

# اندرکنش شبکه‌ی قطری پیرامونی و هسته‌ی داخلی در سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری

آزاده جلالی سنگانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی معصومی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

علی خیرالدین (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۶)  
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۱۰۵-۱۱۲، (پادداشت نشی)

در میان سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی در ساختمان‌های بلند مرتبه، می‌توان به سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری اشاره کرد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار ترکیبی سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی همراه با هسته‌ی داخلی تحت نیروهای جانبی لرزه‌ی است. برای این منظور، رفتار اندرکنشی ۱۲ سازه‌ی فولادی ۳۶ طبقه همراه با هسته‌ی داخلی با زاویه‌های مختلف شبکه‌ی قطری ارزیابی شده است. هسته‌ی داخلی به دو صورت سیستم قاب‌های مهاربندی و خمشی در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سهم قابل ملاحظه‌ی از بار جانبی در همه‌ی طبقات به جز طبقه‌ی ۳۶م، توسط سیستم شبکه‌ی قطری تحمل شده و در طبقه‌ی آخر به دلیل اثر مودهای بالا، هسته‌ی داخلی سهم قابل ملاحظه‌ی از برش را تحمل کرده است. کاهش زاویه‌ی المان‌های شبکه‌ی قطری باعث افزایش صلبیت برشی سیستم شبکه‌ی قطری شده و برای زاویه‌ی  $5^\circ/19^\circ$  بیشترین صلبیت برشی به دست آمده است. در انتها، روشی برای جلوگیری از ایجاد برش منفی در طبقه‌ی ۳۶م پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: سیستم شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی داخلی، رفتار لرزه‌ی، درصد جذب برش.

jalaliazadeh89@yahoo.com  
massumi@khu.ac.ir  
kheyroddin@semnan.ac.ir

## ۱. مقدمه

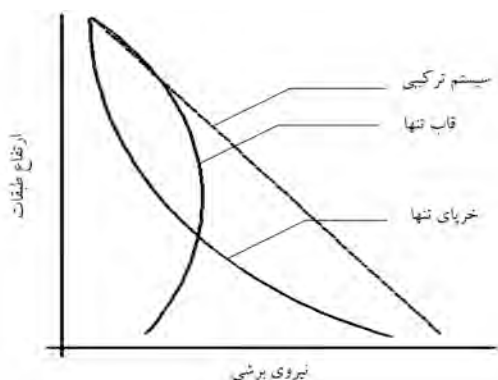
سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری<sup>۱</sup>، سختی بالایی نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ی دارد و زمانی که در اتصال با یک هسته‌ی لوله‌ی قرار می‌گیرد، سیستم سازه‌ی لوله در لوله به وجود می‌آید و باعث افزایش سختی جانبی سازه می‌شود. سیستم شبکه‌ی قطری، عملکردی شبیه به یک خرپای فضایی دارد. در سازه‌ی سیستم شبکه‌ی قطری، صلبیت برشی و خمشی از طریق عملکرد محوری المان‌های مورب تأمین می‌شود. لذا، این قابلیت سازه‌ی بالا، باعث کاهش تعداد ستون‌های داخلی می‌شود. بنابراین، سیستم سازه‌ی مذکور در بیشتر موارد مورد علاقه‌ی معماران قرار می‌گیرد. استفاده از هسته‌ی داخلی در سازه‌ها با سیستم شبکه‌ی قطری، در تغییر مکان

جانبی و رفتار لرزه‌ی سازه اثر می‌گذارد. هسته‌ی داخلی که معمولاً در سیستم‌های سازه‌ی استفاده می‌شود، علاوه بر افزایش سختی سازه، محلی برای عبور آسانسورها و تأسیسات داخلی است.<sup>۱</sup> سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری تکامل یافته‌ی سیستم لوله‌ی مهاربندی شده است که اعضاء قطری پیرامونی به صورت شبکه‌های مثلثی دارد. تفاوت بین سازه‌های با قاب مهاربندی خارجی متداول و سازه‌های با سیستم

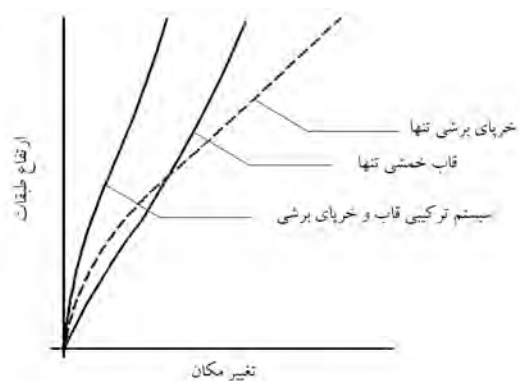
ساختمان بر وزن مصالح مصرفی انجام شده است.<sup>۲</sup> علاوه بر این در سال ۲۰۰۷، به ارائه‌ی روشی مبتنی بر سختی برای طراحی اولیه‌ی المان‌های سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری پرداخته شده است.<sup>۳</sup> در مطالعه‌ی دیگری در همان سال،<sup>۴</sup> نشان داده شده است که با کاهش زاویه، نسبت لنگی برش در سازه با سیستم شبکه‌ی قطری کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۹،<sup>۵</sup> نیز در مطالعه‌ی سازه‌های با سیستم شبکه‌ی قطری و سیستم لوله‌ی معادل نشان داده شده است که سیستم شبکه‌ی قطری نسبت به سیستم لوله‌ی، مقاومت بیشتری در برابر پدیده‌ی لنگی برش دارد. همچنین در سال ۲۰۱۰،<sup>۶</sup> به ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌ها با سیستم شبکه‌ی قطری پرداخته و نشان داده شده است که سازه‌ی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۲۰.



شکل ۱. توزیع نیروی برشی در سیستم ترکیبی قاب-خرپای برشی.<sup>[۱۰]</sup>



شکل ۲. تغییر مکان قاب و خرپای برشی تحت بار جانبی.<sup>[۱۰]</sup>

به ترتیب توزیع نیروی برشی و تغییر مکان جانبی سیستم ترکیبی قاب خمشی و مهاربندی را نشان می‌دهند.

از آنجا که استفاده از سیستم‌های ترکیبی تا ارتفاع محدودی به‌صرفه است، بدین منظور برای افزایش سختی سازه‌های بلندمرتبه، سیستم سازه‌ی لوله‌یی ابداع شده است. سیستم سازه‌ی لوله در لوله، یکی از انواع سیستم‌های لوله‌یی است که شامل یک قاب لوله‌یی بیرونی و یک هسته‌ی داخلی است. در سیستم مذکور قسمتی از بار قائم ثقلی توسط قاب‌های بیرونی و قسمتی توسط سازه‌ی داخلی که شامل هسته‌ی داخلی یا ستون‌های داخلی است، تحمل می‌شود. هسته‌ی داخلی در سازه‌ی فلزی، قاب مهاربندی و در سازه‌ی بتنی، دیوار برشی است.<sup>[۱۱]</sup> در سازه‌ها با هسته‌ی داخلی، اگر مود تغییر شکل خمشی دو سیستم داخلی و بیرونی مشابه باشند، برش ناشی از بارهای جانبی به نسبت سختی قاب بیرونی و هسته‌ی داخلی توزیع می‌شود. در غیر این صورت، توزیع برش در ارتفاع ساختمان به‌گونه‌ی متفاوتی می‌افتد که دو سیستم باید به‌صورت سیستمی واحد عمل کنند.

### ۳. مدل‌سازی و آنالیز

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات زاویه در اندرکنش بین دو سیستم سازه‌یی پیرامونی و داخلی، ۱۲ سازه‌ی ۳۶ طبقه فولادی با نسبت منظر ۳/۶ به ازاء ۳ زاویه‌ی اعضا قطری ۵۰/۱۹، ۶۰/۹۵ و ۶۷/۳۸ درجه که به ترتیب مدول شبکه‌ی قطری ۲، ۳ و ۴ دارند، در نظر گرفته شده است. منظور از مدول شبکه‌ی قطری، تعداد طبقاتی است که توسط المان‌های مورب محصور شده‌اند. به‌دلیل دسترسی کافی به فضای باز بیرون در سازه‌های سیستم شبکه‌ی قطری،

شبکه‌ی قطری، مقاومت بیشتر و سختی کمتری نسبت به سازه‌ی لوله‌یی دارد. در سال ۲۰۱۱<sup>[۱۲]</sup> نیز با در نظر گرفتن سازه‌های شبکه‌ی قطری با هسته‌ی داخلی دیوار برشی کوبله به اندرکنش سیستم سازه‌یی شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی داخلی دیوار برشی بتنی تحت اثر نیروی زلزله پرداخته شده است. در سال ۲۰۱۲<sup>[۸]</sup> در بررسی سیستم سازه‌یی که متشکل از المان‌های شش ضلعی بوده است، نشان داده شده است که سیستم مذکور در مقایسه با سیستم شبکه‌ی قطری، سختی بیشتری دارد. همچنین در سال ۲۰۱۳<sup>[۹]</sup> نشان داده شده است که سیستم‌های سازه‌یی با المان‌های مورب در پیرامون سازه، پاسخ مناسبی در برابر بارهای جانبی از خود نشان می‌دهند و جابه‌جایی جانبی، جابه‌جایی جانبی نسبی<sup>۲</sup> و نیروی بالارونده<sup>۳</sup> در سیستم سازه‌یی ذکر شده نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌یی کمتر است. تاکنون بیشتر مطالعات و پژوهش‌ها در زمینه‌ی سیستم سازه‌یی شبکه‌ی قطری، به تعیین زاویه‌ی بهینه‌ی اعضا مورب که به ازاء آن کمینه‌ی مصالح مصرفی و کمینه‌ی لنگی برش حاصل شود، پرداخته‌اند. در مطالعات پیشین، سیستم سازه‌یی شبکه‌ی قطری بدون هسته‌ی داخلی فرض شده است. از آنجا که مطالعات کمی بر روی سازه‌های با سیستم شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی داخلی صورت گرفته است، در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن دو سیستم سازه‌یی داخلی قاب خمشی و مهاربند هم‌گرا به بررسی رفتار اندرکنشی بین سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی و هسته‌ی داخلی، تحت نیروی جانبی زلزله پرداخته شده است. بر این اساس، مطالعاتی در مورد نحوه‌ی توزیع بار جانبی بین هسته‌ی داخلی و سیستم خارجی توسط پارامتر درصد جذب برش انجام شده است. همچنین تأثیر کاهش زاویه‌ی اعضا قطری در افزایش صلبیت برشی در سازه‌ها با نسبت منظر ۳/۶ بررسی شده است. انتظار می‌رود که در سازه‌های مدل شده با نسبت منظر پایین ۳/۶، به‌ازاء زاویه‌ی ۵۰/۱۹، مقاومت برشی بیشتری حاصل شود. ارزیابی رفتار لرزه‌یی سازه‌ها با استفاده از آنالیز دینامیکی طیفی خطی صورت گرفته است. پارامترهای مورد بررسی در پژوهش حاضر، درصد جذب برش و تغییر مکان جانبی سازه‌ها هستند.

### ۲. روش پژوهش

سیستم قاب مهاربندی شده شبیه به یک تیر طره‌ی قائم عمل می‌کند و در مود خمشی تغییر شکل می‌دهد. شیب خم‌شدگی بیشتر در بالای ساختمان نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی مذکور، قاب مهاربندی سهم کمی در سختی جانبی سازه دارد. علاوه بر این، قاب خمشی در مود برشی تغییر شکل می‌دهد. در سیستم قاب خمشی، شیب خم‌شدگی در پایه‌ی ساختمان، در جایی که برش بیشینه است، بیشتر می‌شود. هنگامی که دو سیستم قاب مهاربندی شده و قاب خمشی به‌وسیله‌ی دیافراگم‌های کف صلب به هم متصل می‌شوند، نیروی برشی غیریکنواختی بین دو سیستم به وجود می‌آید که اندرکنش آن‌ها منجر به ایجاد سیستم سازه‌یی به‌صرفه‌تری می‌شود. قاب خمشی در قسمت بالای ساختمان مانع از جابه‌جایی زیاد قاب مهاربندی می‌شود. علاوه بر این، در قسمت پایین ساختمان قاب مهاربندی با اعمال نیرو از جابه‌جایی زیاد قاب خمشی جلوگیری می‌کند. به‌طور کلی در طبقات بالا در جایی که برش نسبتاً کم است، قاب خمشی، قاب مهاربندی را تحمل می‌کند؛ در حالی که در طبقات پایین، قاب مهاربندی با تحمل درصد بالایی از برش، قاب خمشی را نگه می‌دارد. تغییر شکل‌های خمشی متفاوت دو سیستم باعث می‌شود که قاب خمشی در طبقات بالا، تغییر شکل‌های خمشی قاب مهاربندی را کاهش دهد و در طبقات پایین، قاب مهاربندی سهم به‌سزایی در تحمل برش ایفا می‌کند. شکل‌های ۱ و ۲،

شده است. طراحی سازه‌ها براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران<sup>[۱۲]</sup> و به صورت حدی صورت گرفته است. تحلیل و طراحی سازه‌های مدل نیز با نرم‌افزار SAP۲۰۰۰-۷۱۴<sup>[۱۵]</sup> انجام شده است. در جدول‌های ۱ الی ۳، مشخصات مصالح مصرفی در سازه‌های مدل شده ارائه شده است. از مقاطع لوله برای اعضای قطری و مهاربندهای داخلی، مقاطع قوطی برای ستون‌ها و مقاطع W برای تیرها استفاده شده است.

از آنجا که تحت بار جانبی قاب خمشی و قاب مهاربندی به ترتیب، رفتار برشی و خمشی دارند؛ لذا با در نظر گرفتن سیستم شبکه‌ی قطری به‌عنوان هسته‌ی بیرونی، قاب خمشی و قاب مهاربندی به‌عنوان هسته‌ی داخلی، رفتار ترکیبی و نحوه‌ی اندرکنش دو سیستم تحت بار جانبی مطالعه شده است. یکی از ویژگی‌های منحصر به‌فرد سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری، حفظ پایداری بدون ستون‌های محیطی است؛ لذا سازه‌های با سیستم شبکه‌ی قطری بیرونی با ۴ ستون گوشه و المان‌های شبکه‌ی قطری به‌صورت دو سر مفصل در نظر گرفته شده‌اند. در فاصله‌ی سیستم شبکه‌ی قطری بیرونی و هسته‌ی داخلی، ستون میانی وجود ندارد و دو سیستم توسط سقف صلب به هم متصل شده‌اند. سیستم سقف سازه، تیرچه بلوک فرض شده است. به منظور بررسی رفتار ترکیبی و نحوه‌ی اندرکنش دو سیستم بیرونی و داخلی از پارامترهای درصد جذب برش طبقات استفاده شده است. منظور از پارامتر درصد جذب برش، نسبت مقدار برش تحمل شده توسط هسته‌ی داخلی یا سیستم قطری بیرونی در هر طبقه به کل برش جذب شده در همان طبقه است.

آنالیز و طراحی سازه‌های مدل در ۴ مرحله صورت گرفته است: در مرحله‌ی اول، سازه‌ها با سیستم شبکه‌ی قطری بیرونی و هسته‌ی مهاربندی داخلی مدل شده‌اند. در این حالت، سطح مقطع تیر و ستون‌های داخلی و خارجی برای کلیه سازه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر سطح مقطع المان‌های مهاربندی در نحوه‌ی توزیع نیروهای جانبی بین هسته‌ی داخلی و خارجی، سطح مقطع المان‌های قاب مهاربندی داخلی ۱ بار بزرگ‌تر از مقادیر طراحی شده و بار دیگر کوچک‌تر از آن‌ها در نظر گرفته شده است. در مرحله‌ی دوم، با حذف مهاربندهای داخلی و جایگزینی هسته‌ی قاب خمشی، رفتار ترکیبی دو سیستم سازه‌ی مطالعه شده است. در این حالت نیز مشابه حالت قبل، سطح مقطع المان‌های تیر و ستون برای زاویه‌های مختلف شبکه‌ی قطری یکسان فرض شده است. در مرحله‌ی سوم، با حذف مهاربندی‌های طبقات آخر تغییرات توزیع برش در این طبقات مجدداً بررسی شده است. در کلیه سازه‌ها، سطح مقطع المان‌های شبکه‌ی قطری به ازاء زوایای مختلف طراحی شده است. سطح مقطع المان‌های مورب سیستم شبکه‌ی قطری به ازاء زاویه‌ی ثابت المان‌های سیستم شبکه‌ی قطری برای سازه‌ها با دو هسته‌ی متفاوت، یکسان فرض شده است. در مرحله‌ی چهارم، جابه‌جایی جانبی سازه‌ها نیز بررسی شده است.

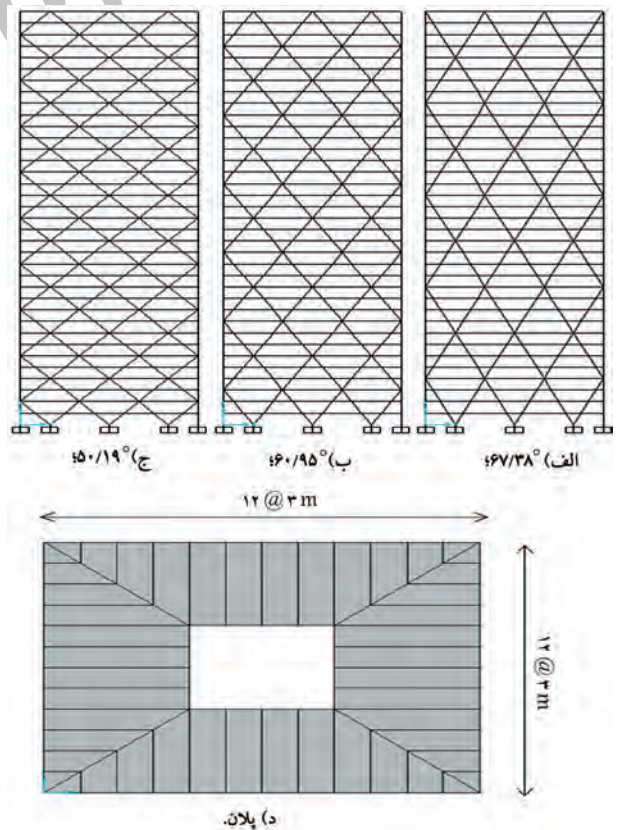
#### ۴. تجزیه و تحلیل نتایج

##### ۱.۴. تأثیر سطح مقطع هسته‌ی مهاربندی داخلی در رفتار ترکیبی

سازه‌ی شبکه‌ی قطری با هسته‌ی مهاربندی داخلی به منظور بررسی رفتار ترکیبی سازه‌ی پیرامونی و هسته‌ی داخلی به ازاء سطح مقطع‌های متفاوت مهاربندهای هسته‌ی داخلی هر کدام از سازه‌ها با زاویه‌های ۵۰/۱۹، ۶۰/۹۵ و ۶۷/۳۸ درجه به ازاء ۳ سطح مقطع متفاوت آنالیز و طراحی

سیستم سازه‌ی شبکه‌ی قطری مورد توجه بسیار معماران قرار گرفته است؛ لذا در مطالعه‌ی حاضر، کمینه‌ی مدول شبکه‌ی قطری، عدد ۲ فرض شده است، که به ازاء آن زاویه‌ی ۵۰/۱۹ به‌دست آمده است. از آنجا که زاویه‌ی اعضای شبکه‌ی قطری، نقش کلیدی در سازه‌های شبکه‌ی قطری ایفا می‌کنند، ارتفاع سازه‌ها یکسان فرض شده و به تغییرات زاویه‌ی پرداخته شده است. سازه‌های مدل با پلان مربع به ابعاد ۳۶ × ۳۶ متر، هسته‌ی داخلی توخالی ۱۲ × ۱۲ متر، ارتفاع طبقات ۳/۶ متر و فاصله‌ی هر جفت اعضای قطری در پیرامون سازه، ۱۲ متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۳، پلان دو بعدی و نمای سازه‌های مدل نشان داده شده است.

بار مرده و زنده‌ی وارد بر طبقات، مطابق با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران<sup>[۱۲]</sup> به ترتیب  $(5.788 \text{ kN/m}^2)$  و  $(4.9 \text{ kN/m}^2)$  فرض شده است. بارگذاری لرزه‌ی مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران<sup>[۱۳]</sup> صورت گرفته و با فرض قرارگیری سازه‌ها در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد، شتاب مبنای طرح ۰.۳۵ انتخاب شده است. همچنین سازه‌ها بر روی خاک نوع II در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که برای سازه‌ها با این نوع سیستم سازه‌ی ضریب رفتار مشخصی در آیین‌نامه تعیین نشده است، با فرض شکل‌پذیری متوسط، ضریب رفتار ۷ برای سازه‌ها در نظر گرفته شده است. مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران، در ساختمان‌های منظم با ارتفاع بیش از ۵۰ متر، تحلیل سازه‌ها با استفاده از آنالیز دینامیکی طیفی خطی انجام و طیف طرح استاندارد آیین‌نامه‌ی ایران جهت بارگذاری لرزه‌ی استفاده شده است. فولاد مصرفی مقاطع از نوع ST۳۷ با  $F_y = 235.359/62 \text{ (kN/m}^2)$  و  $F_u = 362.846/0.5 \text{ (kN/m}^2)$  فرض



شکل ۳. نما و پلان سازه‌ها با سیستم شبکه‌ی قطری.

جدول ۱. مقاطع قوطی شکل (b(m), t(m)).

ستون‌های داخلی در سازه‌ی شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی مهاربندی	ستون‌های گوشه		
	۶۷/۳۸°	۶۰/۹۵°	۵۰/۱۹°
۰/۸، ۰/۰۸	۱، ۰/۱	۱/۱، ۰/۱۱	۱/۳، ۰/۱۳
۰/۶، ۰/۰۶	۰/۸، ۰/۰۸	۱، ۰/۱	۱، ۰/۱
۰/۴، ۰/۰۴	۰/۶، ۰/۰۶	۰/۸، ۰/۰۸	۰/۸، ۰/۰۸
		۰/۶، ۰/۰۶	۰/۶، ۰/۰۶

جدول ۲. مقاطع قوطی شکل (b(m), t(m)).

ستون‌های داخلی در سازه‌ی شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی قاب خمشی	ستون‌های گوشه		
	۶۷/۳۸°	۶۰/۹۵°	۵۰/۱۹°
۱/۳، ۰/۱۳	۱، ۰/۱	۱/۱، ۰/۱۱	۱/۳، ۰/۱۳
۱، ۰/۱	۰/۸، ۰/۰۸	۱، ۰/۱	۱، ۰/۱
۰/۸، ۰/۰۸	۰/۶، ۰/۰۶	۰/۸، ۰/۰۸	۰/۸، ۰/۰۸
		۰/۶، ۰/۰۶	۰/۶، ۰/۰۶

جدول ۴. مشخصات سازه‌های مدل شده.

نام سازه	سطح مقطع مهاربندی داخلی (cm <sup>2</sup> )	نام سازه	زاویه‌ی المان‌های قطری پیرامونی (درجه)
SB۱	۶۵۱۴۴،۰۴	SD۱	۵۰/۱۹
SB۲	۱۴۶۵۷۴،۱۴	SD۲	۶۰/۹۵
SB۳	۲۶۰۵۷۶،۲۴	SD۳	۶۷/۳۸

جدول ۳. مقاطع لوله‌ی شکل (D(m), t(m)).

زاویه‌ی اعضاء قطری		
۶۷/۳۸°	۶۰/۹۵°	۵۰/۱۹°
۰/۶، ۰/۰۶	۰/۵۵، ۰/۰۵۵	۰/۵، ۰/۰۵
۰/۵، ۰/۰۵	۰/۴۵، ۰/۰۴۵	۰/۴، ۰/۰۴

بیشینه‌ی مقاومت جانبی را نسبت به سازه‌های شبکه‌ی قطری با زاویه‌ی ۶۷/۳۸° و ۶۰/۹۵° دارد. علاوه بر این، در شکل‌های (الف)، (ب) و (ج) برش جذب شده در طبقه‌ی ۳۶م منفی است. در این صورت نه فقط سیستم شبکه‌ی قطری نیروی جانبی لرزه‌یی را جذب نمی‌کند، بلکه نیرویی اضافی در جهت نیروی زلزله به سازه اعمال می‌کند. در سازه‌ی سیستم شبکه‌ی قطری با هسته‌ی مهاربندی داخلی، هسته‌ی داخلی و سیستم پیرامونی به تنهایی رفتاری شبیه به تیر طره دارند و در مود خمشی تغییر شکل می‌دهند. لذا در سازه‌های ترکیبی مذکور، نیروی جانبی به نسبت سختی هسته‌ی داخلی و هسته‌ی پیرامونی توزیع می‌شود.

#### ۲.۴. اندرکنش سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی و هسته‌ی قاب خمشی داخلی

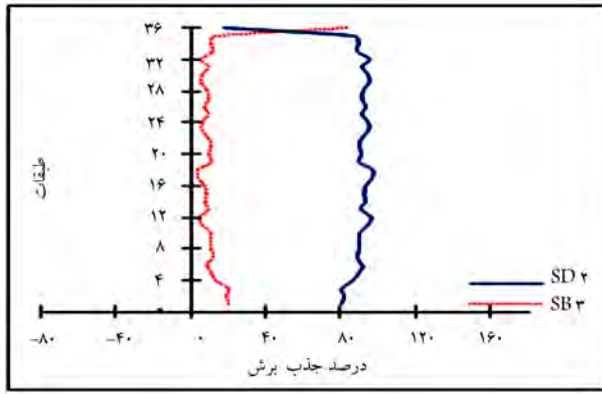
به منظور بررسی اندرکنش سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی و هسته‌ی قاب خمشی داخلی، سازه‌های با سیستم شبکه‌ی قطری با زاویه‌های ۵۰/۱۹، ۶۰/۹۵ و ۶۷/۳۸ درجه همراه با هسته‌ی قاب خمشی داخلی مدل شده‌اند. منظور از BF، هسته‌ی قاب خمشی داخلی است. شکل ۷، نتایج حاصل از نحوه‌ی توزیع نیروی جانبی بین هسته‌ی داخلی و خارجی را نشان می‌دهد.

مقادیر درصد جذب برش طبقه‌ی آخر برای هسته‌ی پیرامونی و داخلی به ترتیب ۱۶٪ و ۸۴٪، ۶۱٪ و ۳۹٪، ۸۱٪ و ۱۹٪ است که با افزایش زاویه از میزان برش جذب شده توسط شبکه‌ی قطری پیرامونی در طبقه‌ی آخر از ۸۱٪ به ۱۶٪ کاهش یافته است (شکل‌های ۷ الف، ب و ج). علاوه بر این، همان‌طور که در شکل‌های ذکر شده مشاهده می‌شود، کمیته‌ی برش تحمل شده توسط سیستم شبکه‌ی قطری

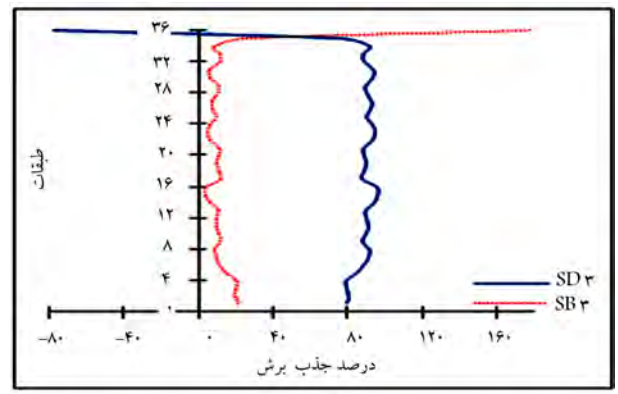
شده‌اند (شکل‌های ۴ الی ۶). در جدول ۴، مشخصات سازه‌های مدل شده ارائه شده است. SD و SB به ترتیب معرف سازه با سیستم شبکه‌ی قطری و هسته‌ی مهاربندی شده‌ی داخلی هستند.

همان‌طور که در شکل (الف) ملاحظه می‌شود، درصد برش جذب شده در طبقه‌ی آخر با هسته‌ی پیرامونی و هسته‌ی داخلی به ترتیب ۷۷٪ و ۱۷۷٪، در شکل (ب) ۵۶٪ و ۱۵۶٪ و در شکل (ج) ۱۶٪ و ۱۱۶٪ است. در شکل (الف)، درصد برش تحمل شده در طبقه‌ی آخر توسط هسته‌ی پیرامونی و هسته‌ی داخلی به ترتیب ۵۴٪ و ۴۶٪، در شکل (ب) ۶۵٪ و ۳۵٪ و در شکل (ج) ۷۹٪ و ۲۱٪ است. از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در هر گروه از سازه‌ها به ازاء زاویه‌ی ثابت المان‌های شبکه‌ی قطری با کاهش سطح مقطع مهاربند‌های هسته‌ی داخلی، میزان برش جذب شده توسط سیستم شبکه‌ی قطری بیرونی در طبقات آخر افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه به ازاء سطح مقطع ثابت از مقدار برش تحمل شده توسط سیستم شبکه‌ی قطری کاسته می‌شود. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، کمیته‌ی برش تحمل شده در طبقات پایین مدل‌های SD۱، SD۲، SD۳ به ازاء ۳ سطح مقطع متفاوت برای مهاربند‌های قاب داخلی به ترتیب ۷۸٪، ۸۰٪ و ۸۵٪ است.

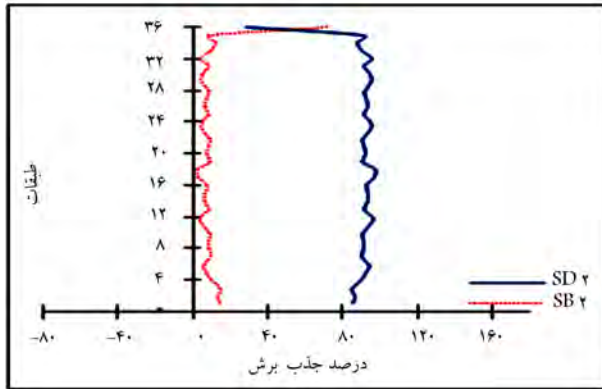
با توجه به شکل‌های ۴ الی ۶، سهم قابل ملاحظه‌یی از نیروی جانبی در همه‌ی طبقات به غیر از طبقه‌ی ۳۶م، توسط سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی تحمل می‌شود و برش جذب شده توسط هسته‌ی مهاربندی داخلی در طبقه‌ی ۳۶م به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. براساس این نتایج، با کاهش زاویه‌ی المان‌های مورب سیستم شبکه‌ی قطری، بیشینه‌ی برش تحمل شده توسط سیستم شبکه‌ی قطری در طبقه‌ی ۳۶م کاهش می‌یابد. لذا سازه‌ی سیستم شبکه‌ی قطری با زاویه‌ی ۵۰/۱۹°،



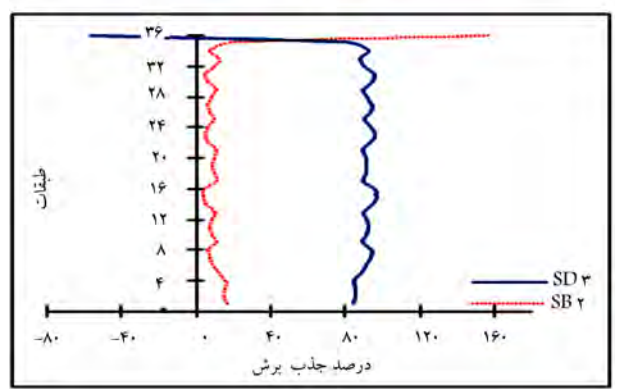
(الف)



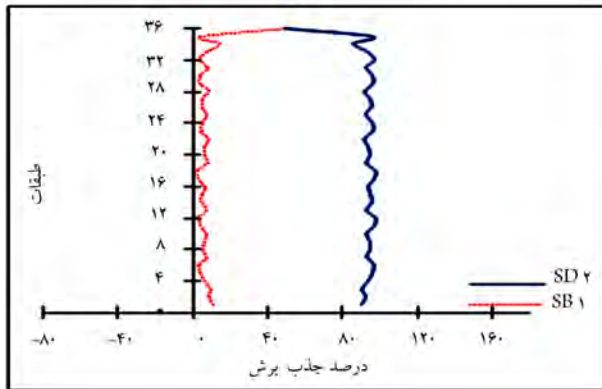
(الف)



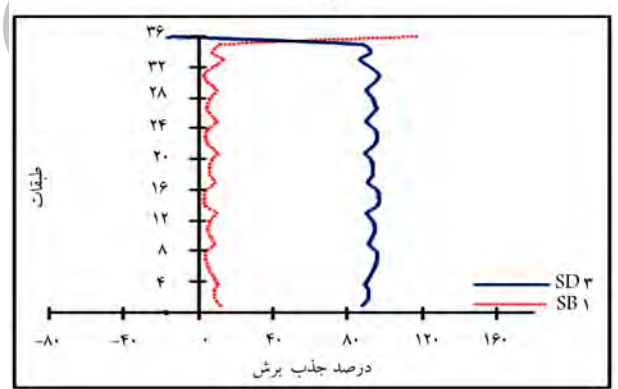
(ب)



(ب)



(ج)



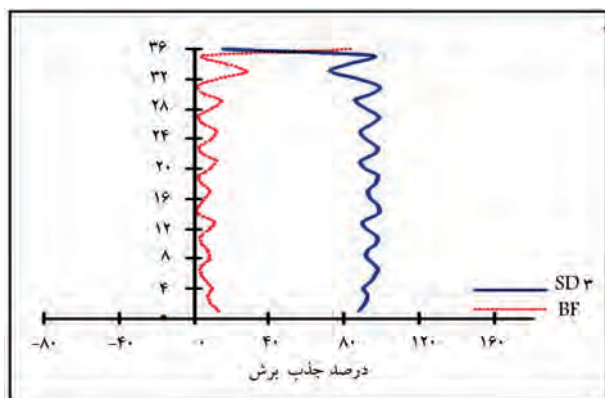
(ج)

شکل ۵. درصد جذب برش سازی  $60/95^\circ$  با هسته‌ی مهاربندی.

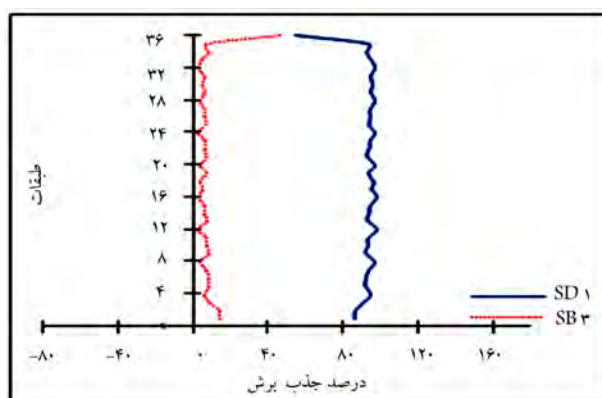
شکل ۴. درصد جذب برش سازی  $67/38^\circ$  با هسته‌ی مهاربندی.

و اعضاء قطری، به‌ازاء زاویه‌ی  $35^\circ$  به‌دست آمده است.<sup>[۲]</sup> در قاب‌های مهاربندی، بیشینه‌ی صلبیت خمشی توسط زاویه‌ی  $90^\circ$  ستون‌ها و بیشینه‌ی صلبیت برشی توسط زاویه‌ی  $35^\circ$  اعضاء مهاربندی تأمین می‌شود. با افزایش نسبت منظر یا به‌عبارتی لاغرتر شدن سازه، مود خمشی بر آن حاکم می‌شود؛ لذا در سازه‌های شبکه‌ی قطری با افزایش نسبت منظر، بیشینه‌ی صلبیت خمشی به‌ازاء زاویه‌های بزرگ‌تر حاصل می‌شود. در مقابل در سازه‌ها با نسبت منظر کم، سازه در مود برشی تغییر شکل می‌دهد و مطابق مطالعات انجام شده مشخص شده است که بیشینه‌ی صلبیت برشی در سازه‌های قاب مهاربندی شده به‌ازاء زاویه‌ی  $35^\circ$  حاصل می‌شود. در نتیجه، در سازه‌ی شبکه‌ی قطری با کاهش زاویه، بیشینه‌ی صلبیت برشی حاصل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقاومت برشی برای

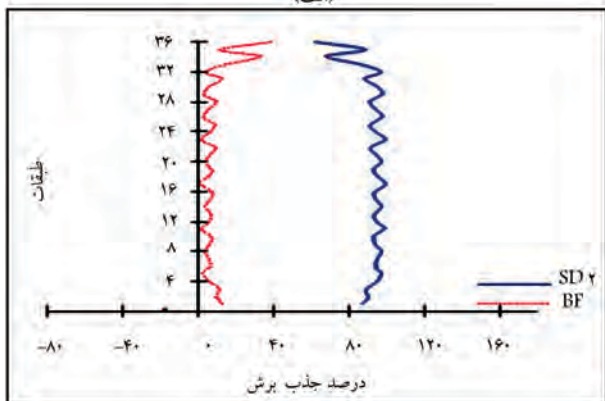
پیرامونی در مدل‌های SD۱ و SD۲، SD۳، در سازه‌ی سیستم شبکه‌ی قطری با هسته‌ی قاب خمشی داخلی، هسته‌ی داخلی در طبقات بالای سازه که میزان برش نسبتاً کم است، مشارکت می‌کند و هسته‌ی شبکه‌ی قطری پیرامونی، درصد قابل ملاحظه‌ی از برش را تحمل می‌کند. طبق نتایج تحلیل‌ها، در سازه‌های سیستم شبکه‌ی قطری با هسته‌ی داخلی، اثر مودهای بالایی منجر به کاهش سختی برشی سیستم شبکه‌ی قطری در طبقه‌ی آخر می‌شود. قابل ذکر است که نتایج ارائه شده برای سازه‌ها با نسبت منظر (نسبت ارتفاع به عرض  $3/6$ ) است و برای سازه‌ها با نسبت منظر پلان متفاوت، نیاز به مطالعات بیشتری دارد. بیشینه‌ی صلبیت برشی در قاب‌های مهاربندی متداول متشکل از ستون‌های قائم



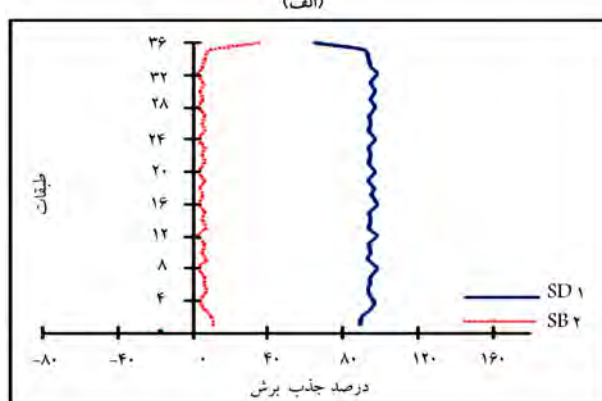
(الف)



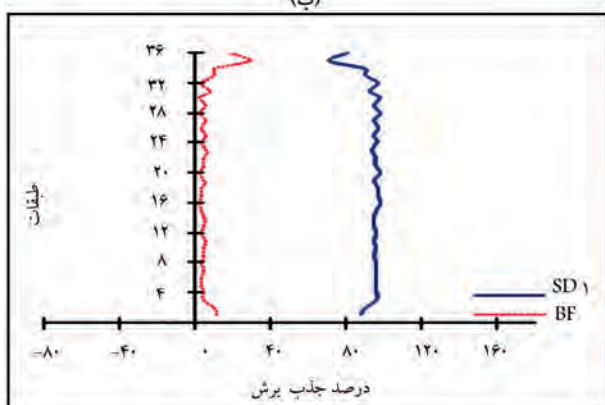
(الف)



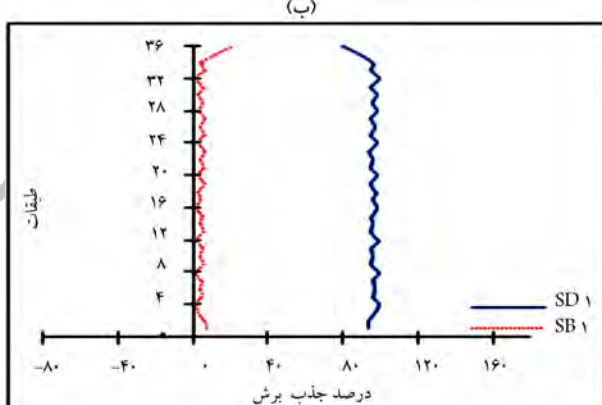
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۷. درصد جذب برش سازی شبکه‌ی قطری با هسته‌ی قاب خمشی داخلی.

آخر، مقدار برش جذب شده توسط هسته‌ی پیرامونی کاهش می‌یابد. بدین منظور در سازه‌ها با زاویه‌ی مختلف، مهاربندهای داخلی طبقه‌ی ۳۶م حذف شده‌اند. در نهایت مشاهده شده است که در سازه‌های شبکه‌ی قطری با حذف مهاربندهای طبقه‌ی ۳۶م، برش جذب شده‌ی هسته‌ی پیرامونی در طبقه‌ی آخر تقریباً به بیش از ۸۰٪ رسیده است. نتایج حاصل در شکل ۹، برای سازه‌های با زاویه‌های مختلف برای هسته‌ی مهاربندی با سطح مقطع ثابت نشان داده شده است.

#### ۴.۴. جابه‌جایی جانبی

تغییر زاویه‌ی اعضاء شبکه‌ی قطری، نقش کلیدی در سازه‌های با سیستم شبکه‌ی قطری دارد. جابه‌جایی جانبی سازه‌های مدل با زاویه‌ی مختلف به ازاء سطح مقطع

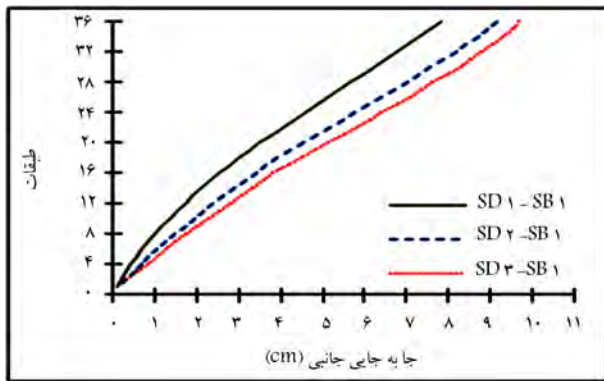
شکل ۶. درصد جذب برش سازی ۵۰/۱۹° با هسته‌ی مهاربندی.

زاویه‌ی ۵۰/۱۹° به دست آمده است. در شکل ۸، نقاطی که برش در آنها اتفاق افتاده است، محل تلاقی رئوس المان‌های شبکه‌ی قطری هستند.

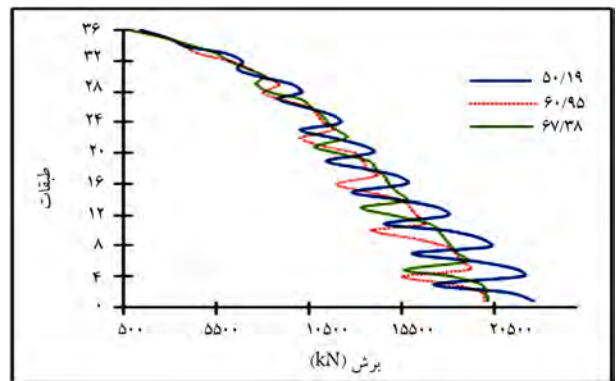
#### ۳.۴. تأثیر حذف مهاربندهای داخلی طبقه‌ی آخر در توزیع نیروی

##### جانبی

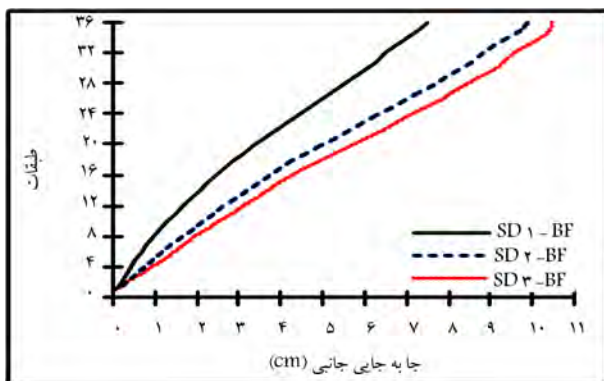
در سازه‌های با سیستم لوله در لوله، درصد بالایی از بار جانبی توسط قاب بیرونی و قسمتی از بار ثقلی توسط سیستم لوله‌ی بیرونی و قسمتی از آن توسط قاب داخلی تحمل می‌شود. سیستم شبکه‌ی قطری، ظرفیت بالایی در تحمل برش طبقات دارد. برش در سازه با سیستم شبکه‌ی قطری توسط عملکرد محوری المان‌های مورب تحمل می‌شود. مشاهده شده است که در سازه با سیستم شبکه‌ی قطری در طبقه‌ی



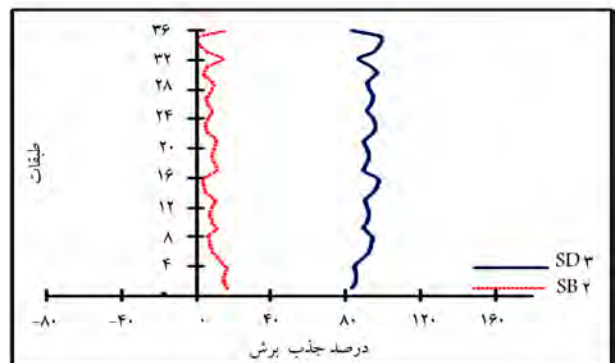
شکل ۱۰. جابه‌جایی جانبی سازه شبکه‌ی قطری با هسته‌ی مهاربندی.



شکل ۸. برش سازه‌ی شبکه‌ی قطری با هسته‌ی قاب خمشی داخلی.

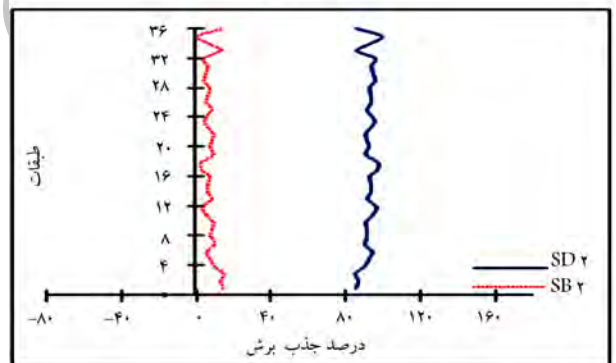


شکل ۱۱. جابه‌جایی جانبی سازه‌ی شبکه‌ی قطری با هسته‌ی قاب خمشی.



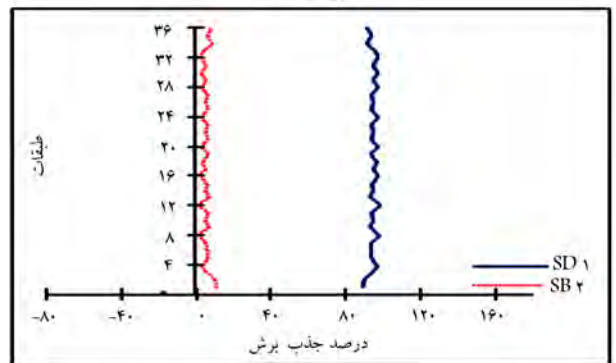
درصد جذب برش

الف)  $67/38^\circ$



درصد جذب برش

ب)  $60/95^\circ$



درصد جذب برش

ج)  $50/19^\circ$

شکل ۹. درصد جذب برش سازه‌ی لوله در لوله با زاویه‌های مختلف اعضای قطری به ازاء مهاربند داخلی با سطح مقطع ثابت.

ثابت هسته‌ی مهاربندی داخلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشینه اختلاف تغییر مکان سازه‌های SD1-SB1 و SD2-SB1 در تراز بام ۲۷٪ است، در حالی که این مقدار برای دو سازه SD1-SB1 و SD3-SB1 در حدود ۲۵٪ است. در شکل ۱۱، جابه‌جایی جانبی سازه‌ها با سیستم شبکه‌ی قطری پیرامونی و هسته‌ی قاب خمشی داخلی نشان داده شده است. مشابه حالت قبل، بیشینه اختلاف تغییر مکان سازه‌های SD1-BF و SD2-BF در تراز بام ۳۲٪ است ولی این مقدار برای دو سازه SD1-BF و SD3-BF در حدود ۴۰٪ است. بر طبق نتایج حاصل در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، کاهش زاویه‌ی اعضای شبکه‌ی قطری از  $67/38^\circ$  به  $50/19^\circ$  باعث افزایش سختی و صلبيت جانبی سازه و یا به عبارتی کاهش جابه‌جایی جانبی سازه شده است.

تغییر مکان جانبی طبقه‌ی آخر نسبت به ارتفاع کل سازه، به ازاء زاویه‌های  $50/19^\circ$ ،  $60/95^\circ$  و  $67/38^\circ$  در سازه‌های سیستم شبکه‌ی قطری همراه با قاب خمشی به ترتیب  $0.57\%$ ،  $0.76\%$  و  $0.8\%$  بوده است. لذا، سازه با نسبت منظر (نسبت ارتفاع به عرض سازه)  $3/6$  و زاویه‌ی  $50/19^\circ$ ، تغییر مکان جانبی کمتر و سختی بیشتر نسبت به دو سازه با زاویه‌های  $60/95^\circ$  و  $67/38^\circ$  درجه دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی اندرکنش سیستم شبکه‌ی قطری به‌عنوان هسته‌ی بیرونی به همراه یک هسته‌ی داخلی تحت بار لرزه‌ی بوده است. به‌منظور ارزیابی رفتار ترکیبی سازه‌ها تحت بار لرزه‌ی از آنالیز دینامیکی طیفی خطی استفاده شده

داخلی در طبقه‌ی آخر، برش جذب شده‌ی هسته‌ی پیرامونی در طبقه‌ی ۳۶م به بیش از ۸٪ رسیده است. در نتیجه، هسته‌ی داخلی نقش مؤثری در باربری ثقلی و شبکه‌ی قطری در باربری جانبی از خود نشان داده است.

### تقدیر و تشکر

همکاری ارزشمند جناب آقای دکتر پیمان همامی، عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه خوارزمی در انجام پژوهش حاضر، شایسته‌ی تقدیر و تشکر است.

است. نتایج به دست آمده از عملکرد ترکیبی سیستم شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی داخلی با عملکرد ترکیبی سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و قاب مهاربندی مقایسه شده است.

بر طبق نتایج آنالیز، در سیستم ترکیبی شبکه‌ی قطری همراه با هسته‌ی قاب خمشی و قاب مهاربندی در طبقات آخر، هسته‌ی داخلی به جای سیستم شبکه‌ی قطری بار جانبی را تحمل می‌کند. از آنجا که سازه‌ی سیستم شبکه‌ی قطری صلبیت برشی بالایی به دلیل عملکرد محوری المان‌های قطری دارد، در سازه‌های شبکه‌ی قطری با زاویه‌ی  $۵۰/۱۹^\circ$ ،  $۶۰/۹۵^\circ$  و  $۶۷/۳۸^\circ$  با حذف مهاربندهای هسته‌ی

### پانوشتها

1. diagrid system
2. drift
3. uplift

### منابع (References)

1. Leonard, J. "Investigation of shear lag effect in high-rise buildings with diagrid system", MSc Thesis, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (2007).
2. Moon, K.S., Connor, J.J. and Fernandez, J.E. "Diagrid structural systems for tall buildings: Characteristics and methodology for preliminary design", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **16**(2), pp. 205-230 (2007).
3. Kim, J. and Lee, Y. "Seismic performance evaluation of diagrid systems Buildings", *The Structural Design of Tall and Special buildings*, **21**(10), pp. 736-749 (2010).
4. Moon, K.S. "Sustainable structural engineering strategies for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **17**(5), pp. 895-914 (2008).
5. Zhang, C., Zhao, F. and Liu, Y. "Diagrid tube structures composed of straight diagonals with gradually varying angles", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(4), pp. 283-295 (2012).
6. Kim, J., Park, J., Shin, S. and Min, K. "Seismic performance of tubular structures with buckling restrained braces", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **18**(4), pp. 351-370 (2009).
7. Teng, J., Guo, W., Rong, B. and Li, Z. "Seismic performance research of High-rise diagrid Tube-core tube structures", *Advanced Materials Research*, **163-167**, pp. 2005-2012 (2011).
8. Mashhadiali, N. and Kheyroddin, A. "Proposing the hexagrid system as a new structural system for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **22**(17), pp. 1310-1329 (2012).
9. Hemmati, A. and Kheyroddin, A. "Behavior of large-scale bracing system in tall buildings subjected to earthquake loads", *Journal of Civil Engineering and Management*, **19**(2), pp. 206-216 (2011).
10. Kheyroddin, A. and Aramesh, S., *Lateral Resisting Systems in Tall Buildings*, Semnan university (2012).
11. Stafford Smith, B. and Coull, A., *Tall Building Structures: Analysis and Design*, New York, John Wiley & Sons, 537 p. (1991).
12. INBC (Iranian National Building Code)., "Design Loads for Buildings", Part 6, INBC (National Building Regulations Office), Tehran, Iran (2010).
13. BHRC., *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800-05, 3rd. ed., Tehran, Building and Housing Research Center (2005).
14. INBC (Iranian National Building Code)., *Design and Construction of Steel Buildings*, Part 10, INBC (National Building Regulations Office), Tehran, Iran, (2013).
15. SAP2000., *Structural Analysis Program*, Computers and Structures: Berkeley, CA (2009).