

## تعیین چیدمان بهینه فولاد تسلیح دیوار برشی با بازشو با رویکرد مدل خرپایی

رضا مرشد

استادیار دانشکده عمران، دانشگاه یزد

محمد کمال الدینی عزآبادی\*

دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه یزد

نیما باقدم

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه یزد

### چکیده

تعیین چیدمان بهینه فولاد تسلیح دیوار برشی با بازشو، از مسائل پر اهمیت در طراحی این عضو سازه‌ای می‌باشد. یکی از روش‌های طراحی این اعضا روش مدل خرپایی می‌باشد که با توجه به مدل انتخابی چیدمان فولاد تسلیح صورت می‌گیرد. در این تحقیق با انتخاب کسر حجمی مناسب در مسئله بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته، راهکاری برای تعیین مدل خرپایی بهینه معرفی شد. در مسئله بهینه‌سازی از تابع هدف کمینه‌سازی انرژی کرنشی الاستیک برای رسیدن به الگوی حمل بار بهینه و از مدل SIMP اصلاح شده با تابع جریمه‌ی پیوسته برای جلوگیری از رسیدن به جواب‌های کمینه‌ی محلی استفاده شد. در پایان با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی و تعریف شرایط کیفی و کمی برای مدل خرپایی بهینه، به بررسی مدل‌های به دست آمده از بهینه‌سازی توپولوژی برای سه نمونه دیوار برشی با بازشو پرداخته شد و مدل‌های به دست آمده با مدل‌های پیشین و مدل‌های با قید ساخت مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های بهینه‌سازی توپولوژی نسبت مقاومت نهایی به وزن فولاد تسلیح بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارند و چیدمان بهینه‌ای برای فولاد تسلیح دیوار برشی با بازشو پیشنهاد می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** دیوار برشی با بازشو، مدل خرپایی، بهینه‌سازی توپولوژی، انرژی کرنشی الاستیک کمینه، اجزاء محدود غیر خطی.

\* نویسنده مسئول: kamalodini.mohammad@yahoo.com

## ۱- مقدمه

استفاده از دیوار برشی در ساختمان‌های بتن آرمه به عنوان یک سیستم باربر جانبی دوگانه مرسوم می‌باشد. با توجه به سختی درون صفحه‌ای دیوارهای برشی، این دیوارها بیشترین سهم نیروی برشی ناشی از بار زلزله را تحمل می‌کنند؛ همچنین استفاده از دیوار برشی باعث افزایش شکل‌پذیری و محدود نمودن تغییر مکان جانبی ساختمان می‌گردد. در ساختمان‌های متوسط معمولاً به دلیل مسائل معماری و تأسیساتی دیوارهای برشی اطراف آسانسور و دستگاه پله قرار می‌گیرند؛ و در ساختمان‌های بلند مرتبه با توجه به طول قابل توجه ساختمان دیوارهای مورد نیاز در دو جهت متعامد و در لبه‌های خارجی ساختمان قرار می‌گیرند. استفاده از نور برای فضاهای داخلی و نیاز به دسترسی از یک طرف به طرف دیگر، وجود بازو داخل دیوار را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. بازشدگی در دیوار بر رفتار لرزه‌ای آن تأثیر می‌گذارد و دیگر از روش‌های معمول آئین‌نامه‌ای نمی‌توان به طراحی دیوار برشی پرداخت و نیاز به تمهیدات خاصی برای تسلیح اطراف باز شو می‌باشد.

یکی از راه‌های طراحی این اعضا روش مدل خربایی<sup>۱</sup> می‌باشد. مدل خربایی که به آن سیستم تعادلی نیز گفته می‌شود [۱] یک راه‌حل پلاستیکی کران پائین از تحلیل حدی می‌باشد که جریان پیچیده تنش در اعضای بتن مسلح را به صورت مجموعه‌ای از اعضای کششی، فشاری و گره‌ها ایده‌آل سازی می‌کند [۲]. روش مدل خربایی در سال ۱۸۹۹ توسط هنیگک مطرح و به وسیله‌ی ریتر و مورس ادامه داده شد [۳]. امروزه بیشتر این روش را به نام اشلاچ و همکارن که در سال ۱۹۸۷ آن را متحول ساختند، می‌شناسند [۴]. به طور کلی گام‌های طراحی به شیوه‌ی مدل خربایی شامل مراحل زیر می‌باشد:

گام اول: تعیین شرایط مرزی.

گام دوم: تعیین مدل خربایی مناسب و محاسبه‌ی نیروهای اعضا.

گام سوم: کنترل مقاومت اعضای فشاری و نواحی گره‌ی.

گام چهارم: تعیین فولاد تسلیح اعضای کششی، کنترل طول مهار و چیدمان آن.

در طراحی به روش مدل خربایی با توجه به مدل پیشنهادی محل قرارگیری اعضای کششی مشخص شده و چیدمان فولاد تسلیح اصلی شکل می‌گیرد. مهم‌ترین گام طراحی در روش مدل خربایی، مرحله‌ی انتخاب مدل مناسب می‌باشد. تا کنون روش‌های گوناگونی برای تعیین مدل خربایی نواحی کرنش آشفته ارائه شده است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش الگوی حمل بار، روش الگوی ترک و روش حل الاستیک اشاره کرد. روش الگوی حمل بار، یک سیستم تعادل نامتوازن را نشان می‌دهد و باید با تعیین نیروهای اطراف منحنی بار به یک سیستم تعادل متوازن تبدیل شود. سپس الگوهای حمل بار و نیروهای موازنه شده، با اعضای کششی یا فشاری مناسب جایگزین می‌شوند و مدل خربایی از این روش به دست می‌آید. روش الگوی ترک، برای استفاده از این روش تصویر الگوی ترک اعضایی که به صورت تجربی آزمایش شده‌اند و یا نواحی کرنش آشفته مشابه با عضو مد نظر طراح، باید موجود باشد تا بتوان از روی تصویر ترک آن‌ها، الگوی مدل خربایی مناسب را پیشنهاد کرد. روش حل الاستیک، در این روش توزیع تنش الاستیک به صورت خطوط سیر تنش یا تصویری از تنش‌های اصلی نشان داده می‌شود و اعضای فشاری به صورت موازی با تنش‌های فشاری اصلی قرار می‌گیرند و محل اعضای کششی به وسیله‌ی تنش‌های کششی اصلی مشخص می‌شود [۲].

انتخاب مدل‌های متفاوت برای اعضای مشابه، سخت بودن انتخاب مدل مناسب برای اعضای با پیچیدگی هندسی و شرایط بارگذاری و حتی در بعضی مواقع غیر ممکن بودن انتخاب مدل با روش‌های پیشین سبب روی آوردن محققین به سمت روش‌هایی که بتوان به صورت خودکار مدل خربایی تعیین کرد، شد. امروزه در بسیاری از مراجع، از بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته و گسسته برای تعیین خودکار مدل خربایی استفاده شده است [۱۰-۵]. در سال ۲۰۰۱ لی‌یانگ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش ESO<sup>۲</sup> که مبتنی بر مفهوم ساده‌ی حذف تدریجی مواد ناکارآمد از سازه می‌باشد، به تعیین مدل خربایی پرداختند. بروجی در سال ۲۰۰۹ [۷] با استفاده از روش

<sup>1</sup> Strut and Tie

<sup>2</sup> Evolutionary Structural Optimization

طبق نظر اشلاپیچ و همکاران برای تعیین مدل مناسب، استفاده از این نکته مؤثر است که بارها برای انتقال به تکیه گاه‌ها خواهان استفاده از مسیری (مدلی) با کمترین نیرو و تغییر شکل می‌باشند. از آنجایی که اعضای کششی شکل پذیری بیشتری نسبت به اعضای فشاری بتنی دارند، مدل با کمترین و کوتاه‌ترین اعضای کششی بهترین می‌باشد [۴]. این معیار ساده را می‌توان برای تعیین مدل بهینه به شکل زیر رابطه‌ی بندی کرد:

$$\sum F_i L_i \epsilon_i = \text{minimum} \quad (1)$$

که در آن  $F_i$  نیروی اعضای کششی یا فشاری،  $L_i$  طول اعضای فشاری و کششی،  $\epsilon_i$  کرنش متوسط عضو می‌باشد. رابطه ۱ از اصل کمینه‌سازی انرژی کرنش الاستیک برای رفتار الاستیک اعضای فشاری و کششی بعد از ترک گرفته شده است. چون کرنش بتن کم می‌باشد معمولاً از مشارکت اعضای فشاری در این رابطه صرف نظر می‌شود [۴]. باید توجه داشت که یک مدل خرابایی بهینه‌ی مطلق برای یک مسئله‌ی خاص وجود ندارد، اما یک مهندس طراح با تجربه در زمینه‌ی طراحی به شیوه‌ی مدل خرابایی می‌تواند مدل ایمن را انتخاب کند. لازم به ذکر است تنوع در زمینه‌ی تعیین مدل خرابایی از معایب این روش نمی‌باشد، بلکه یک ویژگی است که به طراح، اجازه‌ی انتخاب مدل‌های متفاوت می‌دهد. البته انتخاب مدل مناسب از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است و نمی‌توان هر مدلی را مدل مناسب در نظر گرفت و برای طراحان بی‌تجربه انتخاب مدل، سخت می‌باشد. از این رو در این پژوهش سعی شده تا با انتخاب کسر حجمی مناسب در مسئله‌ی بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته، روشی برای تعیین مدل بهینه و مناسب ارائه شود و مطابق با مدل‌های به دست آمده چیدمان بهینه‌ی فولاد تسلیح برای دیوار برشی با باز شو ارائه گردد. باید توجه داشت در این تحقیق منظور از چیدمان بهینه، چیدمانی است که هم وزن میلگرد مصرفی کمینه و هم مقاومت نهایی بیشینه‌ای داشته باشد و مدلی بهینه است که هر دو معیار را برآورده کند.

### ۳- بهینه‌سازی توپولوژی

امروزه بهینه‌سازی توپولوژی ابزاری به‌نسبت جدید در دست مهندسين طراح می‌باشد که از آن به طور گسترده در فرآیندهای

SIMP<sup>۱</sup> و یک فیلترینگ جدید برای جلوگیری از پدیده‌ی شطرنجی شدن، به تعیین مدل خرابایی برای نواحی کرنش آشفته پرداخت. البته موضوع تعیین مدل خرابایی برای برخی از اعضای خاص نیز مورد توجه برخی از محققین بوده است. نگاربرجین و پی لیا [۱۲] در سال ۲۰۰۸ و لی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۲ به ترتیب به تعیین مدل خرابایی تیرهای عمیق و اتصالات با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی پرداختند.

در این پژوهش با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته با تابع هدف کمینه‌سازی انرژی کرنشی الاستیک مدل خرابایی بهینه برای دیوار برشی به دست آورده شد و بر خلاف تحقیقات قبلی مدل‌های حاصل از توپولوژی با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت و با مدل‌های با قید ساخت و مدل‌های پیشین مقایسه گردید. همچنین در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامتر کسر حجمی برای تعیین مدل خرابایی بهینه پرداخته شد و در نهایت با بررسی سه مسئله‌ی عددی راهکاری برای چیدمان فولاد تسلیح دیوار برشی با باز شو ارائه شد.

در ادامه ابتدا شرایطی برای انتخاب مدل خرابایی بهینه تعریف می‌شود. سپس فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی برای رسیدن به مدل خرابایی بهینه توضیح داده می‌شود. در پایان با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی مدل‌های خرابایی به دست آمده برای سه دیوار برشی با باز شوهای مختلف با مدل‌های پیشین و مدل‌های با قید ساخت مقایسه می‌گردد.

### ۲- مدل خرابایی بهینه

پیدا کردن مدل خرابایی بهینه تا کنون توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است [۱ و ۴]. برای انتخاب مدل خرابایی مناسب و بهینه باید فاکتورهای زیر را در نظر گرفت تا مدل انتخابی بهینه، مناسب و کارا باشد.

۱- تفاوت اساسی با میدان تنش واقعی نداشته باشد، تا سازه تغییر شکل قابل توجهی تحمل نکند و احتمال شکل‌گیری ترک‌های بزرگ کاهش بیابد.

۲- حتی المقدور ساده بوده تا زمان تحلیل بهینه باشد.

۳- از نظر اجرایی پیچیده نبوده و قابلیت اجرا داشته باشد.

۴- فولاد تسلیح مصرفی کمینه باشد.

<sup>1</sup> Solid Isotropic Material with Penalization

شوند. تا کنون راه‌های متفاوتی برای سوق دادن چگالی‌های بینابین موجود در طرح به سمت مقادیر ۰ و ۱ ارائه شده است که یکی از متداول‌ترین این راهکارها روش SIMP می‌باشد که مطابق با آن سختی مواد به تابعی موسوم به چگالی وابسته می‌شود که در این پژوهش از SIMP اصلاح شده [۱۷] به شکل زیر استفاده شد:

$$E_e(x_e) = E_{min} + x_e^p (E_0 - E_{min}) \quad (2)$$

که در آن  $E_0$  مدول الاستیسیته مواد (المان توپر یا ۱) و  $E_{min}$  مدول الاستیسیته نواحی خالی (المان خالی یا ۰) برای جلوگیری از تکین شدن ماتریس سختی می‌باشد.  $x_e$  متغیر طراحی (چگالی مصنوعی) و توان  $P$  موجود در رابطه، پارامتر جریمه می‌باشد که چگالی‌های (متغیرهای طراحی) بینابین را به سمت ۰ و ۱ سوق می‌دهد و باعث ایجاد طرحی که شامل فضای خالی و مواد است می‌شود.

### ۳-۱- کمینه‌سازی انرژی کرنشی الاستیک

با توجه به مطالب اشاره شده در بخش ۲ مبنی بر استفاده از انرژی کرنشی الاستیک برای تعیین مدل خرپایی بهینه و با استفاده از مدل SIMP برای مواد، مسئله‌ی کمینه‌سازی انرژی کرنشی الاستیک محیط پیوسته به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\min: C = U^T K U = \sum_{e=1}^N (x_e)^p u_e^T k_e u_e \quad (3)$$

$$s. t: \quad \frac{V(x)}{V_0} \leq f \quad (4)$$

$$K U = F \quad (5)$$

$$0 \leq x \leq 1 \quad (6)$$

که در آن  $U$  و  $F$  بردار جابه‌جایی و نیرو و  $K$  ماتریس سختی کل سازه و  $u_e$  و  $k_e$  به ترتیب بردار جابه‌جایی و ماتریس سختی المان  $e$  ام می‌باشند.  $V(x)$  و  $V_0$  به ترتیب حجم مواد و حجم ناحیه‌ی طراحی و  $f$  کسر حجمی تعیین شده می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. بر اساس تئوری کلاپیرون تابع هدف ارائه شده در رابطه ۳ بیان‌گر دو برابر انرژی کرنش الاستیک در حالت تعادل می‌باشد [۷].

طراحی استفاده شده است. این شاخه از بهینه‌سازی در صنعت اتومبیل‌سازی، هوافضا، ساخت و ساز و اکثریت علوم مهندسی کاربرد زیادی دارد. بهینه‌سازی توپولوژی به دو شاخه گسسته و پیوسته تقسیم می‌شود. «میشل» در سال ۱۹۰۴ اولین کسی بود که از معیار بهینه‌گی برای به دست آوردن چیدمان خرپایی با وزن کمینه استفاده کرد. ۷۰ سال بعد رزوانی به همراه گروهی از محققین به بررسی تئوری میشل پرداختند. در سال ۱۹۷۷، رزوانی و پراگر اولین تئوری کلی بهینه‌سازی توپولوژی گسسته را تحت عنوان تئوری چیدمان بهینه<sup>۱</sup> رابطه‌سازی کردند [۱۴]. مقاله بندسو و کیکوچی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۸ نقطه‌ی تحولی در تاریخ بهینه‌سازی توپولوژی بود، در واقع این مقاله نخستین حل عددی برای مسائل بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های پیوسته بود که در آن از روش اجزاء محدود کمک گرفته شده بود [۱۵]. هدف اصلی در بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته پیدا کردن چیدمان بهینه مواد در ناحیه معین برای انتقال بارهای وارده به نواحی مرزی می‌باشد.

در بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته، محدوده‌ی طراحی به صورت فرضی گسسته‌سازی می‌شود و میدان جابه‌جایی با بی‌نهایت درجه آزادی به یک میدان گسسته با تعداد متناهی درجه آزادی تبدیل می‌شود. در این حالت تعداد متغیرهای طراحی وابسته به تعداد المان‌ها می‌باشد. اگر فقط توالی و ارتباط بین المان‌ها مهم باشد می‌توان متغیرهای طراحی را وجود و عدم وجود المان‌ها انتخاب کرد. به عبارت دیگر می‌توان با رویکرد ۰ و ۱ وجود المان را با ۱ و عدم وجود المان را با ۰ معین کرد. حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای طراحی گسسته به مراتب سخت‌تر از مسائل با متغیرهای پیوسته می‌باشد. متداول‌ترین شیوه برای حل این گونه مسائل اصلاح مسئله با جای‌گزین کردن مقادیر پیوسته به جای مقادیر گسسته می‌باشد. از این‌رو متغیرهای طراحی می‌توانند مقادیری بین ۰ و ۱ بگیرند. وجود المان‌هایی با مقادیر میانی (چگالی بینابین) در طرح باعث نامطلوب شدن طرح از دیدگاه مهندسی می‌شود [۱۶]. این موضوع از دو دیدگاه قابل بحث می‌باشد، دیدگاه اول قابلیت ساخت (تولید) می‌باشد و دیدگاه دوم سختی کم در مقایسه با حجم مصالح مصرفی این المان‌ها می‌باشد [۱۴]. از این‌رو مقادیر میانی باید به نحوی به سمت ۰ و ۱ سوق داده

<sup>1</sup> Optimal layout theory

<sup>2</sup> Bendsoe and Kikuchi

#### ۴- حل مسئله بهینه‌سازی

این بدان معنا است که با یک مش بندی ریز تر امکان شکل گیری اعضای لاغرتر افزایش یافته و طرح نهایی از تعداد اعضای بیشتری برخوردار می‌باشد [۷]. مسئله دوم ایجاد پدیده‌ی شطرنجی می‌باشد که در بسیاری از مراجع آن را ناشی از گسسته‌سازی میدان‌های سختی و جابه‌جایی توسط روش اجزاء محدود می‌دانند [۲۰]. ناحیه‌ی شطرنجی که طبق نظر دیاز و سیگموند سختی کاذب دارد ناحیه‌ای را به وجود می‌آورد که در آن المان‌های توپر و توخالی تکرار شده و شکل حاصل به صورت یک صفحه‌ی شطرنج می‌باشد [۲۱]. این پدیده تا کنون مورد مطالعه‌ی بسیاری از محققین بوده است و راهکارهای فراوانی برای غلبه بر آن ارائه شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به استفاده از المان‌های مرتبه بالاتر، استفاده از فیلترینگ، استفاده از روش‌هایی موسوم به کنترل محیط، کنترل طول (ابعاد اعضا)، ایجاد قیود بر پدیده‌ی شطرنجی، جریمه کردن پدیده‌ی شطرنجی، المان‌های شش گوشه و غیره اشاره کرد که هر کدام نسبت به دیگری مزیت‌هایی دارند [۲۲]. یکی از روش‌های پر کاربرد برای مقابله با این دو چالش استفاده از فیلتر کردن حساسیت تابع هدف نسبت به متغیر طراحی مطابق با رابطه ۹ می‌باشد که طی آن از تغییرات ناگهانی حساسیت اطراف المان جلوگیری می‌شود [۱۹].

$$\frac{\partial c}{\partial x_e} = \frac{1}{\max(x_e, \gamma) \sum_{i \in N_e} H_{ei}} \sum_{i \in N_e} H_{ei} x_i \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (9)$$

که در آن  $N_e$ ، مجموعه‌ای از المان‌های  $i$  می‌باشد که فاصله‌ی مرکز آن المان‌ها تا المان  $e$  ام  $(\Delta(e, i))$  کمتر از شعاع فیلترینگ  $(r_{min})$  باشد،  $(\gamma = 10^{-3})$  یک مقدار مثبت کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج و  $H_{ei}$  یک ضریب وزنی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_{ei} = \max(0, r_{min} - \Delta(e, i)) \quad (10)$$

مسئله‌ی سوم وجود جواب‌های کمینه‌ی محلی در مسئله بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد. مسائل جریمه شده در حالت کلی غیر محدب می‌باشند از این رو باعث بوجود آمدن جواب‌های کمینه‌ی محلی می‌شوند [۲۰]. یکی از راه‌های مقابله با این ناپایداری استفاده از تابع جریمه‌ی پیوسته می‌باشد که در بعضی از

الگوریتم‌های متنوعی برای حل مسئله بهینه‌سازی توپولوژی مطرح شده است که از پرکاربردترین این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم معیار بهینه‌گی و الگوریتم مجانب‌های متحرک اشاره کرد. روش معیار بهینه‌گی یک روش ابتکاری است که توسط بندسو برای به روز رسانی متغیر طراحی مطرح شده است. این روش یکی از مناسب‌ترین الگوریتم‌ها برای مسائل کمینه‌سازی انرژی کرنش تحت قید حجم می‌باشد [۱۶ و ۱۸]. در این الگوریتم مطابق رابطه ۷ متغیرهای طراحی به روز رسانی می‌شوند:

$$x_e^{new} = \begin{cases} \max(x_{min}, x_e - m) & \text{if } x_e \beta_e^\eta \leq \max(x_{min}, x_e - m) \\ x_e \beta_e^\eta & \text{if } \max(x_{min}, x_e - m) < x_e \beta_e^\eta < \min(1, x_e + m) \\ \min(1, x_e + m) & \text{if } \min(1, x_e + m) \leq x_e \beta_e^\eta \end{cases}$$

$m$  و  $\eta$  به ترتیب متغیر تعدیل و حد تغییرات می‌باشند. این دو پارامتر تغییراتی که در هر چرخه‌ی گام به روز رسانی متغیرهای طراحی اتفاق می‌افتد را کنترل می‌کنند و برای کارایی روش قابل تنظیم می‌باشند. معمولاً  $\eta = 0.5$  و  $m = 0.2$  در نظر گرفته می‌شوند.  $\beta_e$  با توجه به شرایط بهینه‌گی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta_e = \frac{-\frac{\partial c}{\partial x_e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial x_e}} \quad (8)$$

که در آن  $\frac{\partial c}{\partial x_e}$  و  $\frac{\partial V}{\partial x_e}$  به ترتیب مشتق تابع هدف (نرمی) و مشتق قید (حجم) نسبت به متغیر طراحی می‌باشد و  $\lambda$  ضریب لاگرانژ برای قید حجم می‌باشد که در یک چرخه داخلی از روش نصف کردن یا روش نیوتن به دست می‌آید.

#### ۵- ناپایداری‌های عددی

مسئله‌ی کمینه‌سازی نرمی با مدل مواد SIMP، سه مشکل عمده دارد که بر جواب نهایی اثر می‌گذارد. مسئله‌ی اول وابستگی مش می‌باشد که طی آن مش بندی متفاوت منجر به توپولوژی نهایی متفاوت می‌شود. این پدیده ناشی از افزایش سختی سازه در اثر افزایش تعداد فضای خالی ایجاد شده در طرح نهایی می‌باشد و

جهت ساده‌سازی تحلیل در مدل عددی فرض بر این است که بین آرماتور و بتن مهار کامل برقرار باشد، بدین منظور درجات آزادی میلگرد مستقل از درجات آزادی بتن اطراف نیست. برای لحاظ کردن این مسئله قابلیت به نام مدفون شده<sup>۳</sup> در نرم‌افزار گنجانده شده است. به وسیله‌ی این قابلیت قطعه‌ای را می‌توان در درون قطعه‌ای دیگر قرارداد، به صورتی که درجات آزادی قطعه‌ی درون با استفاده از درجات آزادی اطراف آن، از قطعه‌ی بیرونی درون‌یابی شوند. برای قسمت خطی بتن از ویژگی الاستیک<sup>۴</sup> در کتابخانه مصالح از پیش تعریف شده نرم‌افزار آباکوس استفاده شده، که در آن از مدول الاستیسیته و نسبت بواسون استفاده می‌شود [۲۴]؛ و برای تعریف حالت غیرخطی بتن از مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری<sup>۵</sup> استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای فشاری و کششی بتن به ترتیب از منحنی تنش و کرنش مقاله ناه و همکاران [۲۵] و ماتسومارا و همکاران [۲۶] و برای تعیین مدول الاستیسیته اولیه و کرنش نظیر مقاومت نهایی بتن از مقاله واهالاتانتری و همکاران [۲۷] استفاده شده است.

## ۸- مسائل عددی

در این قسمت برای بررسی کارایی روش پیشنهادی سه مسئله‌ی نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله‌ی اول دیوار برشی با بازشوی میانی، مسئله‌ی دوم دیوار برشی با بازشوی نامتقارن تحت بارگذاری متقابل معکوس (لرزه‌ای) و مسئله‌ی سوم دیوار برشی با بازشوی بزرگ نامنظم می‌باشد. در بسیاری از مراجع برای مقایسه‌ی مدل‌های پیشنهادی برای یک نمونه و تعیین مدل خرابایی بهینه و مناسب، به مقایسه‌ی نسبت بار نهایی به کل وزن میلگرد مصرفی مدل‌ها (عدد کارایی) پرداخته‌اند [۲۸ و ۲۹]. در این پژوهش نیز از این روش برای بررسی کارایی مدل‌های پیشنهادی استفاده شد. از این رو مدل‌های پیشنهادی با نرم‌افزار CAST تحلیل و طراحی شدند و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به تحلیل اجزاء محدود غیرخطی آن‌ها پرداخته شد. نرم‌افزار CAST یکی از نرم‌افزارهای متداول برای تحلیل و طراحی به روش مدل

مراجع به صورت تابع جریمی افزایشی اعمال می‌شود که در این پژوهش نیز از آن استفاده شد [۲۳].

## ۶- نحوه‌ی تعیین مدل خرابایی بهینه

چارچوب کلی فرآیند بهینه‌سازی اشاره شده در بخش ۵ به خوبی توسط اکثر محققین شناخته شده و کارایی این رابطه‌ها برای رسیدن به طرح‌های بهینه با سختی بیشینه تحت قید حجم مشخص می‌باشد. دو پارامتر تأثیرگذار بر توپولوژی نهایی، کسر حجمی و شعاع فیلترینگ می‌باشد. کسر حجمی زیاد انتخاب مدل از توپولوژی نهایی را سخت و کسر حجمی کم باعث ایجاد مدلی با سختی پائین می‌شود و مدل به دست آمده بهینه نمی‌باشد. همچنین شعاع فیلترینگ کم باعث شاخه شاخه شدن توپولوژی نهایی و ایجاد مدلی پیچیده برای تحلیل و شعاع فیلترینگ زیاد منجر به ایجاد مدلی با سختی کم می‌شود. معمولاً شعاع فیلترینگ با توجه به مش بندی به نحوی معین می‌شود که نه تعداد شاخه‌های توپولوژی نهایی زیاد و نه سازه‌ای با سختی کم و تعداد اعضای کم ایجاد شود. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد این رابطه بندی، توپولوژی نهایی را به نحوی به دست می‌آورد که انرژی کرنش آن در حالت تعادل کمینه باشد، لذا از درون یابی اعضای توپولوژی نهایی می‌توان یک مدل خرابایی متعادل و بهینه پیشنهاد کرد.

## ۷- اجزاء محدود غیرخطی

در این تحقیق از روش تحلیل غیرخطی استاتیک جنرال با الگوریتم همگرایی نیوتن-رافسون استفاده شده است. برای مدل‌سازی دیوار برشی با بازشو از المان پیوسته<sup>۱</sup> یا جامد<sup>۲</sup> شش وجهی هشت گرهی، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال گیری کامل خطی که در نرم‌افزار آباکوس با C3D8 نشان داده می‌شود، استفاده گردیده است. همچنین به منظور مدل‌سازی آرماتورهای داخل دیوارهای برشی، از المان T3D2 از نوع المان‌های خرابایی با دو گره انتهایی استفاده شده است. این المان دارای سه درجه انتقالی در هر گره خود بوده که کلاً دارای ۶ درجه آزادی می‌باشد.

<sup>1</sup> Continuum

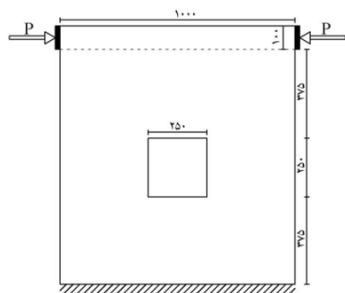
<sup>2</sup> Solid

<sup>3</sup> Embedded

<sup>4</sup> Elastic

<sup>5</sup> Concrete Damaged Plasticity

جلوگیری از گسیختگی عضو بتری شکل از یک مش ثابت فولادی در تمامی نمونه‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از طراحی در جدول ۱ و نتایج تحلیل اجزاء محدود غیرخطی در جدول ۲ و نمودار شکل ۴ خلاصه شده است.

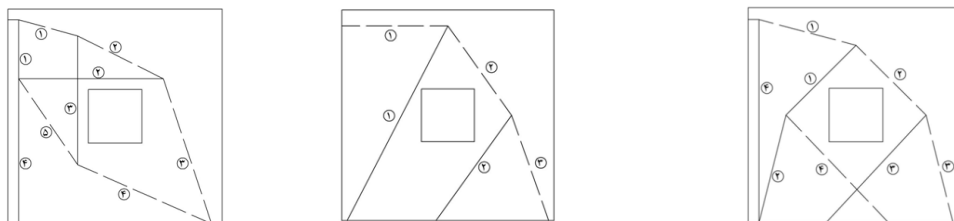


شکل ۱- دیوار برشی بازشو میانی (ابعاد میلی متر).



الف) کسر حجمی ۰/۴۵      ب) کسر حجمی ۰/۶

شکل ۲- توپولوژی نهایی دیوار برشی با بازشو میانی



الف: مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۶      ب: مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۴۵      پ: مدل قید ساخت

شکل ۳- مدل‌های پیشنهادی برای دیوار برشی با بازشو میانی

جدول ۱- نتایج حاصل از طراحی با CAST

مدل	عضو کششی	نیرو (kN)	سطح مقطع مورد نیاز (mm <sup>2</sup> )	فولاد تسلیح مورد نیاز (kg)	فولاد مصرفی	فولاد تسلیح مصرفی (kg)	وزن مش (kg)
توپولوژی با کسر حجمی (۰/۶)	۱	۲۵/۱	۷۳/۸۲	۲/۴۶	۲φ۸	۳/۰۶	۲/۲۴
	۲	۲۹/۱	۸۵/۵۹		۲φ۸		
	۳	۵۱/۷	۱۵۲/۰۶		۲φ۱۰		
	۴	۴۴/۴	۱۳۰/۵۹		۲φ۱۰		
توپولوژی با کسر حجمی (۰/۴۵)	۱	۸۸	۲۵۸/۸۲	۲/۶۰	۲φ۱۴	۲/۸۶	۲/۲۴
	۲	۱۷/۷	۵۲/۰۶		۲φ۶		
مدل قید ساخت	۱	۴۳/۶	۱۲۸/۲۳	۴/۰۸	۲φ۱۴	۴/۹۴	۲/۲۴
	۲	۹۴/۶	۲۷۸/۲۳		۲φ۱۴		
	۳	۵۵/۹	۱۶۴/۶۱		۲φ۱۰		
	۴	۹۱/۵	۲۶۹/۱۲		۲φ۱۴		

خرپایی می‌باشد که خوانندگان برای آشنایی بیشتر با این نرم‌افزار می‌توانند مراجع [۳۰ و ۳۱] را مطالعه کنند.

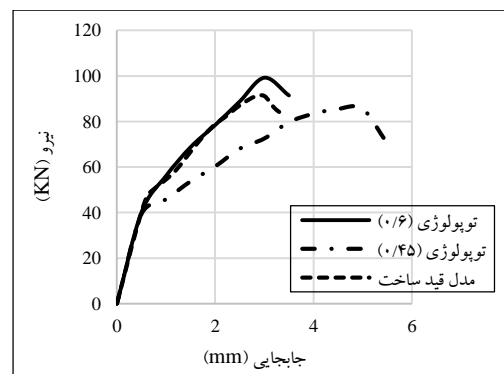
### ۸-۱- مسئله‌ی نمونه ۱: دیوار برشی با بازشوی میانی

در این مسئله به بررسی مدل‌های پیشنهادی برای یک دیوار برشی با بازشوی میانی پرداخته شده است. مشخصات هندسی و محل بازشو دیوار در شکل ۱ مشاهده می‌شود. برای دیوار از بتن با ضریب پواسون ۰/۲، مقاومت فشاری ۲۵ MPa و فولاد با مقاومت کششی ۴۰۰ MPa استفاده شد. از ۴۰ المان چهارگره‌ی تنش مسطح در جهت افقی و ۴۴ المان در جهت قائم برای مش بندی و برای نشان دادن تأثیر کسر حجمی از دو کسر حجمی ۰/۴۵ و ۰/۶ استفاده شد. برای اعمال جریمه و جلوگیری از ناپایداری عددی در فرآیند بهینه‌سازی به ترتیب ضریب جریمه‌ی پیوسته [۳-۱] و شعاع فیلترینگ ۱/۸ در نظر گرفته شد. توپولوژی‌های به دست آمده برای این دیوار برای هر دو کسر حجمی ۰/۴۵ و ۰/۶ در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مدل‌های خرابایی مطابق با توپولوژی و مدل خرابایی پیشنهادی با قید ساخت در شکل ۳ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها با نرم‌افزار CAST و با فرض ضخامت ۸۰ mm و بار ۸۰ kN طراحی و برای

## ۸-۱-۱- بررسی نتایج حاصل از تحلیل

از جدول ۲ مشخص است که مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۶ عدد کارایی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و این بدان جهت است که با افزایش کسر حجمی، مقدار انرژی کرنشی کاهش پیدا می‌کند. همچنین وزن فولاد تسلیح اصلی مورد نیاز این مدل از دو مدل دیگر کمتر می‌باشد؛ که حدوداً ۴۰٪ از وزن میلگرد مدل با قید ساخت و ۵/۴٪ از مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۴۵ کمتر می‌باشد. اما به علت محدودیت‌های اجرایی و سطح مقطع میلگرد موجود، وزن میلگرد مصرفی این مدل از مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۴۵ بیشتر می‌شود. این نشان می‌دهد هر چه مدل از تعداد شاخه‌های بیشتر و اعضای شکسته‌تری تشکیل شده باشد هم اجرای آن دشوارتر می‌باشد و هم فولاد تسلیح مصرفی آن بیش از فولاد تسلیح مورد نیاز می‌شود. از این رو مدل انتخابی باید به نحوی باشد که هم از نظر اجرایی ساده باشد و هم از نظر میلگرد مصرفی کمینه باشد. معمولاً مدل توپولوژی با کسر حجمی ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ منجر به نتایج مطلوب می‌شود.

از جدول ۲ مشخص است که تمامی نمونه‌ها بار بیشتری از بار طراحی تحمل می‌کنند و تحت بار طراحی و سرویس (۶۰ kN) رفتار خوبی از خود نشان می‌دهند که این بیانگر محافظه‌کار بودن طراحی به شیوه‌ی مدل خرپایی می‌باشد. به هر حال از چیدمان به دست آمده برای این دیوار مشخص است که میلگرد گذاری مورب اطراف باز شو منجر به رفتار مطلوب برای دیوار برشی دارای باز شو می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از کسر حجمی کوچکتر از ۰/۳ منجر به حذف برخی از اعضای مورد نیاز از توپولوژی نهایی می‌شود و مدل حاصل شده با جهت‌گیری تنش‌ها تطابق نخواهد داشت [۷].



شکل ۴- نمودار بار-جابجایی دیوار برشی با باز شو میانی

جدول ۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود غیرخطی دیوار برشی با باز شو میانی

مدل	توپولوژی - کسر حجمی (۰/۴۵)	توپولوژی کسر حجمی (۰/۶)	مدل قید ساخت
بار نهایی (kN)	۸۵/۵۴	۹۹/۲۴	۹۱/۱۸
جابجایی تحت بار طراحی (mm)	۳/۵۴۳	۲/۰۷۴	۲/۰۷۷
جابجایی تحت بار سرویس (mm)	۱/۹۸۲	۱/۱۵۴	۱/۲۵۴
بار نهایی بار طراحی	۱/۰۷	۱/۲۴	۱/۱۴
عدد کارایی (kN/kg)	۱۶/۷۷	۱۸/۷۲	۱۲/۶۹

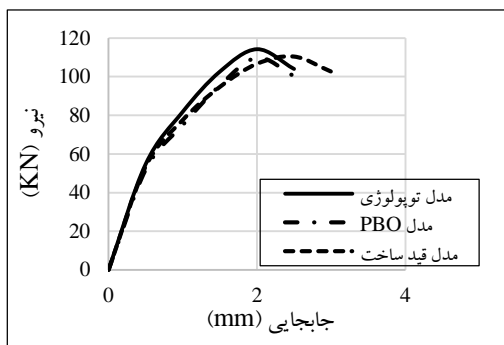
## ۸-۲- مسئله‌ی نمونه ۲: دیوار برشی با باز شو نامتقارن

## یک طبقه

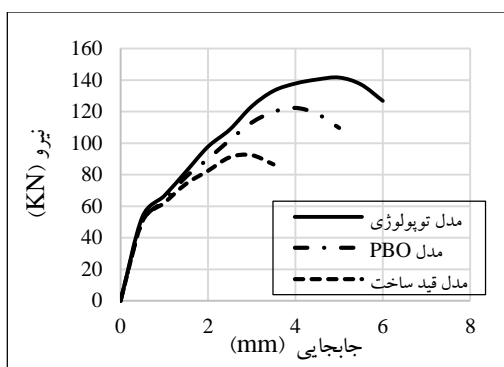
در این مسئله به بررسی مدل‌های پیشنهادی برای دیوار برشی با باز شو نامتقارن پرداخته شده است. این دیوار از مرجع [۳۲] انتخاب شده، مشخصات هندسه و محل باز شوها در شکل ۵ مشاهده می‌شود. برای رسیدن به توپولوژی مطلوب در این مسئله از کسر حجمی ۰/۴۵، ضریب جریمه‌ی پیوسته [۵-۱]، شعاع فیلترینگ ۹ و برای مش بندی از ۲۲۵ المان تنش مسطح چهار گرهی در جهت افقی و ۱۹۳ المان در جهت قائم استفاده شد. توپولوژی به دست آمده برای دیوار تحت بار رفت و برگشت و مدل‌های خرپایی پیشنهادی در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.

مدل پیشنهادی در شکل ۸ با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی بر پایه‌ی عملکرد (PBO) که توسط لی‌یانگ در سال ۱۹۹۸ مطرح شد، به دست آورده شده است. این مدل و مدل قید ساخت هر دو از مرجع [۳۲] برای این دیوار برشی انتخاب شده‌اند. سه مدل همانند مسئله‌ی قبل با استفاده از نرم‌افزار CAST برای ضخامت ۸۰ mm و بار ضریب‌دار ۸۰ kN تحلیل و طراحی شدند و برای جلوگیری از گسیختگی عضو بتری شکل از یک مش ثابت فولادی در تمامی نمونه‌ها استفاده شد. مقاومت فشاری بتن ۲۵MPa، ضریب پواسون آن ۰/۲ و مقاومت





شکل ۱۰- نمودار بار-جابجایی دیوار برشی با بازشو نامتقارن- بار رفت

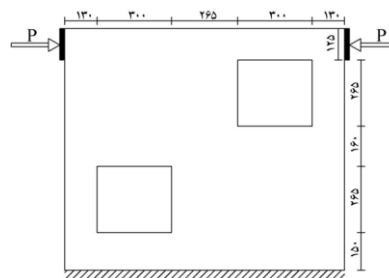


شکل ۱۱- نمودار بار-جابجایی دیوار برشی با بازشو نامتقارن- بار برگشت

جدول ۳- نتایج طراحی و تحلیل تحت بار رفت

مدل	مدل توپولوژی	مدل PBO	مدل قید ساخت
وزن مش (kg)	۳/۰۱	۳/۰۱	۳/۰۱
فولاد تسلیح اصلی (kg)	۱/۷۲	۱/۹۴	۱/۶
بار نهایی (kN)	۱۱۴/۲	۱۰۹/۸	۱۱۰/۵
بار طراحی	۱/۴۳	۱/۳۷	۱/۳۸
عدد کارایی (kN/kg)	۲۴/۱۵	۲۲/۱۸	۲۳/۹۸

کششی فولاد ۴۰۰ MPa در نظر گرفته شد. وزن میلگرد مصرفی و نتایج اجزاء محدود غیرخطی بار رفت و برگشت به ترتیب در جداول ۳ و ۴ و نمودارهای شکل ۱۰ و ۱۱ خلاصه شده است.



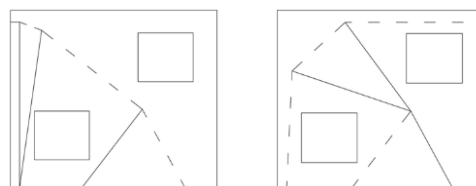
شکل ۵- دیوار برشی با بازشو نامتقارن (ابعاد میلی متر) [۳۲].



ب: بار رفت

الف: بار برگشت

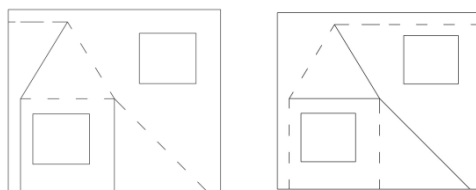
شکل ۶- توپولوژی دیوار برشی با بازشو نامتقارن



ب: بار رفت

الف: بار برگشت

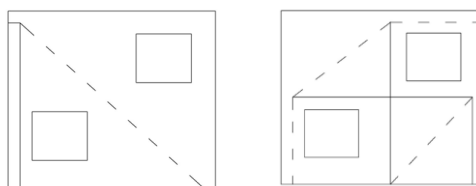
شکل ۷- مدل خرابایی حاصل از توپولوژی



ب: بار رفت

الف: بار برگشت

شکل ۸- مدل خرابایی PBO [۳۲].



ب: بار رفت

الف: بار برگشت

شکل ۹- مدل خرابایی قید ساخت [۳۲].

جدول ۴- نتایج طراحی و تحلیل تحت بار برگشت

مدل قید ساخت	مدل PBO توپولوژی	مدل توپولوژی
۳/۰۱	۳/۰۱	۳/۰۱
۴/۲۲	۳/۱۵	۲/۹۲
۹۲/۴	۱۲۲/۳	۱۴۱/۶
۱/۱۵	۱/۵۳	۱/۷۷
۱۲/۷۸	۱۹/۸۵	۲۳/۸۸

میلگرد مصرفی در طرح نهایی مدل توپولوژی ۱۳/۴٪ کمتر از مدل با قید ساخت می‌باشد. همچنین مقایسه‌ی نتایج مدل توپولوژی و مدل PBO اصلاح شده نشان می‌دهد، رابطه‌ی استفاده شده در مسئله‌ی بهینه‌سازی توپولوژی برای رسیدن به مدل خرابایی، رابطه‌ی مناسبی بوده و منجر به کاهش میزان مصرف میلگرد و افزایش مقاومت نهایی می‌شود، در واقع این رابطه چیدمان فولاد تسلیح را، بهینه به دست می‌آورد.

### ۸-۳- مسئله‌ی نمونه ۳: دیوار برشی چند طبقه با بازشوی نامتقارن

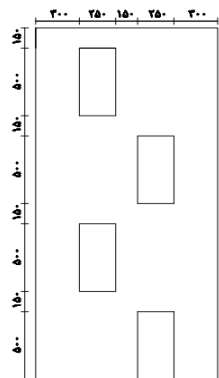
در این مسئله به بررسی دیوار برشی چند طبقه با بازشوی نامتقارن بزرگ پرداخته شده است. این دیوار از مرجع [۳۳] انتخاب شده و مشخصات هندسه و محل بازشوها در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. برای رسیدن به توپولوژی مطلوب در این مسئله از کسر حجمی ۰/۴۵، ضریب جریمه‌ی  $P=[1-5]$ ، شعاع فیلترینگ ۳ و برای مش‌بندی از ۱۲۵ المان تنش مسطح چهار گرهی در جهت افقی و ۲۶۰ المان در جهت قائم استفاده شد. توپولوژی به دست آمده برای دیوار تحت بار رفت و برگشت و مدل‌های خرابایی پیشنهادی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. در این مسئله با الهام گرفتن از مدل یانز و همکاران [۳۴] یک مدل با قید ساخت برای این دیوار تحت بار رفت و برگشت پیشنهاد شد (شکل ۱۵). علامت تنش فون مایسس مقیاس شده هر توپولوژی کنار آن نشان داده شده است، که این باعث تشخیص راحت محل قرارگیری اعضای کششی و نحوه‌ی چیدمان میلگرد در مدل‌های بزرگ مقیاس پیچیده می‌شود، در این جا تنش کششی منفی و تنش فشاری با علامت مثبت در نظر گرفته شده است. ضخامت اعضای توپولوژی در واقع میزان باربری اعضا نسبت به اعضای دیگر را نشان می‌دهد [۳۵]. از این رو در این مثال با حذف اعضای که نیروی کمی تحمل می‌کنند و حذف آن‌ها مشکلی برای تعادل سازه ایجاد نمی‌کند مدل خرابایی اصلاح شده‌ای پیشنهاد شد. حذف اعضای غیر مؤثر در سازه‌های بزرگ مقیاس با بارگذاری پیچیده منجر به کاهش زمان تحلیل و طراحی و بهبود جزئیات اجرایی نهایی (نحوه‌ی میلگرد گذاری) و آسودگی اجرا می‌شود.

### ۸-۲-۱- بررسی نتایج حاصل از تحلیل

با توجه به جدول ۳ و ۴ مشخص است که تحت بار رفت و برگشت مدل توپولوژی نسبت بار نهایی به وزن میلگرد مصرفی (عدد کارایی) بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و این بیانگر مناسب بودن مدل پیشنهادی به این روش می‌باشد.

باید توجه داشت که وزن فولاد تسلیح اصلی مدل توپولوژی تحت بار رفت تقریباً ۷٪ بیشتر از فولاد تسلیح اصلی مدل با قید ساخت می‌باشد و بار نهایی مدل توپولوژی ۳/۲٪ بیشتر از مدل قید ساخت می‌باشد. در این حالت عدد کارایی مدل توپولوژی اندکی بهتر از مدل قید ساخت می‌باشد و این بیانگر آن است که چیدمان بهینه‌ی فولاد به دست آمده از توپولوژی، هر دو معیار مصرف فولاد کمینه و بار نهایی بیشینه را هم‌زمان برآورده می‌کند. تحت بار برگشت وزن فولاد تسلیح اصلی مدل توپولوژی ۳۰/۸٪ کمتر از مدل با قید ساخت می‌باشد و در این حالت بار نهایی مدل توپولوژی ۳۴/۷٪ بهتر از مدل با قید ساخت می‌باشد.

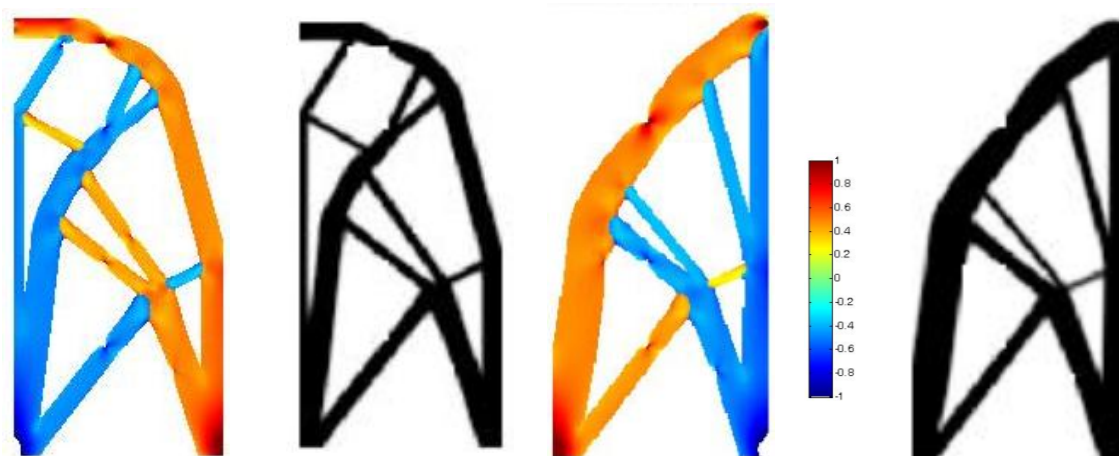
وزن میلگرد مصرفی موجود در طرح نهایی ناشی از هر دو حالت بارگذاری رفت و برگشت برای مدل توپولوژی ۷/۶۵ kg می‌باشد این در حالی است که این مقدار برای مدل PBO و مدل با قید ساخت به ترتیب ۸/۱ kg و ۸/۸۳ kg می‌باشد و این یعنی وزن



شکل ۱۲- دیوار برشی چند طبقه با بازشوی نامتقارن

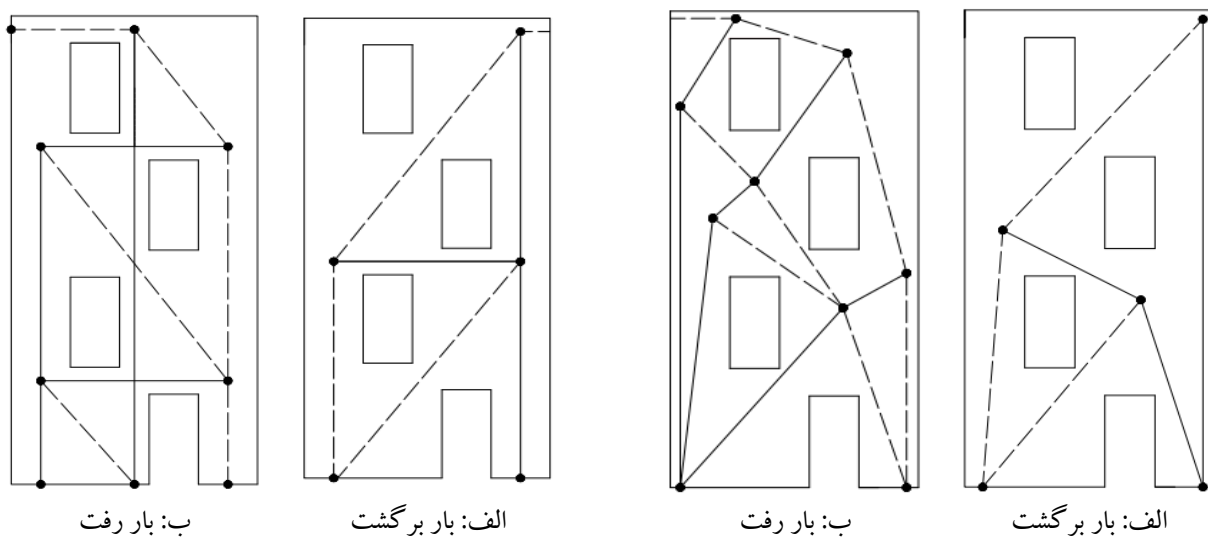
بزرگ

البته مراجع [۳۶ و ۳۷] نیز به حذف اعضای غیر مؤثر از توپولوژی و تعیین مدل خریایی ساده تر اشاره کرده‌اند. دو مدل همانند مسئله‌ی قبل با استفاده از نرم‌افزار CAST برای ضخامت  $mm$  ۸۰ و بار ضریب‌دار  $80 \text{ kN}$  تحلیل و طراحی شدند و برای جلوگیری از گسیختگی عضو بطری شکل از یک مش ثابت فولادی استفاده شد. مقاومت فشاری بتن  $50 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون آن  $0.2$  و مقاومت کششی فولاد  $400 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شد.



الف: توپولوژی بار برگشت ب: علامت تنش مقیاس شده الف: توپولوژی بار رفت ب: علامت تنش مقیاس شده

شکل ۱۳- توپولوژی نهایی و تعیین محل اعضای کششی و فشاری دیوار برشی چند طبقه با بازشوی نامتقارن بزرگ



ب: بار رفت

الف: بار برگشت

ب: بار رفت

الف: بار برگشت

شکل ۱۵- مدل خریایی با قید ساخت

شکل ۱۴- مدل خریایی حاصل از توپولوژی

جدول ۶- نتایج طراحی و تحلیل تحت بار برگشت

مدل	مدل قید ساخت	مدل توپولوژی
وزن مش (kg)	۹/۳۸	۹/۳۸
فولاد تسلیح اصلی (kg)	۱۱/۸۹	۸/۹۲
بار نهایی (kN)	۱۳۵/۰۳	۱۲۳/۳۶
بار نهایی بار طراحی	۱/۶۸	۱/۵۴
عدد کارایی (kN/kg)	۶/۳۵	۶/۷۴

### ۸-۳-۱- بررسی نتایج حاصل از تحلیل

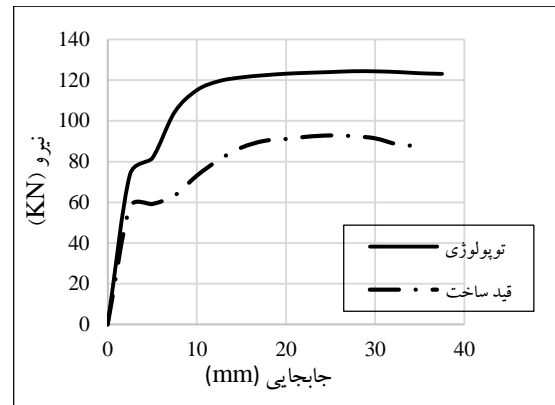
با توجه به جدول ۵ و ۶ مشخص است که تحت بار رفت و برگشت مدل توپولوژی نسبت بار نهایی به وزن میلگرد مصرفی (عدد کارایی) بیشتری نسبت به مدل با قید ساخت دارد و این بیان‌گر مناسب بودن مدل به دست آمده از بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد.

وزن فولاد تسلیح اصلی مدل توپولوژی تحت بار رفت و برگشت به ترتیب ۵۶/۴٪ و ۲۵٪ کمتر از مدل با قید ساخت می‌باشد، این در حالی است که مقاومت نهایی مدل توپولوژی تحت بار رفت ۲۵/۴٪ بیشتر و تحت بار برگشت ۸/۶٪ کمتر از مدل قید ساخت می‌باشد. که این نشان‌دهنده‌ی چیدمان بهینه‌ی فولاد تسلیح اصلی با مدل به دست آمده از بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد.

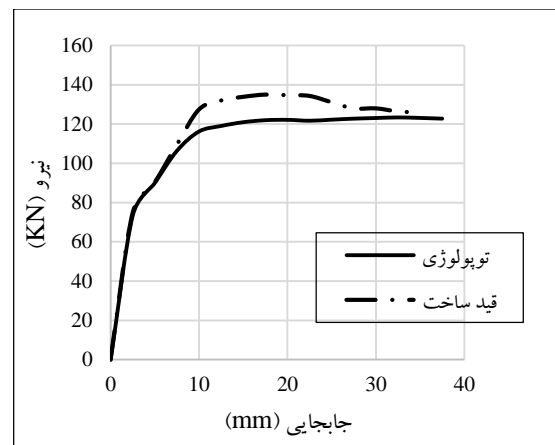
وزن کل میلگرد مصرفی مدل توپولوژی ۲۵/۵ kg و مدل با قید ساخت ۳۷/۷ kg می‌باشد و این یعنی با استفاده از مدل توپولوژی ۳۲/۵٪ وزن میلگرد مصرفی کل کاهش یافته است.

### ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از بهینه‌سازی توپولوژی پیوسته برای تعیین الگوی حمل بار بهینه‌ی دیوار برشی با بازشو استفاده شد. انرژی کرنشی الاستیک محیط پیوسته به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و از الگوریتم معیار بهینه‌گی برای به روز رسانی متغیرهای طراحی استفاده شد. مسئله‌ی چیدمان بهینه‌ی فولاد تسلیح صرفاً کاهش وزن فولاد تسلیح مصرفی نمی‌باشد بلکه هدف برآوردن هر دو



شکل ۱۶- نمودار بار-جابجایی دیوار برشی چند طبقه با بازشو نامتقارن (بار رفت)



شکل ۱۷- نمودار بار-جابجایی دیوار برشی چند طبقه با بازشو نامتقارن (بار برگشت)

جدول ۵- نتایج طراحی و تحلیل تحت بار رفت

مدل	مدل قید ساخت	مدل توپولوژی
وزن مش (kg)	۹/۳۸	۹/۳۸
فولاد تسلیح اصلی (kg)	۱۶/۵	۷/۱۹
بار نهایی (kN)	۹۲/۸۴	۱۲۴/۴۳
بار نهایی بار طراحی	۱/۱۶	۱/۵۵
عدد کارایی (kN/kg)	۳/۵۹	۷/۵۱

- [3]. Kurrer, K. E., "The history of the theory of structures: from arch analysis to computational mechanics", John Wiley & Sons, pp. 562-569, (2012).
- [4]. Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M., "Toward a consistent design of structural concrete", PCI Journal, vol. 32, No. 3, pp. 74-150, (1987).
- [5]. Ali, M. A., & White, R. N., "Automatic generation of truss model for optimal design of reinforced concrete structures", ACI Structural Journal, vol. 98, No. 4, pp. 431-442, (2001).
- [6]. Liang, Q. Q., "Performance-based Optimization of Structures: Theory and applications", CRC Press, pp. 135-140 (2005).
- [7]. Bruggi, M., "Generating strut-and-tie patterns for reinforced concrete structures using topology optimization", Computers & Structures, vol. 87, No. 23, pp. 1483-1495, (2009).
- [8]. Victoria, M., Querin, O. M., & Martí, P., "Generation of strut-and-tie models by topology design using different material properties in tension and compression", Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 44, No. 2, pp. 247-258, (2011).
- [9]. Amir, O., & Sigmund, O., "Reinforcement layout design for concrete structures based on continuum damage and truss topology optimization", Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 47, No. 2, pp. 157-174, (2013).
- [10]. Gaynor, A. T., Guest, J. K., & Moen, C. D., "Reinforced concrete force visualization and design using bilinear truss-continuum topology optimization", Journal of Structural Engineering, vol. 139, No. 4, pp. 607-618, (2012).
- [11]. 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. 97, No. 2, pp. 322-332, (2000).
- [12]. Nagarajan, P., & Pillai, T. M., "Development of strut and tie models for simply supported deep beams using topology optimization", Songklanakarin Journal of Science & Technology, vol. 30, No. 5, pp. 641-647, (2008).
- [13]. Lee, D. K., Yang, C. J., & Starossek, U., "Topology design of optimizing material arrangements of beam-to-column connection frames with maximal stiffness", Scientia Iranica, vol. 19, No. 4, pp. 1025-1032, (2012).
- [14]. Rozvany, G. I., "A critical review of established methods of structural topology optimization", Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 37, No. 3, pp. 217-237, (2009).
- [15]. Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N., "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", Computer Methods in

معيار وزن فولاد مصرفی کمینه و بار نهایی بیشینه می‌باشد از این رو نسبت بار نهایی به وزن میلگرد مصرفی (عدد کارایی) مدل‌ها مبنای مقایسه قرار گرفت. با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی به بررسی مدل‌های به دست آمده برای سه دیوار برشی با بازشوهاى مختلف پرداخته شد و مدل‌های به دست آمده با روش پیشنهادی با مدل‌های دارای قید ساخت و مدل‌های پیشین مقایسه گردید. نتایج حاصل از بررسی به شرح زیر می‌باشد:

۱- عدد کارایی مدل‌های به دست آمده با روش پیشنهادی نسبت به مدل‌های پیشین و مدل‌های با قید ساخت بهتر می‌باشد؛ که این نشان می‌دهد الگوهای به دست آمده از بهینه‌سازی توپولوژی چیدمان بهینه‌ی فولاد را مشخص می‌کند.

۲- میلگرد گذاری مورب اطراف بازشو نسبت به میلگرد گذاری افقی و قائم منجر به کاهش وزن میلگرد مصرفی و افزایش مقاومت نهایی می‌شود.

۳- استفاده از کسر حجمی زیاد، تعیین مدل مناسب از توپولوژی را سخت کرده و همچنین به علت محدودیت‌های که در اجرا وجود دارد وزن فولاد مصرفی مدل‌های به دست آمده با کسر حجمی زیاد بیش از وزن فولاد تسلیح مورد نیاز می‌شود.

۴- کسر حجمی ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ در مسئله‌ی بهینه‌سازی پیشنهادی، منجر به مدل‌های خرابایی بهینه می‌شود.

۵- روش مدل خرابایی یک روش محافظه‌کارانه برای طراحی می‌باشد.

۶- استفاده از مدل‌های به دست آمده از روش پیشنهادی منجر به کاهش وزن فولاد تسلیح مصرفی کل می‌شود به نحوی که وزن فولاد مصرفی در طرح نهایی به دست آمده از توپولوژی برای هر سه مسئله به ترتیب ۰/۲۸/۹، ۰/۱۳/۴ و ۰/۳۲/۵ کمتر از مدل با قید ساخت شد، که این باعث کاهش قابل توجهی هزینه‌ی میلگرد مصرفی در سازه‌های بزرگ مقیاس می‌شود.

## ۱۰- مراجع

- [1]. Hu, Qiang, M. Tyler Ley, and Bruce W. Russell., "Determining Efficient Strut and Tie Models for Simply Supported Beams Using Minimum Strain Energy", ACI Structural Journal, vol. 111, No. 5, pp. 1015-1025, (2014).
- [2]. Task Group., "Practitioners Guide to Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures", Fib Bulletin 45, pp. 265-366, (2008).

- [28]. Ley, M. T., Riding, K. A., Widiyanto, S. B., & Breen, J. E., "Experimental Verification of Strut and Tie Model Design Method", *ACI Structural Journal*, vol. 104, No. 6, pp. 749-755, (2007).
- [29]. Garber, D. B., Gallardo, J. M., Huaco, G. D., Samaras, V. A., & Breen, J. E., "Experimental Evaluation of Strut-and-Tie Model of Indeterminate Deep Beam", *ACI Structural Journal*, vol. 111, No. 1-6, pp. 1-8, (2014).
- [30]. Tjhin, T. N., & Kuchma, D. A., "Computer-based tools for design by strut-and-tie method: advances and challenges", *ACI Structural Journal*, vol. 99, No. 5, pp. 586-594, (2002).
- [31]. Tjhin, T. N., & Kuchma, D. A., "Integrated analysis and design tool for the strut-and-tie method", *Engineering Structures*, vol. 29, No. 11, pp. 3042-3052, (2007).
- [32]. Yindeesuk, S., "Design and Analysis of Complex D-Regions in Reinforced Concrete Structures", ProQuest LLC. 789 East Eisenhower Parkway, PO Box 1346, Ann Arbor, MI 48106, pp. 373-389, (2009).
- [33]. Marius, M., "Seismic behaviour of reinforced concrete shear walls with regular and staggered openings after the strong earthquakes between 2009 and 2011", *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 537-565, (2013).
- [34]. Yanz, F.V., Park, R & Paulay., "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structural Wall With Irregular Opening", *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, (1992).
- [35]. Leu, L. J., Huang, C. W., Chen, C. S., & Liao, Y. P. (2006). "Strut-and-tie design methodology for three-dimensional reinforced concrete structures", *Journal of Structural Engineering*, vol. 132, No. 6, pp. 929-938, (2013).
- [36]. Herranz, J. P., Santa Maria, H., Gutierrez, S., & Riddell, R., "Optimal strut-and-tie models using full homogenization optimization method", *ACI Structural Journal*, vol. 109, No.5, pp. 605-613, (2012).
- [37]. Bruggi, M., "Technical Papers: On the Automatic Generation of Strut and Tie Patterns under Multiple Load Cases with Application to the Aseismic Design of Concrete Structures", *Advances in Structural Engineering*, vol. 13, No. 6, pp. 1167-1181, (2010).
- Applied Mechanics and Engineering, vol. 71, No.2, pp.197-224, (1988).
- [16]. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O., "Topology optimization: theory, methods and applications", Springer, pp. 1-68, (2003).
- [17]. Sigmund, O., "Morphology-based black and white filters for topology optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 33, No. 4-5, pp. 401-424, (2007).
- [18]. Sigmund, O., "A 99 line topology optimization code written in Matlab", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, No. 2, pp. 120-127, (2001).
- [19]. Andreassen, E., Clausen, A., Schevenels, M., Lazarov, B. S., & Sigmund, O., "Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 43, No. 1, pp. 1-16, (2011).
- [20]. Sigmund, O., & Petersson, J., "Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima", *Structural Optimization*, vol. 16, No. 1, pp. 68-75, (1998).
- [21]. Diaz, A., & Sigmund, O., "Checkerboard patterns in layout optimization", *Structural Optimization*, vol. 10, No. 1, pp. 40-45, (1995).
- [22]. Rozvany, G. I., & Lewinski, T., "Topology optimization in structural and continuum mechanics", Springer, pp. 71-77, (2014).
- [23]. Edwards, C. S., Kim, H. A., & Budd, C. J., "An evaluative study on ESO and SIMP for optimising a cantilever tie—beam", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 34, No. 5, pp. 403-414, (2007).
- [24]. ABAQUS analysis user's manual 6.11-EF.
- [25]. S.-Y. Noh, W.B. Krätzig, K. Meskouris., "Numerical simulation of serviceability, damage evolution and failure of reinforced concrete shells", *Computers & Structures*, vol. 81, No. 8, pp. 843-857, (2003).
- [26]. T. Matsumura, E. Mizuno., "3-D FEM analyses on internal state inside the concrete filled steel tubular columns subjected to flexural deformation under axial loading", *Journal of Structural Engineering*, JSCE A, vol. 53, pp. 75-83, (2007).
- [27]. B. Wahalathantri, D. Thambiratnam, T. Chan, S. Fawzia., "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS", *Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing :Queensland University of Technology* pp. 260-264: (2011).

## Determination of Optimal Reinforcement Layout for Shear Wall with Opening Via Strut-and-Tie Approaches

Reza morshed

Assistant professor of civil engineering department, Yazd University

Mohammad Kamalodini\*

M.Sc. graduate of Structural Engineering, Yazd university

Nima baghadam

M.Sc. of Structural Engineering, Yazd university

### Abstract

Determination of optimal steel reinforcement layout for shear wall with opening is an important topic in designing this structural member. Strut-and-Tie Method (STM) is one way to design such members, where steel reinforcement is arranged based on the selected model. In this study, a strategy was introduced to determine optimal Strut-and-Tie model by selecting a good volume fraction in continuum topology optimization problem. The elastic strain energy was selected as the objective function to achieve the optimal pattern, and the modified Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) with continuous penalty function was used to prevent local minimum solution. Finally, By using Nonlinear Finite Element and defining qualitative and quantitative conditions for optimal STM, the resulting models, obtained with topology optimization for three shear wall with various opening, were compared with previous models and models with manufacturing constraint. The results show that, topology optimization models have the best ultimate load to steel weight ratio and get the optimal steel reinforcement layout for shear wall with opening.

**Keywords:** Shear wall with opening, Strut-and-Tie, Topology optimization, Minimum elastic strain energy, Nonlinear Finite Element.

---

\* Corresponding Author: kamalodini.mohammad@yahoo.com