

بهینه سازی مدل خرابایی روش بست و بند در دیوارهای برشی بتن مسلح با بازشو به روش همگن کامل

مهدی مرادی^۱، حسام طایفه رحیمی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قم، قم، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، موسسه ی پویش، قم، ایران

چکیده

در ساختمان‌ها معمولاً به دلیل مسائل معماری و تأسیساتی ممکن است در دیوارهای برشی نیاز به تعبیه بازشو باشد. بازشدگی در دیوار برشی بر رفتار لرزه‌ای آن تأثیر می‌گذارد. برای طراحی مناطق ناپیوسته‌ی سازه‌ای مثل دیوارهای برشی با بازشو، فرض اصلی تئوری خمش قابل اعمال نیست و روش‌های معمول آئین‌نامه‌ای نمی‌توانند برای آن‌ها استفاده شوند. برای طراحی چنین سازه‌هایی روش بست و بند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در طراحی سازه‌ها به روش بست و بند انتخاب مدلی خرابایی منطبق بر نواحی واقعی تنش یکی از مشکلات اصلی است. در این پژوهش برای رفع این مشکل روش بهینه‌سازی همگن کامل برای بدست آوردن مدل خرابایی بررسی شد. برای بررسی این روش بهینه‌سازی پنج نمونه طراحی و مدل‌سازی شدند. سپس نتایج این نمونه‌ها با نتایج دیگر پژوهش‌های مشابه مقایسه شد. روش بهینه‌سازی همگن کامل توانست به خوبی به حداقل‌سازی مقدار فولاد مصرفی در دیوارهای برشی با بازشو کمک کند. نمونه‌های طراحی شده بر اساس این روش توانستند با تحمل بار نهایی قابل قبول و بیشتر از بار طراحی، حداقل وزن میلگرد را نسبت به دیگر نمونه‌های برگرفته از مطالعات گذشته داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: بتن مسلح، دیوار برشی، بازشو، بهینه‌سازی همگن کامل

۱. مقدمه

در دهه اخیر حدود ۹۵۰ زمین لرزه در ایران رخ داده است که به طور متوسط هر سال یک زلزله ۶ ریشتری و هر ۱۰ سال یک زلزله ۷ ریشتری اتفاق می افتد که باعث شده ایران از لحاظ کشته شدگان در رتبه چهارم دنیا قرار گیرد [۱]. در این شرایط بررسی و مطالعات روش هایی به منظور تأمین نیازهای فنی و اقتصادی سازه ها ناشی از زمین لرزه بیش از پیش ضروری به نظر می رسد. برای مقاوم سازی لرزه ای سازه ها تاکنون سیستم های سازه ای مختلفی پیشنهاد و به کار گرفته شده است. استفاده از سیستم دیوار برشی در دهه های اخیر مورد توجه محققین و صنعتگران قرار گرفته است. یکی از معایب دیوارهای برشی ایجاد محدودیت های معماری و تاسیساتی است. بر این اساس غالباً برای آسان کردن اجرای تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و یا حتی در و پنجره برای مقاصد معماری در این دیوارها، بازشو در نظر گرفته می شود. بازشدگی در دیوارهای برشی به شدت بر رفتار لرزه ای آن ها تأثیر می گذارد. دیوارهای برشی با بازشو را می توان جزء اعضای بتنی ناپیوسته طبقه بندی نمود [۲]. این اعضا توزیع تنش پیچیده ای دارند و تحلیل و طراحی آن ها با استفاده از روش های معمول آئین نامه ای امکان پذیر نیست [۳-۲]. کلوانی و شیرازی [۴] برای بررسی اثر ابعاد بازشو، سه سازه با ۶، ۹ و ۱۸ طبقه را در نرم افزار SAP مدل سازی کردند. ابعاد بازشوها در نظر گرفته شده توسط آن ها به گونه ای بود که سیستم دیوار برشی به شکل سیستم دیوار و تیر همبند بود. بر اساس مطالعات آن ها با افزایش میزان بازشو سختی سازه کاهش و از طرفی شکل پذیری دیوار برشی و تیرهای همبند به علت تشکیل مفاصل پلاستیک متعدد افزایش یافت. اگرچه تشکیل تیرهای همبند حالت خاصی از دیوارهای برشی با بازشو است. قادری و بهروش [۵] با مدل سازی دیوار برشی بتنی با درصد مختلف بازشو به کل دیوار در نرم افزار اجزای محدود Ansys انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی هیستریزیس به بررسی عملکرد رفت و برگشتی سیستم قاب بتنی با دیوار برشی بتنی پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که با افزایش درصد بازشو قدرت سیستم و سختی سکانتی سیستم در استهالک انرژی در بارگذاری های چرخه ای کاهش می یابد. با این حال مطالعات آن ها شامل ارائه ی روشی برای طراحی این اعضا نبود.

برای تحلیل و طراحی دیوارهای برشی با بازشو می توان روش بست و بند^۱ را توسعه داد. طراحی به روش بست و بند بر این فرض استوار است که مناطق ناپیوسته (مناطق با الگوی تنش آشفته که فرض اصلی تئوری خمش در آن ها قابل اعمال نیست) در سازه های بتنی با استفاده از خرپای فرضی متشکل از اعضای فشاری (بست) و اعضای کششی (بند)، قابل تحلیل و طراحی می شوند [۶]. برای طراحی اعضای بتنی به روش بست و بند می توان از دستورالعمل های آیین نامه ای [۶] ACI-۳۱۸ استفاده کرد. اما تحقیقات گذشته نشان داده است که مدل خرپایی روش بست و بند باید منطبق بر نواحی تنش مربوط به خود قرار گیرند تا مقاومت مناسبی را در سازه های بتنی فراهم کنند [۷]. در صورت عدم انطباق مناسب مدل خرپایی بر نواحی تنش سازه، روش بست و بند در طراحی آن با شکست روبرو خواهد شد. برای حل این معضل مطالعات متعددی صورت گرفت. استفاده از روش ناحیه تنش، روش اجزای محدود الاستیک و بهینه سازی محل قرارگیری اعضای خرپایی را می توان به عنوان بخشی از این پژوهش ها نام برد [۹-۲، ۷]. امروزه در بسیاری از مراجع، از روش های بهینه سازی توپولوژی پیوسته و گسسته برای تعیین خودکار مدل خرپایی استفاده شده است [۱۱-۳، ۱۰]. مرشد و همکاران [۳] با هدف بهینه سازی طراحی دیوار برشی های با بازشو بر اساس روش بست و بند سه دیوار برشی با شکل هندسی متفاوت را انتخاب و طراحی کردند. آن ها برای دستیابی به مدل خرپایی بهینه از تابع هدف کمینه سازی انرژی کرنشی الاستیک استفاده کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که با استفاده از مدل خرپایی بهینه می توان به بیشترین نسبت مقاومت نهایی به وزن فولاد تسلیح در مقایسه با دیگر مدل های موجود رسید. هرنز و همکاران [۱۰] برای اصلاح روش بست و بند از روش بهینه سازی همگن کامل^۲ استفاده کردند. این روش در سازه های مرکب از دو ماده و در حالت الاستیک خطی کاربرد دارد. در این روش ضمن تخمین شکل قرارگیری مصالح، سختی سازه به حداکثر می رسد [۱۰]. در ادامه این روش بهینه سازی در مطالعات هرنز و همکاران [۱۰] و مرادی و اصفهانی

^۱ Strut-and-Tie Method (STM)^۲ Full Homogenization optimization method (FH)

[۲] روی تیرهای عمیق با بازشو استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از این مدل می‌توان سختی سازه را به حداکثر رساند. همچنین نسبت بار نهایی به وزن تقویت در مدل‌های آن‌ها نسبت به روش‌های دیگر بیشترین مقدار بود.

با توجه به نتایج امید بخش استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل در این پژوهش نیز از این روش برای طراحی بهینه‌ی دیوارهای برشی با بازشو استفاده می‌شود. در این راستا برای ارزیابی ترکیب روش بهینه‌سازی همگن کامل و روش بست و بند، پنج نمونه‌ها از ادبیات موضوع انتخاب و بر اساس این روش طراحی شدند. سپس این نمونه‌ها در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شدند. به منظور ارزیابی توانایی روش بهینه‌سازی همگن کامل در طراحی دیوارهای برشی با بازشو، نتایج نمونه‌های بهینه با دیگر نمونه‌ها طراحی شده توسط دیگر پژوهشگران مقایسه شدند.

۲. بهینه‌سازی پیکره‌ی سازه با استفاده از روش بهینه‌سازی همگن کامل (FH)

روش FH با فرض حالت الاستیک یک سازه مرکب از دو ماده سخت و نرم را در نظر می‌گیرد. در این روش با تخمین شکل قرارگیری این دو ماده، سختی سازه به حداکثر می‌رسد [۱۰]. با در نظر گرفتن چهارچوب STM و به‌کارگیری این روش بهینه‌سازی می‌توان محل قرارگیری دقیق خرابی فرضی را مشخص کرد که نتایجاً موجب به حداقل رسانی تقویت مورد نیاز در سازه خواهد شد.

در این روش کار ناشی از بارگذاری با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۰]. در این رابطه f و u به ترتیب نیرو، دامنه‌ی نمونه و تغییر مکان تحت بارگذاری است.

$$W = \int_{\Gamma} f \cdot u \, ds \quad (1)$$

این تابع در واقع تابع هدف این روش است و با کمینه کردن این تابع با یک آرایش خاص تقویت در بین تمام حالات ممکن می‌توان به بیشترین سختی دست یافت. در روش بهینه‌سازی همگن کامل، سازه به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود. بدین معنا که یک ماده با سختی زیاد و یک ماده با سختی کم در نظر گرفته می‌شود که به خوبی با هم ترکیب شدند. سازه به میکرو سازه‌هایی تقسیم و چگالی بهینه‌ی مصالح سخت در هر میکرو سازه محاسبه می‌شود. شکل پاسخ حاصل از بهینه‌سازی به صورت یک ماده‌ی مرکب با نسبت ترکیب متفاوت از ماده سخت و نرم است. طراحی سازه بر اساس این شکل پاسخ بسیار هزینه بر خواهد بود. بنابراین مقدار چگالی مصالح اصلاح می‌شود تا مقداری بین ۰ و ۱ داشته باشند. برای این کار از مصالح ساختمانی ایزوتروپ با اعمال تابع جریمه استفاده و شکل پاسخ اصلاح می‌شود. به طوری که چگالی ۱ به معنای وجود و چگالی صفر به معنای عدم وجود مصالح سخت بیان می‌شود. شکل پاسخ حاصل، پاسخ نهایی مسئله خواهد بود [۱۰].

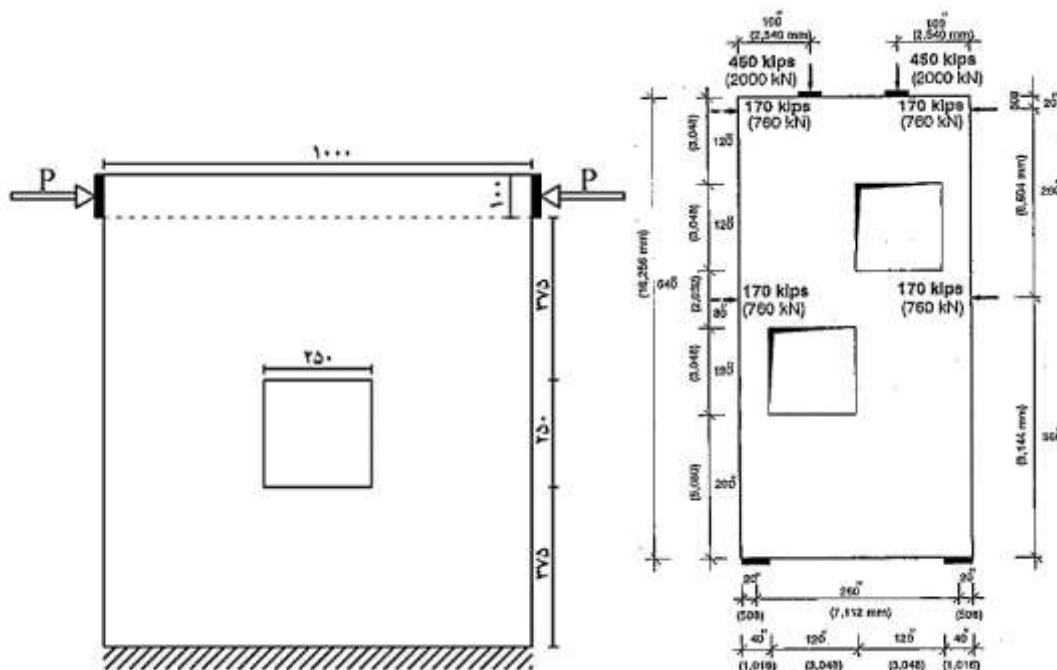
برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌توان به جای پیاده سازی کامل روابط از نرم افزار رایگان Free FEM استفاده کرد [۱۲]. برای استفاده از این نرم افزار اجزای محدود باید مسئله بهینه‌سازی شامل روابط بهینه‌سازی و مشخصات سازه از طریق یک کد ++C وارد آن شود. مرادی و اصفهانی [۲] کد مناسبی برای مدل‌سازی بر اساس این روش ارائه کردند. در این پژوهش نیز از همان کد برای نمونه‌های دیوار برشی بتن مسلح استفاده می‌شود.

۳. طراحی نمونه‌ها

۳.۱. معرفی نمونه‌ها

در این پژوهش دو دیوار برشی با بازشو از ادبیات موضوع انتخاب و برای ارزیابی روش بهینه‌سازی بررسی شدند. دیوار برشی اول، یک دیوار برشی با یک بازشوی میانی است. این دیوار برشی در پژوهش‌های مرشد و همکاران [۳] بررسی شد. شکل هندسی این دیوار در شکل ۱-الف قابل مشاهده است. در این دیوار از بتن با ضریب پواسن 0.2 ، بتن با مقاومت فشاری 25 MPa و مقاومت کششی فولاد برابر با 400 MPa در نظر گرفته شده است [۳]. همچنین ضخامت نمونه برابر با 80

میلیمتر و بار طراحی آن ۸۰ کیلونیوتن است. این نمونه توسط مرشد و همکاران به یک روش بهینه سازی و روش قید ساخت طراحی و مدل سازی شد. بنابراین می تواند معیار مناسبی برای ارزیابی نتایج این پژوهش باشد. لازم به تذکر است که این دیوار متقارن است. بنابراین بار گذاری لرزه ای در جهت رفت و برگشت برای آن تفاوتی ندارد. بر این اساس مطابق جدول ۱، تنها یک نمونه بر اساس این دیوار به روش FH طراحی و مدل سازی می شود. برای ارزیابی نتایج حاصل نیز از نتایج موجود در ادبیات استفاده می شود.



(ب) دیوار برشی با دو بازشوی نامتقارن [۱۴]

(الف) دیوار برشی با یک بازشوی میانی [۳]

(اندازه ها به اینچ و داخل پرانتز به میلی متر هستند)

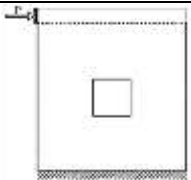
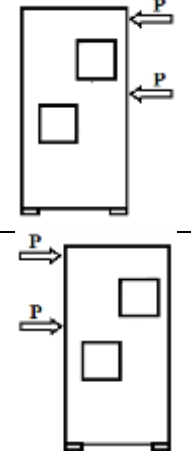
(اندازه ها به میلی متر هستند)

شکل ۱ - دیوار برشی های استفاده شده در این پژوهش

در بسیاری از پژوهش های مشابه دیوارهای برشی با بازشو تنها تحت بار جانبی یک طبقه قرار دارند [۱۳، ۳]. با توجه به بررسی های نویسنده بررسی و طراحی بر اساس روش های بهینه سازی بر روی دیوارهای برشی تحت بار جانبی چند گانه انجام نشده است. بنابراین هندسه دوم به گونه ای انتخاب شد که شامل این شرایط باشد. این هندسه یک دیوار برشی با دو بازشوی نامتقارن است (شکل ۱-ب). این دیوار یکی از مثال های اصلی ویژه نامه ای معرفی روش STM در [۶] ACI-318 بود که توسط رینیک [۱۴] جمع آوری و چاپ شد. در این ویژه نامه دیوار برشی شکل ۱-ب تحت چهار نوع بارگذاری شامل، بار ثقلی، بار لرزه ای رفت، بار لرزه ای برگشت و ترکیب بارها توسط روش بست و بند طراحی شده است. اگرچه با توجه به اهداف این پژوهش این دیوار فقط تحت بار رفت و برگشت لرزه ای بررسی می شود. رینیک [۱۴] در طراحی خود ضخامت این دیوار را برابر ۴۰۵ میلی متر در نظر گرفت. همچنین مقاومت فشاری بتن ۲۶ MPa و مقاومت کششی فولاد نیز ۴۱۰ MPa در نظر گرفته شد. بار طراحی در جهت رفت و برگشت نیز دو بار ۷۶۰ kN بود که در شکل ۱-ب نمایش داده شده است.

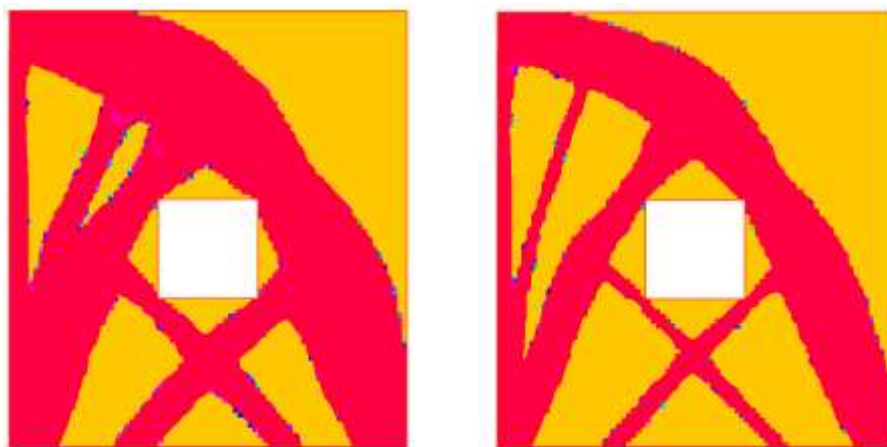
بر اساس هندسه ی دیوار برشی با بازشوی نامتقارن دو نمونه با استفاده از روش بهینه سازی همگن کامل برای بار لرزه ای رفت و برگشت طراحی و مدل سازی می شود. بر اساس بررسی های نویسنده، دیوار برشی با بازشوی نامتقارن در هیچ پژوهش مشابهی استفاده نشده است. بنابراین برای ارزیابی روشی پیشنهادی از دو نمونه طراحی شده بر اساس مدل های خرابایی رینیک [۱۴] برای بار لرزه ای رفت و برگشت استفاده می شوند. خلاصه ای از نمونه های استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- خلاصه مشخصات نمونه‌ها

نام نمونه	روش طراحی	هندسه‌ی نمونه	f_c (MPa)	f_y (MPa)	بار طراحی (kN)
۱HO	بهینه سازی همگن کامل		۲۵	۴۰۰	۸۰
۲HR	طرح خرپایی رینیک [۱۴]		۲۶	۴۱۰	۱۵۲۰
۲HOR	بهینه سازی همگن کامل				
۲HB	طرح خرپایی رینیک [۱۴]				
۲HOB	بهینه سازی همگن کامل				

۲.۳. تعیین شکل پاسخ بهینه بر اساس روش بهینه‌سازی همگن کامل (FH) و طراحی نمونه‌ها

هدف از این روش FH حداکثرسازی سختی سازه همراه با ثابت نگه داشتن مصالح سخت است. خروجی این روش توزیع فضایی ماده سخت است. در روش FH می‌توان چگالی ماده سخت را پیش از آغاز فرآیند تعیین کرد. در این بخش به منظور بررسی اثر این متغیر بر شکل پاسخ نهایی دو کسر حجمی ۰٫۴۵ و ۰٫۶ انتخاب شد. نتایج شکل پاسخ بهینه‌یابی شده برای نمونه‌ی ۱HO، در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور مقایسه نتایج بهینه‌یابی، شکل پاسخ بهینه‌ی روش انرژی الاستیک حداقل مرشد و همکاران [۳] نیز در شکل ۳ برای همین کسرهای حجمی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پایداری بیشتری در روش بهینه‌سازی همگن کامل در مقابل تغییرات کسرهای حجمی در مقابل روش انرژی الاستیک حداقل مشاهده می‌شود. این پایداری و عدم وابستگی پاسخ نشان دهنده‌ی برتری روش بهینه‌سازی همگن کامل است.



(ب) با کسر حجمی ۰/۶ ماده سخت

(الف) با کسر حجمی ۰/۴۵ ماده سخت

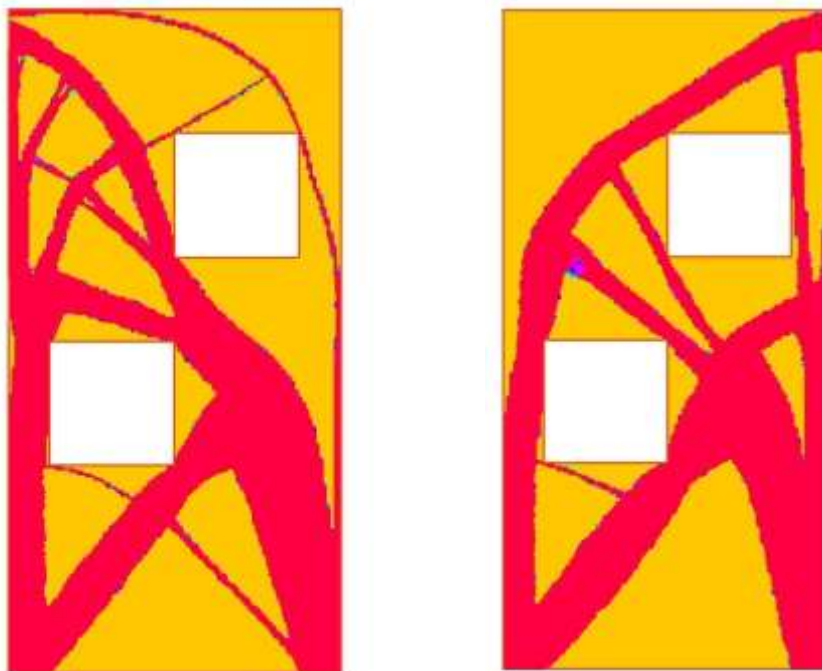
شکل ۲ - شکل پاسخ بهینه‌سازی برای نمونه‌ی ۱HO



(الف) با کسر حجمی ۰/۴۵ ماده سخت (ب) با کسر حجمی ۰/۶ ماده سخت

شکل ۳ - شکل پاسخ بهینه‌سازی برای نمونه‌ی ۱HO بر اساس مطالعات مرشد و همکاران [۳]

به موجب تشابه پاسخ بهینه‌سازی برای این نمونه، شکل متناظر با کسر حجمی ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. با توجه به عدم تغییرات قابل توجه شکل پاسخ بهینه‌سازی مطابق نتایج بخش قبل در نمونه‌های دیگر نیز کسر حجمی ماده سخت برابر با ۰/۴۵ فرض شد. بر این اساس، شکل پاسخ بهینه‌ی نمونه‌های ۲HOR و ۲HOB با این فرض مطابق با شکل ۴ به دست آمد.

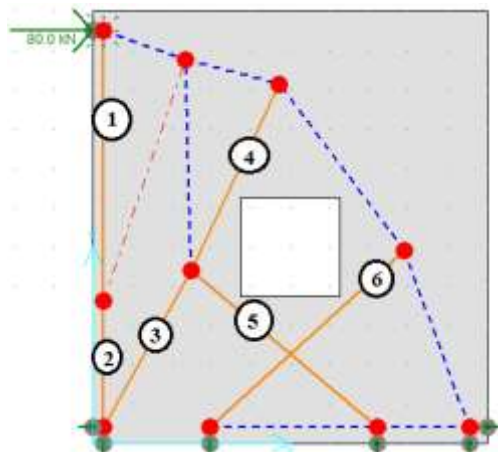


(الف) برای بار گذاری از راست به چپ (۲HOR) (ب) برای بار گذاری از چپ به راست (۲HOB)

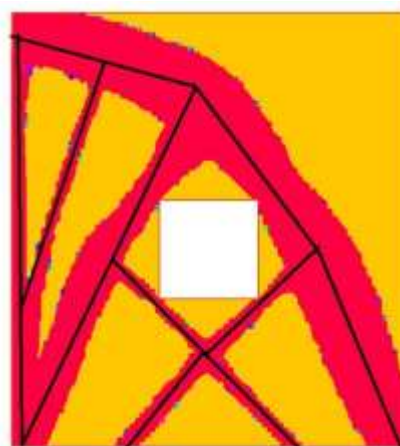
شکل ۴ - شکل پاسخ بهینه‌سازی برای دیوار برشی با دو بازشوی نامتقارن

با ساده سازی برخی از منحنی از خم به خطوط مستقیم از شکل پاسخ بهینه‌ی نمونه‌ها، مدل خرابایی اولیه حاصل می‌شود (شکل ۵-الف، ۶-الف و ۷-الف). برای طراحی نمونه‌ها به روش بست و بند از نرم افزار CAST استفاده شد [۱۶]. این نرم‌افزار بر مبنای طراحی دستی ارائه شده در پیوست A آیین نامه [۶] ACI-۳۱۸ شکل گرفته است و فقط به ساده‌سازی محاسبات کمک می‌کند. نمونه‌های دیوار برشی با توجه به طرح‌های خرابایی بهینه و مشخصات ارائه شده در بخش ۲-۱ در نرم افزار CAST طراحی و مدل‌سازی شدند. فرض شد که برای کلیه‌ی بست‌ها (اعضای فشاری) میلگرد لازم برای بست بطریقی شکل مطابق مقررات آیین‌نامه‌ی [۶] ACI-۳۱۸ تامین شده باشد. بنابراین در نمونه ۱HO یک شبکه میلگرد متعامد با قطر

۶ میلی متر و فاصله‌ی ۱۶۰ میلی متر برای کل نمونه در نظر گرفته شد. همچنین برای نمونه‌های ۲HOR و ۲HOB نیز از یک شبکه میلگرد متعامد با قطر ۱۴ میلی متر و فاصله‌ی ۱۷۶ میلی متر برای تامین میلگردهای بست‌های بطری شکل در نظر گرفته شد. در طراحی این نمونه‌ها سعی شد از میلگردها با سایز استاندارد استفاده شود. شکل نمونه‌ها مدل سازی شده در نرم افزار CAST در شکل‌های ۵-ب، ۶-ب و ۷-ب نمایش داده شده است. در این شکل‌ها بست‌ها (اعضای فشاری) با خط چین و بندها (اعضای کششی) با خطوط توپر نمایش داده شدند. به منظور ارائه‌ی نتایج طراحی و مشخصات میلگرد گذاری نمونه‌ها، اعضای کششی در شکل‌های ۵-ب، ۶-ب و ۷-ب کد گذاری شدند و نتایج متناظر آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



(ب) آرایش میلگردهای پس از طراحی در CAST

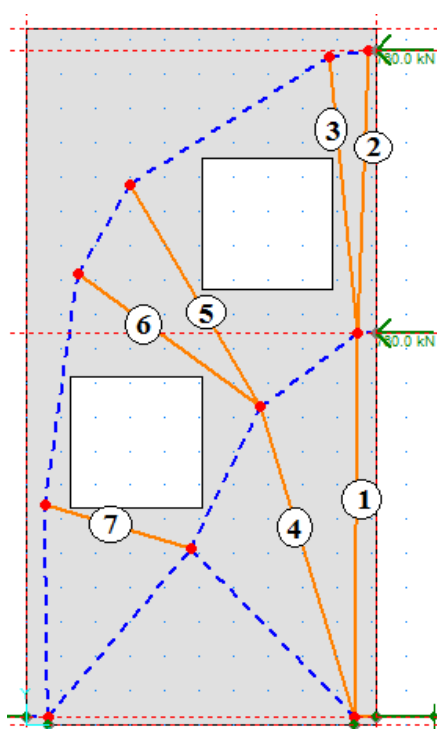


(الف) طرح خرابایی اولیه

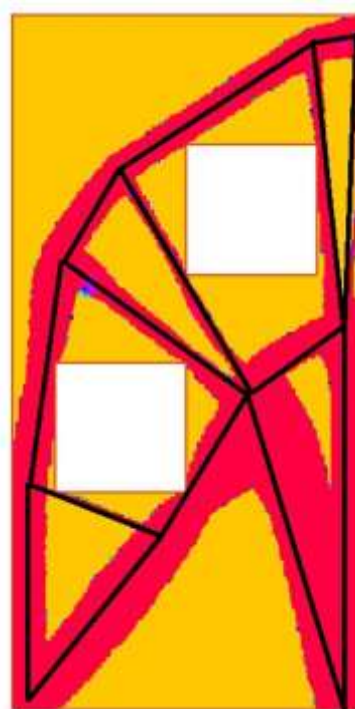
شکل ۵ - طرح خرابایی بست و بند برای نمونه‌ی ۱HO

جدول ۲- مشخصات و خلاصه نتایج طراحی نمونه‌های بهینه سازی شده

نام نمونه	شماره عضو	نیرو موجود (kN)	نیرو مقاوم تامین شده (kN)	فولاد مصرفی
۱HO	۱	۲۸/۲	۲۹/۴	۱Φ۱۰
	۲	۲۸/۲	۲۹/۴	۱Φ۱۰
	۳	۵۱/۶	۵۸/۱	۱Φ۱۴
	۴	۵۸/۱	۵۸/۱	۱Φ۱۴
	۵	۰	۰	-
	۶	۲۸/۳	۲۹/۴	۱Φ۱۰
۲HOR	۱	۱۰۸۴/۱	۱۱۳۲/۴	۶Φ۲۵
	۲	۱۲۵/۶	۱۲۰/۸	۱Φ۲۰
	۳	۳۴۸/۲	۳۷۷/۵	۲Φ۲۵
	۴	۱۸۲۴/۷	۱۸۸۷/۳	۱۰Φ۲۵
	۵	۴۵۱/۱	۴۳۶/۷	۲Φ۲۵ + ۱Φ۱۴
	۶	۴۲۷/۵	۴۳۶/۷	۲Φ۲۵ + ۱Φ۱۴
	۷	۱۸۰/۹	۱۸۸/۷	۱Φ۲۵
۲HOB	۱	۱۲۹۶	۱۳۲۱	۷Φ۲۵
	۲	۱۲۹۶	۱۳۲۱	۷Φ۲۰
	۳	۶۲۹	۶۴۳	۳Φ۲۵ + ۱Φ۱۶
	۴	۱۵۲	۱۸۹	۱Φ۲۵
	۵	۵۷۳	۶۱۰	۳Φ۲۵ + ۱Φ۱۲
	۶	۳۷۸	۳۷۸	۲Φ۲۵
	۷	۲۱۸	۲۳۲	۱Φ۲۵ + ۱Φ۱۲
	۸	۴۱۰	۴۲۱	۲Φ۲۵ + ۱Φ۱۲
	۹	۳۱۷	۳۷۸	۲Φ۲۵
	۱۰	۱۷۰۶	۱۶۹۹	۹Φ۲۵
	۱۱	۹۶۴	۹۴۴	۵Φ۲۵

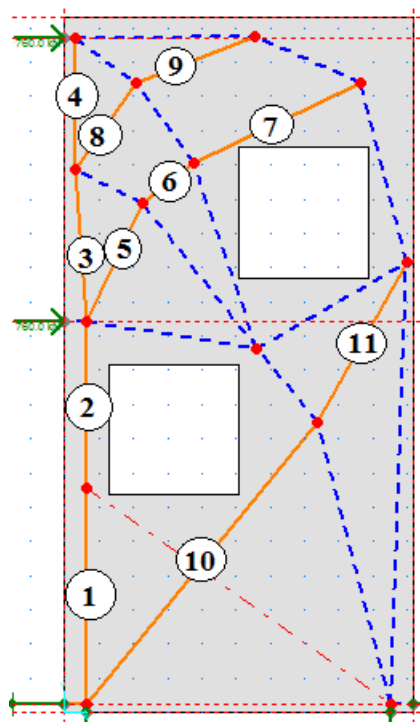


(ب) آرایش میلگردهای پس از طراحی در CAST

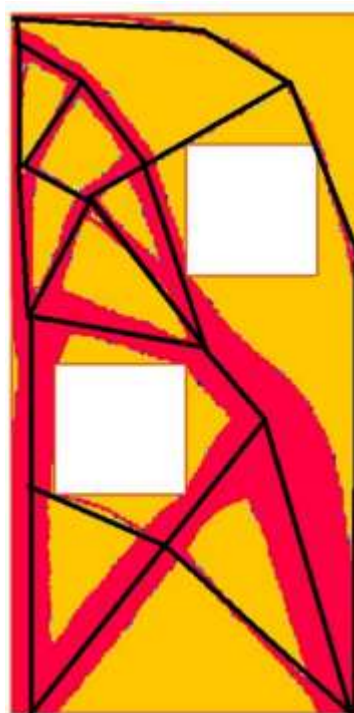


(الف) طرح خرابایی اولیه

شکل ۶ - طرح خرابایی بست و بند برای نمونه ی ۲HOR



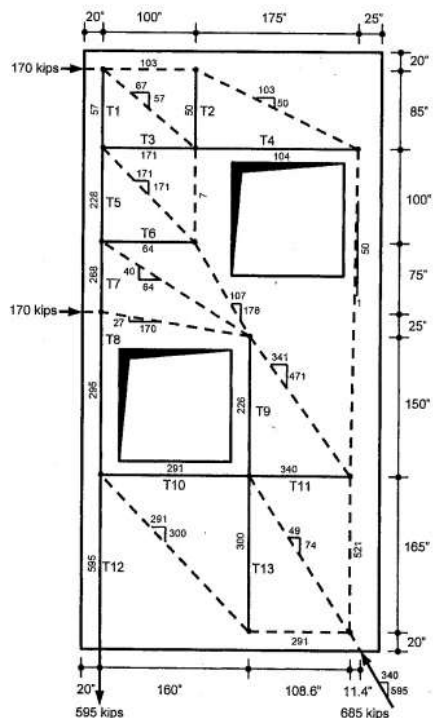
(ب) آرایش میلگردهای پس از طراحی در CAST



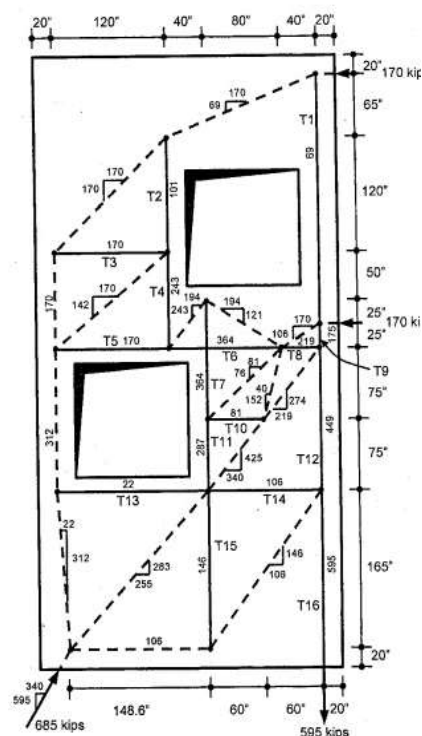
(الف) طرح خرابایی اولیه

شکل ۷ - طرح خرابایی بست و بند برای نمونه ی ۲HOB

همانطور که پیشتر گفته شد برای ارزیابی روش بهینه سازی FH در طراحی نمونه‌های دیوار برشی با دو بازشوی نامتقارن، دو نمونه ۲HR و ۲HB بر اساس طرح‌های خرپایی رینیک [۱۴] در نظر گرفته شد. این طرح‌های خرپایی در شکل ۸ نمایش داده شده است. دو نمونه ۲HR و ۲HB بر اساس این طرح‌های خرپایی در نرم افزار CAST طراحی شدند.



شکل ۸ (ب) نمونه‌ی ۲HB



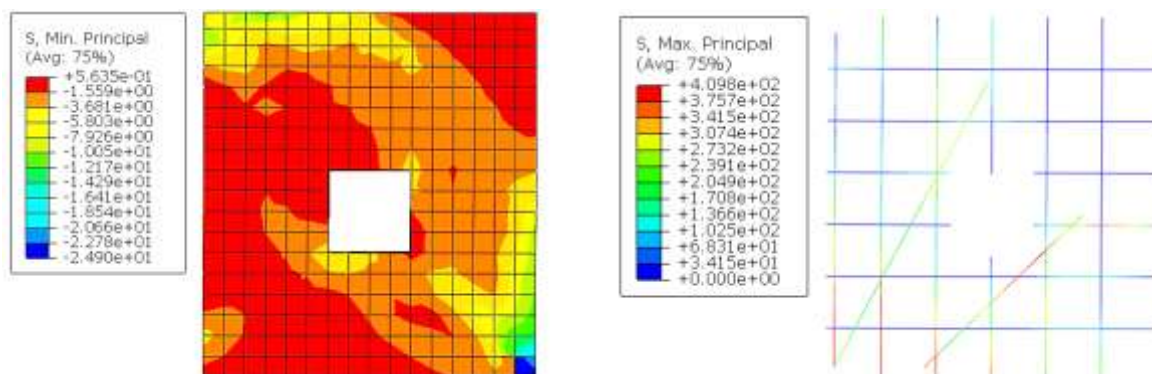
شکل ۸ (الف) نمونه‌ی ۲HR

شکل ۸ - طرح خرپایی اولیه رینیک برای دیوار برشی‌های با دو بازشو [۱۴]

۴. مدل‌سازی و مقایسه نتایج

مشابه با مطالعات مرشد و همکاران [۳] دیوارهای برشی به جای بار لرزه‌ای، تحت بار افزایشی یکنواخت تا گسیختگی قرار گرفتند. برای مدل‌سازی این آزمایش‌ها کل نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. نمونه‌ی ۱HO با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. مشخصات این نمونه در بخش ۳ و طرح میلگردهای آن در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. این نمونه توانست پس از تحمل ۸۹/۶ کیلونیوتن گسیخته شود. اگرچه گسیختگی آن ناگهانی بود و برای آن شاخه نزولی توسط نرم‌افزار ثبت نشد. شکل ۹-الف کانتور تنش حداکثر در میلگردهای این نمونه را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت که محل حداکثر تنش‌های کششی میلگردها پای دیوار برشی سمت چپ است. اگرچه میلگردهای گوشه‌ی بازشو نیز تحت تاثیر تنش کششی قابل توجهی هستند. با این حال بر اساس شکل توزیع تنش حداکثر و با توجه به رسیدن بتن در پای دیوار به مقاومت فشاری نهایی، دلیل شکست این دیوار تخریب فشاری بتن اعلام می‌شود (شکل ۱۰-ب). نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌ی ۱HO به همراه نمونه‌های بررسی شده در پژوهش مرشد و همکاران [۳] در جدول ۳ گردآوری شده است. کلیه نمونه‌ها باری بیش از بار طراحی را تحمل کردند. موفقیت بهینه‌سازی را می‌توان بر اساس عدد کارایی ارزیابی کرد. این عدد با تقسیم نیروی نهایی تحمل شده توسط نمونه بر وزن میلگردها محاسبه می‌شود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی ۱HO دارای بیشترین عدد کارایی است. بنابراین طراحی آن نسبت به دیگر نمونه‌ها بهینه -

ترین حالت است. همچنین جابه‌جایی این نمونه تحت بار طراحی در حد قابل قبولی قرار دارد که نشان دهنده شکل پذیری این نمونه در مقابل دیگر نمونه‌ها است.



(ب) کانتور تنش حداقل در بتن

(الف) کانتور تنش ماکزیمم در میلگردها

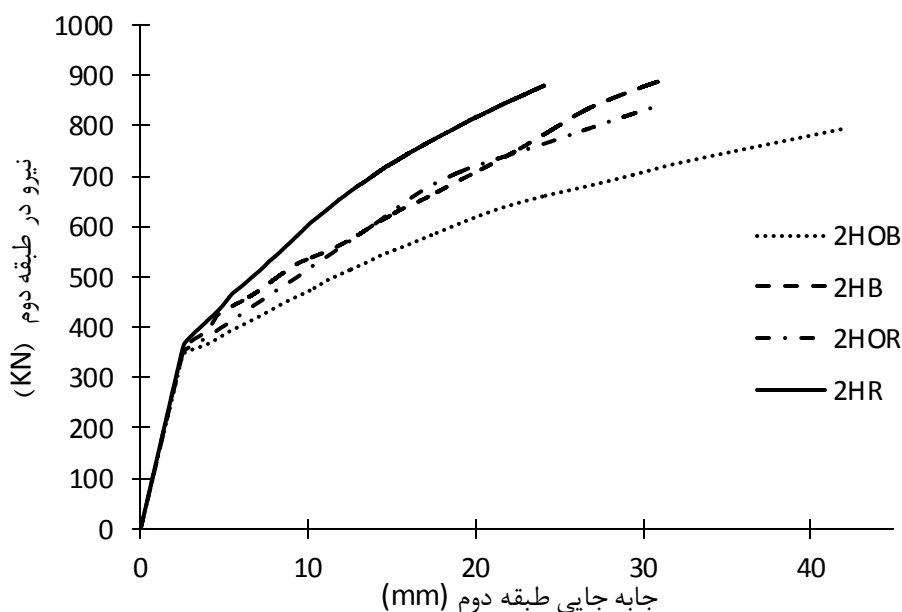
شکل ۹ - مدل‌سازی نمونه ۱HO

جدول ۳ - جمع بندی نتایج نمونه‌های دیوار برشی با یک بازشو

نمونه	بار طراحی (kN)	جابه‌جایی تحت بار طراحی (mm)	بار نهایی (kN)	وزن مش (kg)	وزن فولادها (kg)	وزن کل میلگردها (kg)	عدد کارایی ($\frac{\text{بار نهایی}}{\text{وزن میلگردها}}$)
۱HO	۸۰	۳/۳۳۴	۸۹/۷	۲/۱۶	۲/۱۸	۴/۳۴	۲۰/۶۶
مرشد و همکاران [۳] با کسر حجمی ۰/۶	۸۰	۲/۰۷۴	۹۹/۲۴	۲/۲۴	۳/۰۶	۵/۳	۱۸/۷۲
مرشد و همکاران [۳] با کسر حجمی ۰/۴۵	۸۰	۳/۵۴۳	۸۵/۵۴	۲/۲۴	۲/۸۶	۵/۱	۱۶/۷۷
مدل قید ساخت [۳]	۸۰	۲/۰۷۷	۹۱/۱۸	۲/۲۴	۴/۹۴	۷/۱۸	۱۲/۷۰

نمودار نیرو تغییر مکان نمونه‌های دیوار برشی با دو بازشو در شکل ۱۰ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های طراحی شده بر اساس روش بهینه‌سازی همگن کامل علیرغم تحمل بار کمتر نسبت به دیگر نمونه‌ها شکل‌پذیری بیشتری را نسبت به آن‌ها دارند. این شکل‌پذیری زیاد عاملی بسیار کارآمد در مقابل نیروهای لرزه‌ای است و باعث اتلاف انرژی لرزه‌ای می‌شود.

نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های دیوار برشی با دو بازشو در جدول ۴ گردآوری شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود کلیه نمونه‌ها باری بیش از بار طراحی را تحمل کردند. بار نهایی نمونه‌های طراحی شده بر اساس روش بهینه‌سازی همگن کامل نزدیک‌تر به بار طراحی بود. این خود نشانه‌ای بر طراحی بهینه این نمونه‌ها دارد. این نمونه‌ها حداقل میلگرد را برای طراحی نیاز داشتند. از طرفی دیگر این نمونه‌ها دارای عدد کارایی بیشتری هستند. اگرچه نمونه ۲HB عدد کارایی بهتری نسبت به نمونه متناظر بهینه خود دارد، با این حال در طراحی این نمونه میلگردهای بیشتری استفاده شده است. بنابراین نمونه بهینه پاسخ بهتری دارد. همچنین جابه‌جایی این نمونه‌ها تحت بار طراحی بیشتر از نمونه‌های دیگر هستند. بر این اساس نمونه‌های بهینه، شکل‌پذیری بالاتری را در این سطح بارگذاری دارند.



شکل ۱۰- نمودار نیرو جابجایی نمونه‌های دیوار برشی با دو بازشو

جدول ۴- جمع بندی نتایج نمونه‌های دیوار برشی با دو بازشو

نمونه	بار طراحی (kN)	جابجایی تحت بار طراحی (mm)	بار نهایی (kN)	وزن مش (kg)	وزن فولادها (kg)	وزن کل میلگردها (kg)	عدد کارایی (بار نهایی وزن میلگردها)
۲HOR	۱۵۲۰	۲۳/۶۸	۱۶۷۹/۵۴	۱۹۶۱/۷	۶۸۰/۳۴	۲۶۴۲/۰۴	۰/۶۳۶
۲HR	۱۵۲۰	۱۶/۷۹	۱۷۵۹/۵۳	۱۹۶۱/۷	۱۰۸۱/۲۲	۳۰۴۲/۹۲	۰/۵۷۸
۲HOB	۱۵۲۰	۳۶/۹۸	۱۵۸۸/۶۸	۱۹۶۱/۷	۷۹۵/۲۷	۲۷۵۶/۹۷	۰/۵۷۶
۲HB	۱۵۲۰	۲۲/۹۲	۱۷۷۹/۰۸	۱۹۶۱/۷	۱۰۰۶/۲	۲۹۶۷/۲	۰/۵۹۹

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش پنج دیوار برشی با بازشو بررسی شدند. این دیوارها پس از طراحی بر اساس روش بهینه‌سازی همگن کامل و به روش بست و بند، به صورت رایانه‌ای مدل‌سازی شدند. بار اعمالی، تغییر مکان زیر بار و وزن میگردهای مصرفی در این نمونه‌ها برداشت شدند. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- روش بهینه‌سازی همگن کامل توانست به خوبی به حداقل سازی مقدار فولاد مصرفی در دیوارهای برشی با بازشو کمک کند. نمونه‌های طراحی شده بر اساس این روش توانستند با تحمل بار نهایی قابل قبول و بیشتر از بار طراحی حداقل وزن میلگرد را نسبت به دیگر نمونه‌های برگرفته از مطالعات گذشته داشته باشند.
- نمونه‌های طراحی شده به روش بهینه‌سازی همگن کامل ظرفیت نهایی بسیار نزدیک‌تر به بار طراحی و مقدار پیش‌بینی شده در نرم‌افزار CAST داشتند. این امر موجب طراحی بهینه دیوارها از هر جهت شد.

- نمونه‌های طراحی شده به روش بهینه‌سازی همگن کامل شکل‌پذیری بالاتری نسبت دیگر نمونه‌ها داشتند. این امر با توجه به استفاده از دیوار برشی برای مقابله با بارهای لرزه‌ای اهمیت بسیار زیادی دارد. چون باعث اتلاف انرژی لرزه‌ای و کاهش خسارت در سازه‌ها هنگام زمین‌لرزه می‌شود.

۶. منابع و مراجع

۱. ایسنا، به نقل از رئیس سازمان مدیریت بحران کشور، کد خبر: ۹۷۱۲۱۰۰۵۰۵۱، <https://www.isna.ir/news>.
۲. مرادی، مهدی، اصفهانی، محمدرضا، (۱۳۹۵). بهینه‌سازی مدل خرابایی روش بست و بند در تیرهای عمیق با بازشو. مهندسی عمران دوره ۳۲، ۲، (۱)، ۶۷-۷۷.
۳. مرشد، رضا، کمال‌الدینی عزآبادی، محمد، باقدم، نیما، (۱۳۹۴). تعیین چیدمان بهینه فولاد تسلیح دیوار برشی با بازشو با رویکرد مدل خرابایی. تحقیقات بتن دوره ۸، (۱)، ۱۱۳-۱۲۷.
۴. کلوانی، حمیدرضا و محمدرضا نوری شیرازی، (۱۳۹۶). بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتنی دارای بازشو بر اساس سطح عملکرد، اولین کنگره بین‌المللی پژوهش‌های تخصصی در علوم، مهندسی و فناوری های دانشگاهی، شیراز، موسسه عالی علوم و فناوری خوارزمی.
۵. قادری، پیمان و علالدین بهروش، (۱۳۹۷). بررسی تاثیر نسبت مساحت بازشو به مساحت دیوار بر سختی و مقاومت تسلیم سیستم دیوار برشی بتنی، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، دانشگاه تبریز - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - دانشگاه علمی کاربردی شهرداری تبریز.
۶. ACI Committee ۳۱۸، ۲۰۱۴، "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary," American Concrete Institute, Detroit.
۷. Fernández Ruiz, M., & Muttoni, A. (۲۰۰۷). On development of suitable stress fields for structural concrete. ACI, Structural Journal, ۱۰۴(EPFL-ARTICLE-۱۱۱۷۱۵), ۴۹۵-۵۰۲.
۸. MacGregor, J. G., Wight, J. K., Teng, S., & Irawan, P. (۱۹۹۷). Reinforced concrete: Mechanics and design (Vol. ۳). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
۹. Muttoni, A., Schwartz, J., & Thürlimann, B. (۱۹۹۷). Design of concrete structures with stress fields. Springer Science & Business Media.
۱۰. Herranz, U. P., María, H. S., Gutiérrez, S., & Riddell, R. (۲۰۱۲). Optimal Strut-and-Tie Models Using Full Homogenization Optimization Method. ACI Structural Journal, ۱۰۹(۵).
۱۱. Liang, Q. Q., Xie, Y. M., & Steven, G. P., "Topology optimization of strut-and-tie models in reinforced concrete structures using an evolutionary procedure", ACI Structural Journal, vol ۹۷, No. ۲, pp. ۳۲۲-۳۳۲, (۲۰۰۰).
۱۲. Allaire, G., & Pantz, O. (۲۰۰۶). Structural optimization with {FreeFem++}. Structural and Multidisciplinary Optimization, ۳۲(۳), ۱۷۳-۱۸۱.
۱۳. احمدی ندوشن، بهروز، کمال‌الدینی عزآبادی، محمد، باقدم، نیما، (۱۳۹۶). تعیین مدل خرابایی بهینه برای نواحی کرنش آشفته ی بتن مسلح تحت بارگذاری چندگانه با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی. مهندسی عمران، دوره (۱)، ۳۳، ۹۵-۱۰۶.

۱۴. Reineck, K. H. (۲۰۰۲). Modeling structural concrete with strut-and-tie models-summarizing discussion of the examples as per Appendix A of ACI ۳۱۸-۰۲. Special Publication, ۲۰۸, ۲۲۵-۲۴۲.
۱۵. Tjhin, T. N., & Kuchma, D. A. (۲۰۰۲). Computer-based tools for design by strut-and-tie method: Advances and challenges. Structural Journal, ۹۹(۵), ۵۸۶-۵۹۴.