینی هستند و می توان آنها را با درجات مختلف نامعینی طراحی کرد، تحقیق ماکوفسکی نشان می دهد که خرپاهای فضایی به علت ظرفیت پیچشی شان، می توان با نسبت دهانه به ضخامت به بزرگی ۶۰ نیز ساخته شوند. (گلابچی، الف، ۱۳۸۱)



(تصویر ۱۱) پرسپکتیو دید ناظر مرکز جاکوب جاویتس (تصویر ۱۲) تصویر فضای داخلی مرکز جاکوب جاویتس (تصویر ۱۳) خرپای تاناکا

۳- شبکه قوسی (Barrel vaults)

شبکه های چلیک: به شبکه ای که در یک جهت دارای انحنا باشد، چلیک می گویند. این سازه بیشتر برای پوشش سطوح مستطیلی دالان مانند استفاده شده و بعضاً فاقد ستون می باشند و روی لبه های چلیک که به تکیه گاه متصل است، قرار می گیرند. چلیک ها دارای محور می باشند. اگر چلیک یک لایه باشد اتصالات به شکل صلب است. چلیک ها اغلب به شکل ترکیبی استفاده می شوند و تیرکمری نقش ترکیب کردن چلیک ها به یکدیگر را بازی می کنند. نکته ای که در طراحی این نوع سازه ها باید در نظر گرفت این است که انتهای چلیک باید قوی باشد و این تقویت را می شود بوسیله تیر، و تیروستون و شکل خورشیدمانند انجام داد. انواع چلیک ها عبارتند از: چلیک اریبی، چلیک لملا با مقاطع بیضی گون، سهمی گون، هذلولی گون و... تصویر (۱۴)



تصویر (۱۴)

4- گنبدها (Domes)

اگر شبکه ای در دو جهت دارای انحنا باشد، گنبد نامیده می شود. شاید رویه یک گنبد بخشی از یک کره یا یک مخروط با اتصال چندین رویه باشد. گنبدها سازه هایی با صلبیت بالا می باشند و برای دهانه های بسیار بزرگ تا حدود ۲۵۰ متر مورد استفاده قرار می گیرند. ارتفاع گنبد باید بزرگتر از ۱۵٪ قطر پایه گنبد باشد. گنبدها دارای مرکز هستند. اتصالات در گنبدهای دنده ای و اشغلدلر حتماً صلب هستند. از لحاظ پخش منظم نیرو، گنبدهای ژئودزیک، دیامتیک و حبابی بسیار مناسب هستند از انواع گنبدها می توان به موارد زیر اشاره کرد. (سعیدی، ۱۳۸۵)

الف- گنبد های دنده ای (شیاری) Ribbed Dome

برای جلوگیری از ازدحام دنده ها در محل تاج میتوان هم وند هایی در بالای گنبد را به صورت منظم حذف یا به اصطلاح حرص نمود (تصویر ۱۶).

ب- گنبد شودلر Schwedler Dome

(اقتباس از نام مهندس آلمانی، که این گنبد توسط وی در اواخر قرن نوزدهم اختراع شد) Schwedler گنبد شودلر متشکل از حلقه ها و اعضای نصف النهاری می باشد که با رابط های قطری برای پایداری بیشتر تقویت گردیده است در این نوع گنبد ها هم وند های مورب به دو صورت میتواند به هم وند های قائم اتصال یابد یا به صورت صلب به آن متصل گردد یا آنکه از روی آنها بگذرد که در این صورت اقتصادی تر خواهد بود علت استفاده تسمه به صورت ضربدری غیر متصل به هم اینست که چون یکی از اعضا در کشش می افتد و دیگری در فشار، بنابراین نیازی به عضو فشاری نیست و دو عضو یکی در میان به کشش در خواهند آمد (گلابچی، ج، ۱۳۸۰) (تصویر ۱۶)

ج- گنبد های لاملا Lamella Dome

ح- گنبد دیامتیک (زایس) Diamatic Dome

اولین بار در سال ۱۹۹۲ به طور آزمایشی در افلاک نمای شرکت زایس به Dywidag - Zeiss گنبد زایس، دایویداگ کار برده شد. این سیستم متشکل از ترکیبات مثلثی شکل، ساخته شده از اعضای بتن مسلح می باشد که با استفاده از بتن تکمیل کننده سیستم یک پوسته نازک بتنی بوجود می آید. از تعدادی قاچ تشکیل شده که هرکدام از آنها در سه جهت شبکه بندی می شوند (تصویر ۱۶). گنبد های دیامتیک نیاز به اصلاح ندارند. اما مهمترین عیب این نوع گنبد ها این است که به جهت



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸-شهریور ۱۳۹۲

نوع بخصوصش تعداد تیپ بندی ها به میزان قابل توجهی نسبت به سایر انواع گنبد ها افزایش خواهد یافت (گلابچی، ج، ۱۳۸۰).

خ- گنبد برایی: Leric Dome

در این نوع گنبد ها هم اگر تک لایه باشند باید اتصالات از نوع صلب باشد (تصویر ۱۶)

ر- گنبد ژئودزیک (افلاطونی)

گنبد ژئودزیک، سازه فضا کار کروی است که بارهای وارده را از طریق اعضای خطی که در یک گنبد کروی شکل قرار گرفته اند به تکیه گاه ها منتقل می کند و تمامی اعضا در آن در تنش مستقیم (کشش یا فشار) هستند بنا براین سازه پایدار است. (گلابچی، و، ۱۳۸۳)

معمولاً از پوشش نازک (از جنس پلاستیک یا فلز) برای پوشش گنبد و تبدیل آن به فضای محدود استفاده می شود. گنبد های ژئودزیک بر اساس ۸ حجم اصلی افلاطونی شکل می گیرند: چهار ضلعی، مکعب، هشت ضلعی، دوازده ضلعی و بیشت ضلعی (تصویر ۱۶) در این پنج حجم (و فقط در این پنج حجم) چند ضلعی ها همگی منظم بوده و تمامی اضلاع یکسان هستند و تعداد وجوه با تعداد رئوس برابر است. چنین احجامی به هر شکلی که قرار گیرند، تمام رئوس با محیط کره در تماس می باشند. گنبدهای ژئودزیک از طریق تقسیمات فرعی به صورت یک یا چند حجم افلاطونی شکل می گیرند. هشت ضلعی و بیست ضلعی به دلیل آن که از مثلث هایی تشکیل می گردند، به طور ذاتی پایداری بیشتری دارند و به عنوان عناصر اصلی در اکثر گنبدهای مشبک در ساختمان ها مورد استفاده قرار می گیرند. با تعداد تقسیمات بیشتر گنبدهای نرم تر و انعطاف پذیرتر به دست می آید شناخته شده ترین شکل چنین گنبدهایی، توپ فوتبال است که از تقسیمات سه تایی تکرار شونده از یک حجم بیشت ضلعی به وجود آمده است هندسه گنبدهای ژئودزیک به میزان زیادی شبیه به اسکلت میکروسکوپی مرجان های دریایی می باشد گنبد های ژئودزیک نسبت به گنبد های دیامتیک شباهت زیادی دارد اما تفاوت اصلی آن اینست که بدلیل تشکیل هندسه منظم تر، تعداد تیپ های کمتری از اعضا ایجاد می کند (تصویر ۱۵). (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)

باک مینستر فولر مخترع گنبدهای ژئودزیک معتقد است سازه های ژئودزیک سطح یک کره از شبکه های سه وجهی در هم پیچیده تشکیل شده است. به طوری که در هر بخش از سطح کره تقاطع هایی به شکل مثلث وجود دارد. استخوان بندی گنبد های ژئودزیک از میله های صلب که هریک حامل فشار و کشش هستند، ساخته شده است که فشار فقط به یک نقطه ثابت در اتصالات وارد می شود بنابراین سازه پایدار است. موفقیت آمیزترین طرح وی غرفه آمریکا در نمایشگاه جهانی سال ۱۹۶۷ میلادی در مونترال کانادا بود که دارای ۶۷ متر قطر و به شکل سه چهارم کره از اجزای پنج و شش وجهی متشکل شده بود و پوشش آن از نوع آکرلیک بود. (گلابچی، د، ۱۳۸۵)



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸- شهریور ۱۳۹۲

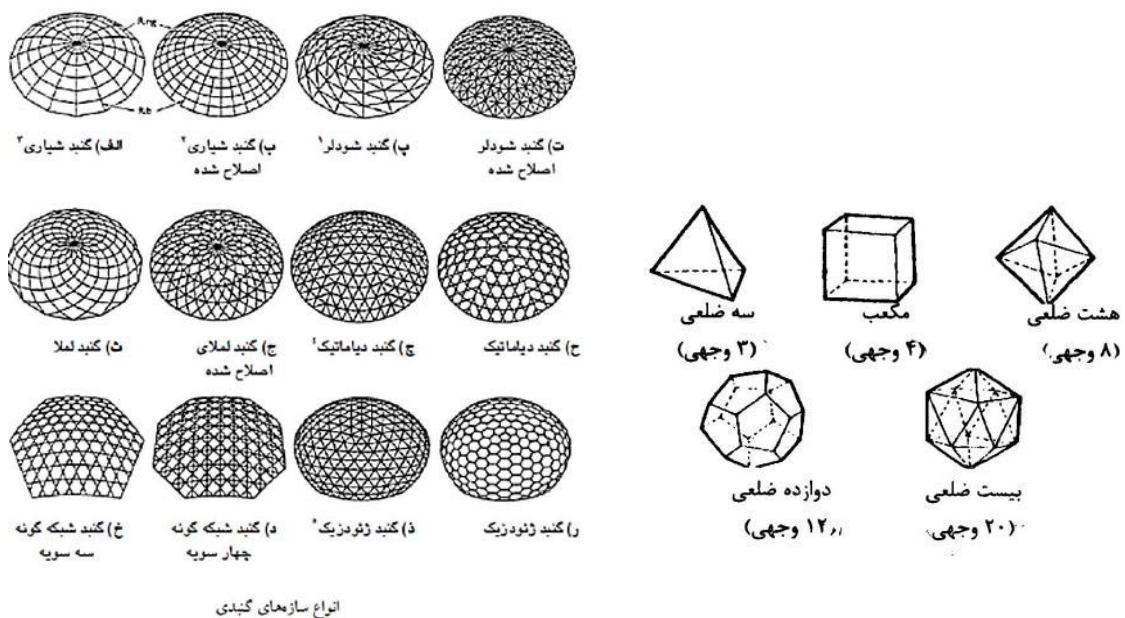


(تصویر ۱۵) فضای داخلی

(تصویر ۱۵) دید ناظر

د- گنبد اسکالوپ (سه سویه) Scallop Dome

گنبد چند قوسی از این نوع گنبد ها اغلب برای دهانه های بالای ۱۰۰ متر استفاده می شود و همانند گنبد های دیامتیک مشکل عمده آنها زیاد شدن تعداد تیپ اعضاء در این نوع گنبد ها می باشد (تصویر ۱۶).



(تصویر ۱۵) احجام افلاطونی مورد استفاده در سازه فضاکار (تصویر ۱۶) انواع سازه های گنبدی

تحلیل سازه گنبد ها:

بارها ، از طریق نیروهای محوری (کشش و فشار) موجود در اعضای قاب به پی ها منتقل می شوند . تمامی اعضایی که در بالای گنبد نیم کروی قرار گرفته اند (انتهایی که بالاتر از زاویه ۴۵ درجه قرار دارند) در زیر بار یکنواخت ، تحت فشار و تمامی اعضای پایینی تحت کشش و اعضای نزدیک به خط عمود نیز تحت فشار قرار خواهد گرفت . شکل گنبد جهت نیروی عکس العمل رانشی (فشاری) را در پی تعیین می کند. گنبدهای نیم کره در تکیه گاه نزدیک به خط عمود هستند ، یک خط پایه



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸-شهریور ۱۳۹۲

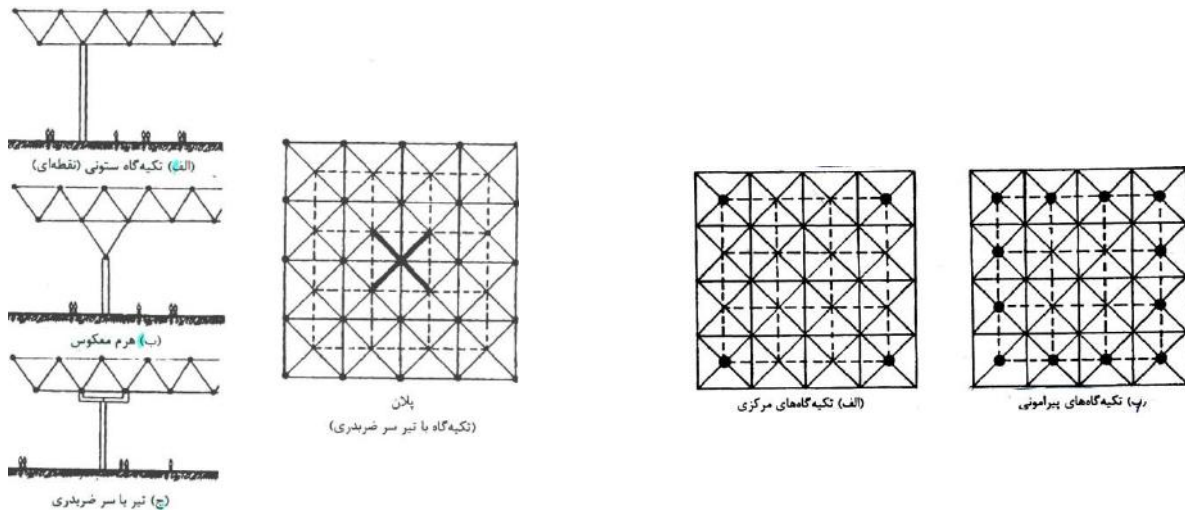
نزدیک به خط افق دارند و مقداری جزئی نیروی رانشی بیرونی ایجاد می نمایند. گنبدهای ربع دایره (تقریباً نصف ارتفاع یک گنبد نیم کره) ۵ نقطه اتکا دارند و نیروی رانشی بیرونی قابل توجهی ایجاد می کنند و باید به وسیله پشت بندها یا حلقه های کششی از برابر این نیرو مقاوم گردد. گنبد های سه - چهارم کره هم دارای پنج نقطه اتکا هستند ولی نیروی رانشی به سمت داخل ایجاد می نمایند. بارهای متمرکز وارد بر گنبد از طریق خرپاهایی که به وسیله دو یال مجاور هم تشکیل می شود، مقاومت می گردد. در جایی که تعداد تقسیمات کم و طول میله های خرپا زیاد است، ارتفاع خرپا (و مقاومت در برابر بارهای متمرکز) افزایش می یابد. اگر تعداد اعضا در گنبد ژئودریک افزایش یابد، ارتفاع مقطع خرپا و مقاومت آن در برابر بارهای متمرکز کاهش می یابد. مساله مقاومت در برابر بارهای متمرکز در گنبد های بزرگ با ایجاد یک لایه مضاعف جهت افزایش ارتفاع مقطع خرپا حل می گردد. این لایه ها به خوبی سازه فضا کار را در بر می گیرند و از تقسیمات هندسی روی گنبد متابعت می نماید گنبد های یک لایه (بدون نیاز به ارتفاع مقطع) برای دهانه های تا ۱۰۰ فوت (۳۰ متر) مناسب است. در دهانه های بزرگتر گنبدها به دو لایه از سازه فضا کار نیاز دارند. (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)

تکیه گاه ها

اگر سازه فضا کار به وسیله ستون ها (طرد شده از سطح زمین برای پایداری جانبی) در تعدادی نقاط مشخص نگاه داشته شود، نیروهای موجود در اعضای که تکیه گاه را احاطه کرده اند به طور ثابلی توجهی بزرگتر از دیگر اعضا می وند. این نیروها را می توان به وسیله افزایش مقطع اعضا در نزدیکی تکیه گاه به طور متناسب طراحی کرد. سازه فضا کار حداقل به سه تکیه گاه برای پایداری نیاز دارد، گرچه بیشتر آنها دارای حداقل چهار تکیه گاه هستند. معمولاً تعداد بیشتر تکی گاه های یک سازه فضا کار تاثیر مقبتی در پوشش سازه های خواهند داشت، به عنوان مثال حداکثر نیروی اعضا در یک سازه فضا کار مربع شکل با تکیه گاه پیوسته فقط ۱۱ درصد نیروی اعضا در یک طرح مشابه با چهار تکیه گاه گوشه ای خواهد بود. به علاوه ف، طیف بیت حداکثر و حداقل نیروها به صورت متناظری کمتر خواهد شد و به دلیل محدود و کوچکتر بین حداکثر و حداقل نیروهای اعضا در مرحله طراحی، اعضا اشکال یکنواخت تر و استانداری به خود می گیرند. بنابراین اتصالات و اندازه اعضا از نظر اضافی در ساخت ستون ها و پی ها تا اندازه ای نقصان یابد (تصویر ۱۷) تکیه گاه های نقطه ای سبب ایجاد نیروهای بزرگ در اعضا نزدیک تکیه گاه می وند. این نیروها ممکن است با توزیع روی سطح بزرگتر یا به وسیله تکیه گاه های شاخه ای کاهش یابد، همچنین می توان با افزایش اندازه نزدیکترین اعضا به تکیه گاه مقاومت لازم را ایجاد نمود. برای سیستم هایی که فقط از اعضای یکسان با تعداد محدودی ستون استفاده می کند، تنش در تکیه گاه ها می تواند از طریق پخش نیروی



عکس العمل تکیه گاه ها بر روی تعداد بیشتری از اعضا کاهش پیدا کند . این امر با استفاده از ستون های چند شاخه در انتها به شکل درخت برای نگاهداری سازه در چند نقطه (و نه یک نقطه) عملی می گردد. (تصویر ۱۸) (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)



(تصویر ۱۸) انواع تکیه گاه سازه فضاکار

(تصویر ۱۷) تاثیر تعداد تکیه گاه در تقسیم نیروها

انواع اتصالات سازه فضاکار

به دلیل ترکیب سه بعدی سیستم در سازه های فضا کار ، گره هایی که اعضا در سه بعد به آنها متصل می شوند به طور ذاتی پیچیده می باشند . برای دهانه های کوچکتر ، گره ممکن است از صفحه فولادی ساخته شود و به انتهای اعضا پیچ شود . این اعضا پوشش دهنده سقف ، نورگیرهای سقفی ، بخش های شفاف و دیگر اجزا کمک می کنند. در دهانه های بزرگتر ، استفاده از سیستم مرو که با اعضای لوله ای شکل به گره های کروی توپر پیچ می شوند . متداول تر می باشد . به گره های کروی توپر و لوله های با قطر و ضخامت مختلف امکان ایجاد مقاومت در برابر نیروهای موجود در هر عضو را می دهد. شرکت های تولیدی دیگر (به طور مثال Unistrut) بر اساس سطح اولیه منگرین گاوس سیستم های مشابهی را تولید می کنند. به علت هندسه پیچیده اتصالات و نیروهای نسبتاً بزرگ موجود در سیستم مرو ، فولاد و آلومینیوم موادی هستند که معمولاً در سازه های فضاکار به کار می روند . گرچه سازه های فضا کاری هم وجود دارند که از چوب ساخته شده اند (به عنوان مثال ، سقف پیاده دانشگاه سیمون فریزیر (Simon Frazier) سازه فضا کار از جنس پلاستیک در کاربردهای داخلی که نیاز به عملکرد سازه ای ندارند استفاده می شوند) (تصویر ۱۹) (گلابچی، ج، ۱۳۸۰)

۱-مرو (mero):

مرو توسط دکتر ماکس منگرین گاوس معرفی شد ، شامل مفصل های اعضا بود، این سیستم هنوز رایج ترین روش در ساخت خرپاهای فضایی است که بصورت گسترده در دسترس مهندسان قرار گرفته است و شامل اعضای لوله ای منفرد و اتصالات از



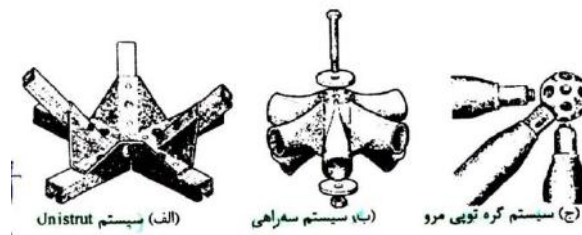
اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸- شهریور ۱۳۹۲

نوع پیوند های کروی (گوی سان) است، عمومیت استفاده از این سیستم تا به امروز ادامه دارد زیرا علاوه بر زیبایی سازه ای می تواند به اشکال گوناگون و با سیستم های متنوع، متشکل از پیوندهای کروی و لوله ها مورد استفاده قرار گیرد. (گلابچی، ه، ۱۳۸۵)

۲- یونی استرات (Unistrut)

۳- سیستم سه راهی

در سازه های فضاکار نزدیک به 50 درصد از کل هزینه ها صرف هزینه اتصالات میگردد در حالیکه در سازه معمولی هزینه اتصالات نزدیک به 20 درصد کل هزینه می باشد. از این رو مهمترین اجزای سازه فضاکار اتصالات آنها می باشد.



(تصویر ۱۹)

مزایای سازه فضاکار:

- ۱- تناسبات ظاهری
 - ۲- پایداری ذاتی (استفاده از اشکال چند وجهی ذاتا پایدار)
 - ۳- سازه های متشکل از عضو گره
 - ۴- تقسیم بار
 - ۵- نصب تاسیسات در فضای بین اعضای سازه ای
 - ۶- استفاده از اجزای مدولار
 - ۷- آزادی در انتخاب محل تکیه گاه
 - ۸- سهولت نصب و سرعت بالا
 - ۹- استفاده مجدد از سازه فضاکار
- (نوشین، ۱۳۸۲)

6- فهرست منابع

- ا. سالوادوری ماریو "سازه در معماری" ترجمه محمود گلابچی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۱۳۸۱
- ب. سعیدی، محمود، "ارزیابی پارامتریک شبکه های دولایه سازه های فضاکار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، خرداد 1378



اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار ۲۸-شهریور ۱۳۹۲

- ج. فولر مور "درک رفتار سازه ها" ترجمه محمود گلابچی ، انتشارات دانشگاه تهران ، چاپ اول ، تابستان ۱۳۸۰
- د. ، جان چیلتون "سازه های مشبک فضایی" ترجمه محمود گلابچی انتشارات دانشگاه تهران ، چاپ سوم ، ۱۳۸۵
- ه. مارگولیوس ایوان "مهندس + معمار = ساختار" ، ترجمه محمود گلابچی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول ، پاییز ۱۳۸۳
- و. نوشین، هشیار؛ **Prof. H.Nooshin,UK,Surrey University** ، سمینار در مورد های سازه فضاکار. ، 1380 و

۱۳۸۲