

بررسی رفتار سازه‌های فضایی به عنوان عناصر مقاوم در مقابل بارهای جانبی

محمدحسین تقی زاده ولدی^۱، علاءالدین بهروش^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، s.taqizadeh@gmail.com

۲- عضو تمام وقت هیات علمی دانشگاه تبریز، behravesht@tabrizu.ac.ir

چکیده

در مهندسی سازه، دیوار برشی نوعی سیستم سازه‌ای محسوب می‌شود که مقاومت سازه را در مقابل بارهای جانبی نظیر باد و زلزله تامین می‌نماید. این سیستم سازه‌ای در کنار مزایای خود، مسلماً معایبی نیز دارد که از مهمترین آنها می‌توان به سختی عملیات اجرا و زمان بر بودن آن و همچنین وزن بالای این نوع سازه‌ها اشاره نمود که مستلزم صرف هزینه‌های هنگفت می‌باشد. از این رو سازه‌های فضایی به علت سرعت و سهولت عملیات اجرا، سبک بودن و از همه مهمتر مقاومت بالایی که در مقابل بارهای وارده از خود نشان می‌دهد جایگزین مناسبی برای دیوارهای برشی محسوب شده که علاوه بر تامین مقاومت سازه در مقابل بارهای جانبی، در جهت سبک‌سازی سازه نیز نسبت به دیوارهای برشی ارجح تر هستند. لذا در این پژوهش رفتار سازه‌های فضایی را به عنوان عناصر مقاوم در مقابل بارهای جانبی مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد.

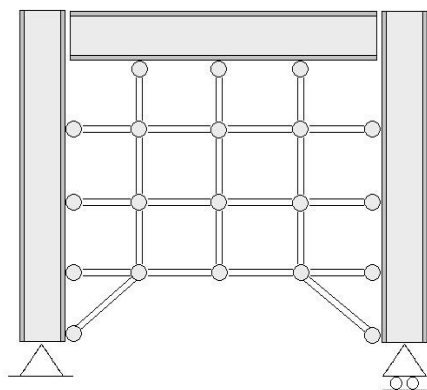
کلید واژه: سازه‌های فضایی، دیوار برشی، بارهای جانبی

۱- مقدمه

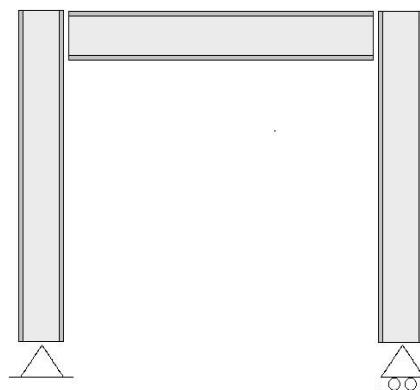
از اوایل قرن بیستم میلادی هنگامی که اولین نمونه‌های سازه‌های مشبک فضایی در سال ۱۹۰۳ توسط الکساندر گراهام بل ابداع و جهت استفاده در بال‌های کایت قرار گرفت شاید کمتر کسی تصور می‌کرد که این ایده بدین سرعت پیشرفت کرده تا جایی که امروزه پروژه‌های بسیاری در سراسر دنیا، اجرا و به بهره‌برداری رسیده باشد [۱]. با نگاهی به برخی پروژه‌های معروف نظیر سقف ترمینال منچستر انگلستان (۱۹۹۳)، سقف سالن ورزشی پالافولس اسپانیا (۱۹۹۳)، سقف استادیوم سیدنی استرالیا (۱۹۹۸) و بسیاری دیگر به این مهم پی می‌بریم که طرح سازه‌های فضایی عمدتاً به منظور پوشش دهانه‌های بزرگ و به عنوان سقف مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۲]. حال اینکه کاربردهای سازه‌های فضایی تنها به این مورد محدود نمی‌شود و از آنجایی که این سیستم سازه‌ای با توزیع نیرو بین اعضای خود رفتاری سه بعدی را عرضه می‌کند بنابراین می‌تواند در مقابل اعمال بارهای بسیار بزرگ، اعم از بارهای مرده و زنده، مقاومت خوبی از خود نشان داده، به طوری که امروزه پیشنهادات جسورانه و گاهاً دور از ذهن توسط شرکت‌های طراح سازه‌های فضایی در سراسر دنیا بیان شده است که از آنها می‌توان به پیشنهاد شرکت شیمیزو در ژاپن اشاره نمود که طرح یک شهر در هوا به شکل هرم را ارائه کرده بطوریکه در ساعات کاری به بیش از یک میلیون نفر می‌رسد و بر روی یک سازه عظیم از خرپای فضایی استوار است. حال در این پژوهش می‌خواهیم از سازه‌های فضایی به عنوان دیوار برشی به منظور تامین مقاومت سازه در مقابل بارهای جانبی نظیر بار باد و زلزله استفاده نموده و رفتار یک قاب دو بعدی را در دو مرحله به صورت ساده و با دیوار مشبک فضایی مورد بحث و بررسی قرار دهیم.

۲- معرفی پل پیشنهادی

سازه مورد بحث یک قاب دو بعدی متشکل از سه عنصر به صورت دو ستون و یک تیر هر یک به طول ۴ متر است بطوریکه مطابق شکل ۱ در انتهای ستون‌ها به دو تکیه‌گاه به صورت مفصلی و دو مجهولی ختم می‌شود. مقطع تیر و ستون‌های این قاب دو بعدی از پروفیل IPE 18 اختیار شده و کلیه اتصالات تیر به ستون، مفصلی تعریف گردیده است. این قاب ابتدا به صورت ساده و سپس همراه با عناصر مقاوم در مقابل بارهای جانبی به صورت یک شبکه فضایی متشکل از ۲۱ گره و ۲۴ عضو می‌باشد که طول اعضای آن در هر دو محور X و Z برابر با ۱ متر بوده و کلیه عضوهای سازه مشبک فضایی دارای سطح مقطع یکسان با قطر ۱۲/۷۰ سانتی‌متر و به صورت توخالی با ضخامت جدار ۴ میلی‌متر می‌باشد. طرح آرایش المان‌های این دیوار مشبک فضایی توسط نرم افزار Formian [۵]، [۶]، [۷]، [۸]، [۹] و معرفی مشخصات سازه‌ای و آنالیز هر مدل توسط نرم افزار Sap2000 [۳]، [۴] و به روش خطی صورت گرفته است. جهت اتصال اعضا به یکدیگر از گره‌های مرو (Mero) استفاده شده و از آنجایی که در نرم افزار Sap2000 قابلیت معرفی نوع گره‌ها وجود نداشته لذا از وزن هر گره صرف نظر کرده و اتصالات بین اعضا را مفصلی فرض نموده‌ایم. در هر دو مدل پیش رو، نیروی افقی P معادل ۱۰۰۰ Kgf به سازه مورد نظر اعمال می‌شود که مسلماً تغییر شکل‌هایی را در سازه به همراه خواهد داشت که در دو مدل مورد بحث متفاوت می‌باشد. لذا در این پژوهش ابتدا مدل اول که یک قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی است را با نرم افزار مدل‌سازی نموده و بیشترین تغییر مکان‌های آنرا تحت اثر بار اعمالی P مورد بررسی قرار می‌دهیم و سپس مطابق شکل ۲ همین قاب را که با دیوار مشبک فضایی در مقابل بارهای جانبی مقاوم شده است تحلیل نموده و بیشترین تغییر مکان‌های بدست آمده را با مدل پیشین مقایسه می‌نماییم.



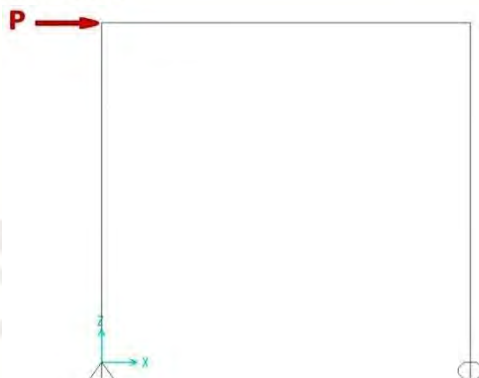
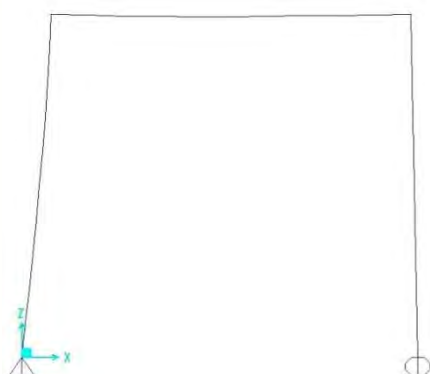
شکل ۲: قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی



شکل ۱: قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی

۳- بررسی تغییر مکان در قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی

همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود قاب دو بعدی مدل اول که بدون دیوار مشبک فضایی است در اثر بار جانبی P دچار تغییر مکان شده و در شکل ۴ حداکثر میزان تغییر مکان اعضای سازه که برابر با ۰/۱۶۳۷۳ متر است مشاهده می‌شود.

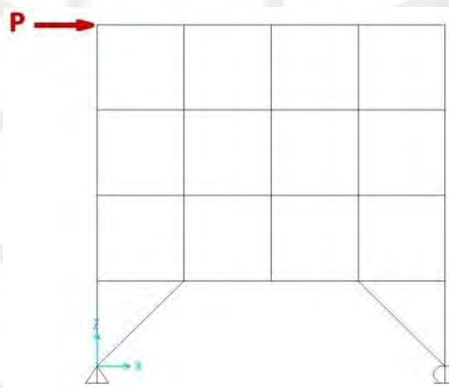
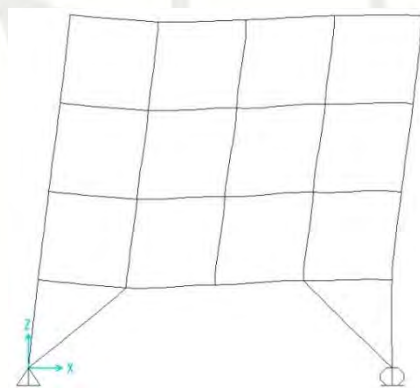


شکل ۴: تغییر مکان قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی
تحت اثر بار جانبی P

شکل ۳: قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی
تحت اثر بار جانبی P

۴- بررسی تغییر مکان در قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود این بار، قاب دو بعدی مدل اول را که با دیوار مشبک فضایی متشکل از ۲۱ گره و ۲۴ عضو مقاوم شده است در نظر می‌گیریم. این سازه نیز مانند سازه قبل تحت تاثیر بار جانبی P معادل ۱۰۰۰ Kgf قرار گرفته بطوریکه محل اعمال بار در هر دو سازه یکسان است. در اثر این بار اعمالی مسلماً تغییر مکان‌هایی در تک تک اعضای سازه به وجود می‌آید که حداکثر میزان تغییر مکان مطابق شکل ۶ برابر با ۰/۰۰۲۳۷ متر است.



شکل ۶: تغییر مکان قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی
تحت اثر بار جانبی P

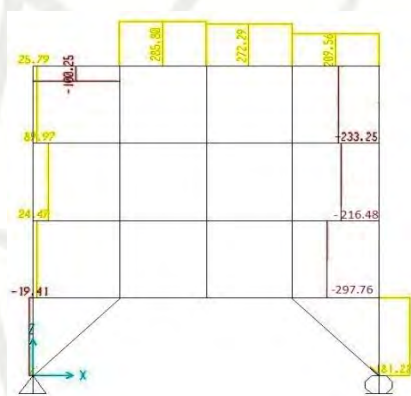
شکل ۵: قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی
تحت اثر بار جانبی P

از مقایسه حداکثر مقادیر تغییر مکان‌های دو سازه اخیر درمی‌یابیم که وقتی یک قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی مقاوم می‌شود در واقع با این کار تعداد المان‌های سازه افزایش یافته و به تبع آن مصالح سازه بیشتر شده که این افزایش حجم مصالح مسلماً افزایش سختی سازه را به همراه خواهد داشت و از آنجایی که سختی عکس تغییر مکان است هر چه سختی سازه افزایش یابد، تغییر مکان آن کاهش خواهد یافت. بطوریکه ملاحظه می‌شود در سازه اول که یک قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک

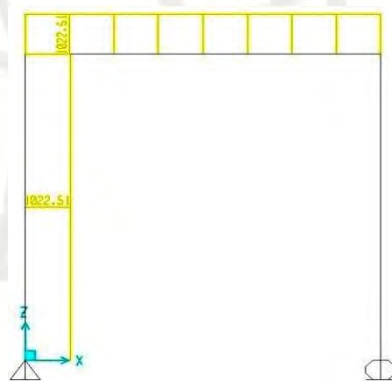
فضایی است پس از اعمال بار P سازه دچار تغییرمکان‌های شدید شده که حداکثر مقدار این تغییرمکان معادل ۱۶/۳۷ سانتی متر می‌باشد. حال وقتی همین قاب دو بعدی را با دیوار مشبک فضایی مقاوم می‌کنیم تغییرمکان‌های سازه به شدت کاهش یافته بطوریکه حداکثر مقدار آن به ۲ میلی‌متر می‌رسد. این کاهش چشمگیر تغییرمکان‌ها در مدل دوم که با دیوار مشبک فضایی طرح شده است بیانگر افزایش سختی سازه نسبت به مدل اول می‌باشد که بدون دیوار مشبک فضایی مورد مدل سازی و تحلیل قرار گرفته است.

۵- بررسی نیروهای برشی در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

با نگاهی به شکل ۷ دیاگرام نیروهای برشی در تک تک اعضای قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار این نیروها معادل ۱۰۲۲/۵۱ Kgf می‌باشد. از مقایسه این مقدار نیروهای برشی با مقادیر دیاگرام‌های نشان داده شده در شکل ۸ که مربوط به قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی بوده و حداکثر نیروهای برشی معادل ۲۹۷/۷۶ Kgf را به ثبت رسانده است درمی‌یابیم که وجود دیوار مشبک فضایی در دهانه قاب‌ها باعث توزیع نیروهای برشی در تک تک المان‌های قاب و دیوار مشبک شده و به علت رفتار سه بعدی اینگونه سازه‌ها و افزایش تعداد المان‌ها مسلماً هر المان سهم کمی از این نیروها را تحمل می‌کند که این امر باعث کاهش مقاطع عناصر اصلی از قبیل تیرها و ستون‌های سازه می‌شود.



شکل ۸: دیاگرام نیروهای برشی در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

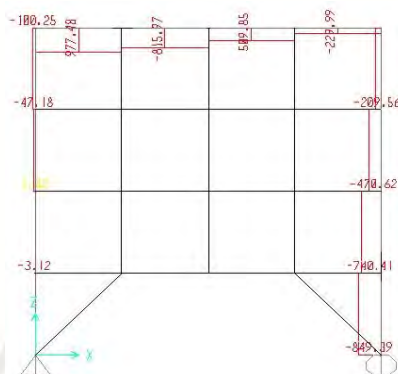


شکل ۷: دیاگرام نیروهای برشی در اعضای قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی

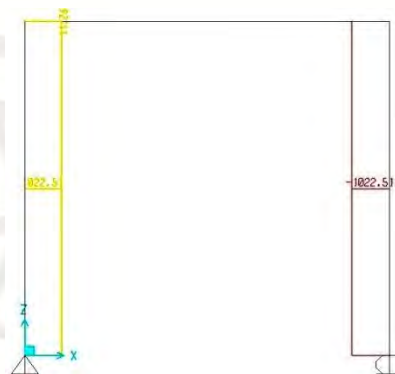
۶- بررسی نیروهای محوری در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

این موضوع در مورد نیروهای محوری ناشی از بار افقی P نیز صادق است بطوریکه مطابق شکل ۱۰ وقتی یک قاب دو بعدی را با دیوار مشبک فضایی مقاوم می‌کنیم در واقع با این کار تعداد اعضا و به تبع آن مصالح سازه را افزایش داده و از آنجایی که سازه‌های فضایی رفتاری سه بعدی دارند لذا نیروهای محوری در کلیه اعضای سازه اعم از اعضای اصلی قاب نظیر تیر و ستون و همچنین کلیه اعضای سازه مشبک فضایی تقسیم شده و این امر منجر به کاهش سهم هر عضو از نیروهای محوری می‌شود و در نتیجه کاهش سطح مقطع اعضای اصلی قاب را به همراه خواهد داشت. از این رو مطابق شکل ۹ وقتی قاب دو بعدی مورد نظر بدون دیوار مشبک فضایی تحت تاثیر بار افقی P قرار می‌گیرد بیشترین مقدار نیروهای محوری در اعضای اصلی قاب معادل ۱۰۲۲/۵۰ Kgf است. این در حالیست که مقادیر نیروهای محوری در اعضای اصلی قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی متغیر بوده بطوریکه مطابق شکل ۱۰ بیشترین مقدار آن از ۹۷۷/۴۸ Kgf تجاوز نکرده و این کاهش نیروهای محوری در مدل

اخیر نسبت به مدل قبل که بدون دیوار مشبک فضایی است به علت توزیع نیروهای محوری در کلیه اعضای اصلی قاب و اعضای دیوار مشبک فضایی می‌باشد که مسلماً سهم هر عضو از این نیروها کمتر از مقادیر نیروهای محوری در قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی خواهد بود.



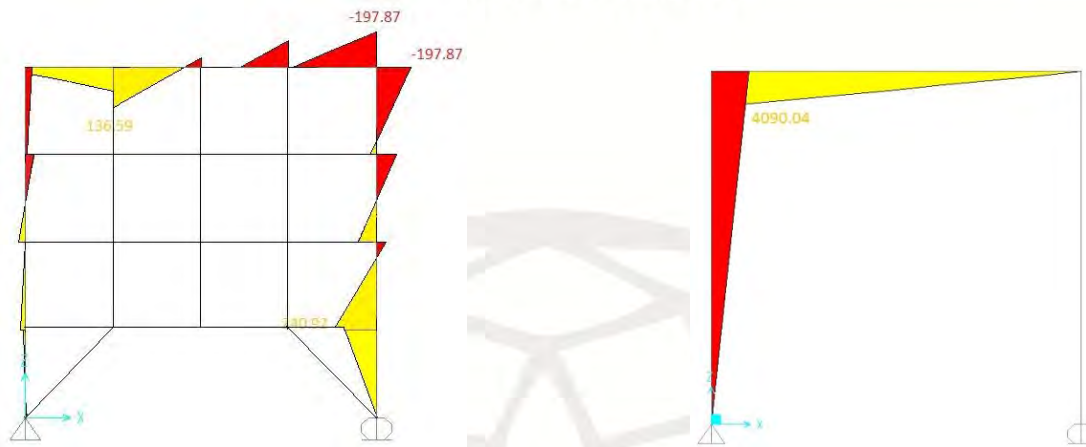
شکل ۱۰: دیاگرام نیروهای محوری در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی



شکل ۹: دیاگرام نیروهای محوری در اعضای قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی

۷- بررسی لنگرهای خمشی در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

لنگرهای خمشی به وجود آمده نیز همانند نیروهای برشی و محوری رابطه مستقیم با تعداد المان‌های موجود در یک سازه دارد بطوریکه مطابق شکل ۱۱ وقتی قاب دو بعدی فاقد دیوار مشبک فضایی است بیشترین مقدار لنگرهای خمشی معادل $4090/04 \text{ Kgf}$ می‌باشد و این در حالیست که مقادیر این لنگرها در اعضای اصلی قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی متغیر بوده و مطابق شکل ۱۲ در بیشترین حالت از $240/92 \text{ Kgf}$ تجاوز نکرده است. علت این امر را می‌توان در کثرت اعضای مدل دوم نسبت به مدل اول و توزیع لنگرها بین کلیه اعضای سازه از قبیل اعضای اصلی قاب و اعضای شبکه فضایی جستجو کرد بطوریکه هر عضو به نوبه خود سهمی از این لنگرهای خمشی را تحمل خواهد کرد و در نتیجه از لنگرهای وارد به اعضای اصلی کاسته شده و مسلماً مقاطع آنها به علت وجود نیروهای کمتر اعم از نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی به طور چشمگیری کوچکتر خواهد شد.

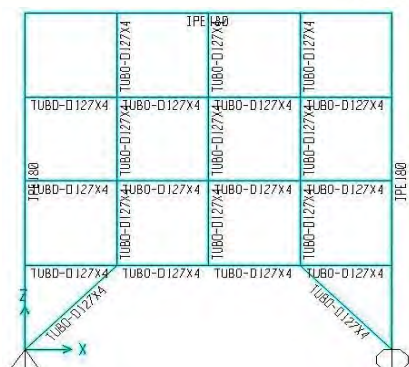


شکل ۱۲: دیاگرام لنگرهای خمشی در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

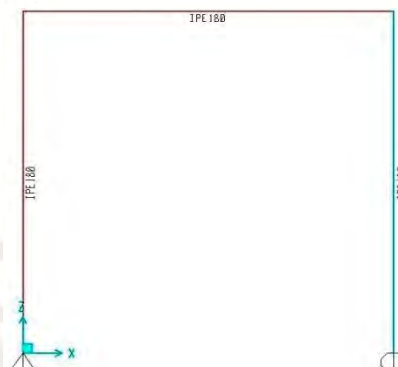
شکل ۱۱: دیاگرام لنگرهای خمشی در اعضای قاب دو بعدی بدون دیوار مشبک فضایی

۸- بررسی توزیع تنش‌ها در اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی

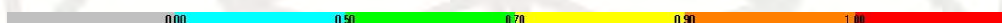
همانطور که می‌دانیم ماهیت سازه‌های فضایی توزیع نیروهای داخلی بین کلیه اعضای آن می‌باشد که این امر منجر به کاهش نیروهای داخلی اعم از نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی در تک تک اعضا می‌شود. از این رو هر عضو سهم کمی از کل نیروهای وارده را تحمل خواهد نمود که در واقع کاهش سطح مقطع اعضا را به همراه خواهد داشت. حال با نگاهی به شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که اعضای قاب دو بعدی فاقد دیوار مشبک فضایی تحت تاثیر تنش‌های بحرانی تری نسبت به اعضای قاب دو بعدی با دیوار مشبک فضایی قرار دارد. بطوریکه مطابق جدول تنش نشان داده شده در شکل ۱۵ رنگ خاکستری بیانگر کمترین میزان تنش در اعضا می‌باشد و هرچه به طرف راست این جدول رنگ بندی حرکت کنیم بر میزان تنش‌ها افزوده شده و در نهایت رنگ قرمز که بیشترین میزان تنش‌ها را نشان می‌دهد بیانگر عبور تنش‌های مجاز از محدوده توصیه شده توسط آیین نامه AISC آمریکا می‌باشد که حداکثر مقدار تنش‌های اعضا را به $1/0.5$ محدود نموده است. حال با نگاهی مجدد به شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که تنش‌های موجود در اعضای سازه پیش رو از محدوده مجاز آیین نامه AISC که معادل $1/0.5$ می‌باشد گذشته و به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. این موضوع بیانگر آنست که اعضای این قاب دو بعدی که فاقد دیوار مشبک فضایی است تحمل تنش‌های وارده را نداشته و باید سطح مقطع اعضا افزایش یابد. در مورد قاب با دیوار مشبک فضایی به علت توزیع نیروهای داخلی در کلیه اعضا اعم از اعضای اصلی سازه و اعضای سازه مشبک فضایی، سهم هر عضو از این نیروهای داخلی به شدت کاهش یافته بطوریکه اعضای اصلی سازه به راحتی قادر به تحمل این نیروها بوده و همانطور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود کلیه اعضای سازه در محدوده مجاز آیین نامه قرار داشته و به رنگ آبی می‌باشد که این موضوع بیانگر استحکام قاب با دیوار مشبک فضایی در مقابل بارهای جانبی است.



شکل ۱۴: توزیع تنش‌ها در اعضای قاب دو بعدی
با دیوار مشبک فضایی



شکل ۱۳: توزیع تنش‌ها در اعضای قاب دو بعدی
بدون دیوار مشبک فضایی



شکل ۱۵: راهنمای رنگ بندی تنش‌ها

۹- نتیجه گیری

استفاده از سازه‌های فضایی به عنوان عناصر مقاوم در مقابل بارهای جانبی منجر به توزیع این بارها بین کلیه عناصر سازه اعم از اعضای اصلی و اعضای سازه مشبک فضایی شده و هر عضوی به نوبه خود در تحمل این بارها سهیم می‌شوند. این امر منجر به کاهش نیروهای داخلی اعم از نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی در تک تک اعضا شده و اعضای اصلی سازه سهم کمی از این بارها را تحمل کرده و بدون نیاز به افزایش سطح مقطع آنها قادر به تحمل نیروهای مذکور خواهد بود. در واقع دیوار مشبک فضایی به علت رفتار سه بعدی و پخش بارها در کلیه اعضای خود بیشترین سهم بارهای وارده را به خود اختصاص می‌دهند که این امر، کاهش چشمگیر تنش‌های داخلی اعضا و کاهش سطح مقطع اعضای اصلی سازه را به همراه خواهد داشت. از طرفی استفاده از این سیستم سازه‌ای مقاوم در مقابل بارهای جانبی منجر به افزایش تعداد اعضای سازه و به تبع آن افزایش مصالح آن شده و در نتیجه سختی سازه بیشتر می‌شود و از آنجایی که سختی عکس تغییرمکان است مسلماً تغییرمکانهای تک تک اعضا و گره‌های سازه کاهش یافته و پایداری سازه در مقابل بارهای مذکور افزایش خواهد یافت. علاوه بر این استفاده از سازه‌های مشبک فضایی به عنوان عناصر مقاوم در مقابل بارهای جانبی منجر به سهولت و سرعت عملیات اجرایی و کاهش هزینه‌های ساخت و ساز شده و به علت سبک بودن و مقاومت بالایی که در مقابل بارهای وارده از خود نشان می‌دهد جایگزین مناسبی برای دیوارهای برشی محسوب می‌شوند.

مراجع

- [۱] جی اس راماسوامی، ج. (۱۳۸۳). تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌های فضایی. ترجمه علی کاوه. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران. ایران. شماره نشریه ک-۳۸۲. جان چیلتون، ج. (۱۳۸۸).
- [۲] سازه‌های مشبک فضایی. ترجمه محمود گلابچی. دانشگاه تهران. ایران. چاپ سوم.

[۳] اشرف حبیب الله، آ. (۱۳۸۶). برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه‌ها SAP2000. ترجمه افشین ترابی. سیمای دانش. تهران. چاپ دوم.

[۴] حسن باجی، ح. جواد هاشمی، ج. (۱۳۸۴). پروژه‌های کاربردی در تحلیل و طراحی کامپیوتری سازه‌ها. متفکران. تهران. چاپ چهارم.

[5] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures, Vol 15, 2000.

[6] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing II, International Journal of Space Structures, Vol 16, 2001

[7] Nooshin H, Disney P L, Formex Configuration Processing III, International Journal of Space Structures, Vol 17, 2002.

[8] Nooshin H, A Technique for Surface Generation, IASS Symposium, Stuttgart, Germany, October 1996.

[9] Nooshin H, Disney P L and Champion O C, Computer-Aided Processing of Polyhedric Configurations, Chapter 12 in Beyond the Cube, Edited by J F Gabriel, John Wiley, 1997.