

# مدلسازی ماکروسکوپیک دیوار برشی بتنی همراه با بازشوهای نامتقارن

معین رضاپور<sup>۱</sup>، مهدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه تهران

۲- استاد تمام دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

## چکیده

تاکنون المان‌های مختلفی برای مدلسازی دیوارهای برشی بتنی معرفی شده‌اند که به دو دسته کلی میکروسکوپی (ریزمدل) و ماکروسکوپی (درشت مدل) دسته‌بندی می‌شوند. المان‌های ماکروسکوپی در مقایسه با المان‌های ریز مدل درجه آزادی کمتری دارند و از این رو زمان کمتری برای تحلیل نیاز دارند. در این مقاله نوعی خاص از المان‌های با نام Multiple-Vertical-Line-Element-Model که از نوع اجزاء ماکروسکوپی می‌باشد و به صورت اختصاری MVLEM می‌نامند، برای مدلسازی دیوار برشی بتنی استفاده شده است. این المان‌ها رفتار دیوارهای برشی ساده را به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، اما هنگامی که بازشویی در دیوار تعبیه شود کارایی مناسبی ندارد. در این مقاله از MVLEM اصلاح شده برای مدلسازی دیوار برشی بتنی همراه با بازشوهای نامتقارن استفاده شده است. بدین منظور یک دیوار برشی بتنی تجربی با بازشوهای نامتقارن انتخاب شد و با استفاده از روش اجزای محدود میکروسکوپی در نرم افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد. پس از راستی‌آزمایی دیوار تحت درشت مدلسازی در نرم افزار آباکوس قرار گرفت. در این مدل روشی برای درشت مدلسازی رفتار تیر پیوند پیشنهاد شد که بر اساس دیاگرام توزیع لنگر در تیر می‌باشد. در دیوار برشی با بازشوهای نامتقارن تیر پیوند به صورت یک دیوار برشی ساده مدلسازی شده است که پایه آن به دیوار اصلی متصل است. پس از مدلسازی تیر پیوند سه روش مختلف برای اتصال این تیر به بدنه اصلی دیوار پیشنهاد شد. این پژوهش شامل یک دیوار ریز مدل با بازشوهای نامتقارن، سه دیوار درشت مدل است. تفاوت اصلی دیوارهای ماکروسکوپی در چگونگی اتصال تیر پیوند به دیوار برشی است که اساس آن تفاوت در میزان سختی اتصال است. به منظور بررسی میزان دقت مدل‌های پیشنهادی، دیوارهای ماکروسکوپی و میکروسکوپی تحت بارگذاری استاتیکی، شبه دینامیکی قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصله از تحلیلهای مذکور، مدل‌ها رفتار قابل قبولی از خود نشان دادند. میزان سختی اتصال سبب شد که رفتار مدل‌های درشت مدل با یکدیگر متفاوت باشد، اما رفتار مدلی که در آن سختی اتصال در حد میانه بود بیشترین دقت را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان داد.

**کلمات کلیدی:** دیوار برشی بتنی؛ مدلسازی ماکروسکوپی؛ بازشوی نامتقارن؛ تیر پیوند؛ روش اجزاء محدود

## ۱- مقدمه

زمین لرزه از مهمترین عوامل طبیعی در تخریب سازه های عمرانی در طول تاریخ بوده است. این پدیده بیشتر به صورت جانبی به سازه وارد می شود و رفتار آن تا حد بسیار زیادی غیر قابل پیش بینی است. مهندسين تا کنون راهکارهای بسیاری را برای محفوظ نگه داشتن سازه از آسیبهای ناشی از زلزله پیشنهاد داده اند که از این میان می توان به بادبندها، میراگرهای، جداگرها و ... اشاره کرد. در میان سیستم های پیشنهادی دیوارهای برشی بتنی جایگاه ویژه ای دارند. این دیوارها به راحتی در سازه های متعارف قابل اجرا هستند و می توانند بخش قابل توجهی از انرژی زمین لرزه را جذب و به شیوه ای مطمئن به زمین منتقل کنند. دیوارهای برشی بتنی بر اساس ابعاد و هندسه مقطع خود رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند، که این رفتارها تأثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار کل سازه دارند. در برخی موارد، به علت محدودیت های معماری، تعبیه بازشوهایی در دیوار برشی اجتناب ناپذیر می شود.

از آنجا که دیوار برشی بتنی بخش قابل توجهی از انرژی زلزله را جذب می کند، درستی رفتار آن در مدلسازی بسیار حائز اهمیت است. استفاده از مدل های میکروسکوپیک یکی از دقیق ترین روش های مدلسازی این دیوارها است. اما با وجود دقت مناسب، نیاز به زمان زیادی برای تحلیل به ویژه تحلیل های غیرخطی دارد. در این مقاله تمرکز مطالعات روی ارائه مدل هایی است که بتواند با صرف زمان بسیار کمی نتایج قابل قبولی از رفتار غیرخطی دیوارهای برشی بتنی ارائه دهد. این مدلها به صورت ماکروسکوپیک معرفی می شوند که در آنها ابعاد ماتریس سختی نسبت به مدل های میکروسکوپیک بسیار کوچکتر است. به همین علت زمان بسیار کمتری برای تحلیل نیاز دارند [1].

تاکنون المان های ماکروسکوپیک بسیاری برای مدلسازی دیوار برشی بتنی ارائه شده است که در حالت کلی می توان آنها را در شش مدل معرفی کرد [2]. یکی از این مدل های پایه توسط کبایاکسوا و همکاران معرفی شد. آنها در درشت مدلسازی از دو فنر غیر خطی قائم در دو انتهای مدل، یک فنر

پیچشی در وسط مدل و یک فنر افقی به منظور مدلسازی رفتار برشی دیوار استفاده کردند [3]. مدل آنها توسط ولکانو و همکاران اصلاح شد و با نام Multiple-Vertical-Line-Element-Model بو به صورت اختصاری MVLEM ارائه شد [4]. در این مدل فنر پیچشی به طور کامل حذف شد و رفتار محوری و خمشی تنها به وسیله المان های غیرخطی قائم شبیه سازی شد. در المان MVLEM مانند مدل قبلی یک فنر افقی وجود دارد که رفتار برشی دیوار را شبیه سازی می کند. المان MVLEM نسبت به سایر المانها دقت قابل قبولی در مدلسازی رفتار دیواربرشی دارد. از این رو این مدل مورد توجه محققان قرار گرفت. اوراکال و همکاران به منظور بهبود رفتار المان های MVLEM رفتارهای غیرخطی چرخه ای مصالح را برای المان های قائم و افقی در نظر گرفتند. [5-7]. شعبانی و کیومرثی همچنین تحقیقی در مورد استفاده از MVLEM اصلاح شده برای شبیه سازی رفتار غیرخطی یک دیوار بنایی جفت شده انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که این عنصر اصلاح شده قادر به مدلسازی دیوار بنایی با دقت قابل قبولی است [8]. کلاواریو همکاران نیز از المان های MVLEM برای مدلسازی دیوارهای برشی بتنی سه بعدی استفاده کردند. دیوارهای مدل شده توسط آنها به صورت U شکل و T شکل بود [9]. اسماعیل تبار نیز رفتار مواد و تکنیک مدلسازی تحلیلی و تأثیر آنها بر دقت مدل ماکروسکوپی را مورد مطالعه قرار دارد [10]. دیوارهای برشی که تاکنون مورد مطالعه قرار گرفتند بیشتر دیوارهای منظمی بودند که در آنها بازشویی وجود نداشت. رضاپور و قاسمیه در مطالعاتشان رفتار یک دیوار برشی بتنی با بازشوهای متقارن را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نشان دادند که دیاگرام لنگر در تیر پیوند تأثیر مهمی در شکل و اندازه المان های MVLEM دارد [11]. از آنجا که وجود بازشو و همچنین مکان آن در دیوارهای برشی تأثیر بسیار زیادی در رفتار کلی دیوار برشی بتنی دارد، نمی توان از تأثیر آن صرف نظر کرد. مطالعات کمی نیز روی درشت مدلسازی دیوارهای برشی همراه با بازشو و تأثیر بازشو در روش مدلسازی مطرح شده است. از اینرو در این مقاله ارائه یک روش مدلسازی جدید به منظور درشت

۲۴۴ کیلونیوتون به بالای ستون‌ها وارد می‌شود. این دو بار قائم ثابت نبوده و در طول بارگذاری تغییر می‌کنند. بدین صورت که به هر میزانی که بار جانبی (V) به دیوار وارد می‌شود، به میزان 0.42V به بار قائم اضافه و کم می‌شود. این موضوع در شکل (۱) به صورت دو فلش معکوس در بالای ستون‌ها نشان داده شده است. بارگذاری جانبی اعمالی به دیوار به صورت یک پروتکل چرخه‌ای است. این پروتکل شامل ۶ جابه‌جایی طبقه  $\pm 0.04\%$ ،  $\pm 0.1\%$ ،  $\pm 0.25\%$ ،  $\pm 0.5\%$ ،  $\pm 0.75\%$ ،  $\pm 1.0\%$  می‌باشد که هر کدام از آنها دوبار تکرار می‌شوند. در جداول (۱ و ۲) به ترتیب چگونگی آرماتورگذاری و همچنین مشخصات مکانیکی فولاد در دیوار برشی آزمایشگاهی ارائه شده است. بتن مورد استفاده در این دیوار دارای مقاومت کششی  $2/2$  و مقاومت فشاری  $28/9$  مگاپاسکال است و مدول الاستیسیته یانگ آن  $26$  گیگاپاسکال است [13].

## ۲-۱- مدلسازی

این پژوهش شامل دو روش میکروسکوپی و ماکروسکوپی برای مدلسازی دیوار برشی بتنی است. در ریزمدلسازی از المان‌های کوچک به تعداد زیاد به منظور شبیه‌سازی رفتار دیوار برشی استفاده می‌شود. در صورتی که در درشت مدلسازی از المان‌هایی با ابعاد بزرگتر و ویژگی‌های خاص برای مدلسازی بهره گرفته می‌شود.

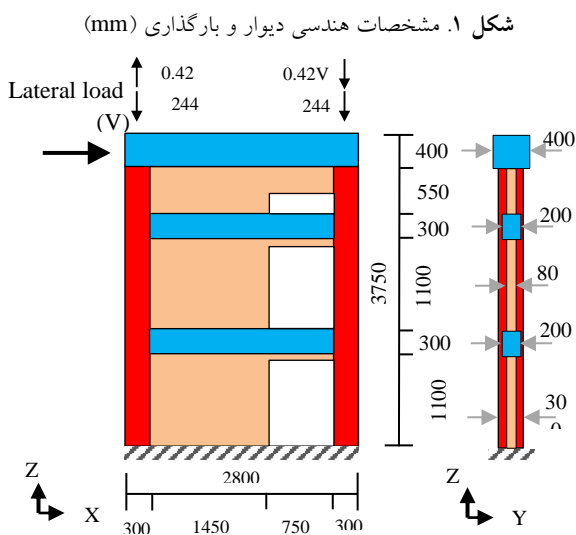


Fig. 1. Geometry and loading properties (mm)

مدلسازی یک دیوار برشی بتنی همراه با بازشوهای نامتقارن ارائه شده است. مرتضوی و همکار نیز روی مدلسازی ماکروسکوپی یک دیوار برشی بتنی با بازشوهای نامتقارن مطالعاتی را انجام داده اند که در آن چگونگی اتصال تیر پیوند به دیوار از حالات محدودی استفاده شد [12]. همچنین در مدل آنها اثر تغییر ضخامت دیوار بر مدلسازی در نظر گرفته نشد، که این دو موضوع به شکل دقیق‌تری در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش، تأثیر توزیع لنگر بر مدلسازی تیر پیوند و چگونگی اتصال آن به بدن اصلی دیوار بررسی می‌شود. سه روش برای اتصال تیر پیوند به دیوار مطرح می‌شود که جامع‌تر از مدل‌های ارائه شده توسط مرتضوی است. بر این اساس، یک دیوار برشی بتنی با بازشوهای نامتقارن به وسیله المان‌های ریزمدل در نرم‌افزار آباکوس با مدل آزمایشگاهی راستی‌آزمایی می‌شوند. سپس رفتار درشت مدل پیشنهادی برای این دیوار با مدل عددی ریزمدل درستی‌آزمایی شده مقایسه می‌شود و میزان دقت آن بر اساس چندین پارامتر بررسی می‌شود.

## ۱-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار مدل‌های ماکروسکوپی در مقایسه با مدل میکروسکوپی، دیوار برشی بتنی آزمایشگاهی انتخاب شد و به وسیله المان‌های ریزمدل تحت مدلسازی عددی و راستی‌آزمایی قرار گرفت. پس از اطمینان از درستی رفتار مدل عددی میکروسکوپی، مدل‌های ماکروسکوپی پیشنهادی با آن از نظر پارامترهای مختلفی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه دارای بازشوهای نامتقارنی می‌باشد و در مقیاس  $0/4$  اندازه واقعی خود در دانشگاه کیوتو توسط وارشینا و همکاران ساخته شده و مورد بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت [13]. مشخصات دیوار برشی بتنی مورد مطالعه از نظر هندسه در شکل (۱) ارائه شده است. مطابق با این شکل بازشوهای این دیوار به صورت نامتقارن هستند و دو بازشو با ابعاد مشابه و یک بازشو کوچک در بالاترین تراز آن تعبیه شده است. به منظور شبیه‌سازی بار وزن طبقات بالایی، دو بار قائم به میزان

بتن به صورت محصور نشده است. در ریزمدلسازی نیازی به شبیه‌سازی محصورشدگی نیست، زیرا محصورسازی توسط خاموت‌های موجود در ستون‌های خود به خود ایجاد می‌شود. از این رو نیاز به در نظر گرفتن محصورسازی در مدل میکروسکوپی نیست و به همین علت میزان ضریب  $k$  در مدل عددی میکروسکوپی برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. اما در مدل‌های ماکروسکوپی (به خاطر عدم وجود اثر خاموت) نیاز به شبیه‌سازی مستقیم رفتار محصورشدگی است. به همین علت در مدل‌های عددی ماکروسکوپی برای نواحی که بتن محصور است عدد  $k$  بیشتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود. در حالت نرم شوندگی معادله رفتاری بتن در فشار به صورت خطی و نزولی است و معادله آن مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$f_c = k \cdot f_c' [1 - Z_m (\varepsilon_c - \varepsilon_0 \cdot k)] \quad \varepsilon_c > k \varepsilon_0 \quad (2)$$

عبارت  $Z_m$  شیب این خط را تعیین می‌کند و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Z_m = \frac{0.5}{\left[ \left( \frac{3 + 0.29 f_c'}{145 f_c' - 1000} \right) + 0.75 \rho_v \sqrt{\frac{b}{s}} - \varepsilon_0 \cdot k \right]} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_v$  نسبت حجم محصورسازی است. در درشت مدلسازی، رفتار بتن‌های محصور شده نقش مهمی ایفا می‌کنند، بنابراین ارائه رفتار برای مدل‌های محصور شده بسیار حائز اهمیت است. مطابق با روابط ۱ تا ۳ آنچه که رفتار محصور شده را در بتن تعیین می‌کند، ضریب  $k$  است. همانطور که ذکر شد؛ میزان این ضریب بزرگتر-مساوی یک است و عدد ۱ نشان دهنده عدم وجود محصورشدگی در بتن است و هر چه این عدد از یک بزرگتر باشد، میزان محصورشدگی بتن بیشتر می‌شود. میزان ضریب  $k$  به تراکم خاموت‌ها نیز بستگی دارد. هرچه فاصله این خاموت‌ها از هم کمتر باشد، ضریب  $k$  بیشتر است. اسکات و همکارانش معادله زیر را برای محاسبه عددی ضریب  $k$  پیشنهاد کرد [15]:

$$k = 1 + \rho_v \frac{f_{sy}}{f_c'} \quad (4)$$

جدول ۱. چگونگی چینش میلگردها در دیوار بتنی [۱۳]

Item	Main reinforcement	Hoop reinforcement
Side column	8-D19	2- $\Phi$ 10@75
Beam	2-D13	2- $\Phi$ 6@100
Loading beam	2-D19	2-D10@100
Wall reinforcement	D6@100	D6@100
Reinforcing bar of opening (vertical)	1-D16	...
Reinforcing bar of opening (horizontal)	2-D13	...

Table 1. Arrangement the rebars in the concrete wall

جدول ۲. مشخصات مکانیکی میلگردهای دیوار [۱۳]

Reinforcement size	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
D6	204	425	538
D10	180	366	509
D13	189	369	522
D16	194	400	569
D19	183	384	616
$\Phi$	197	985	1143

Table 2. Mechanical properties of wall rebars

### ۳-۱- مدلسازی مصالح

دیوارهای برشی متشکل از ماده بتنی (بدنه اصلی دیوار) و فولادی (آرماتورها) هستند، که شبیه‌سازی صحیح این دو ماده تأثیر قابل ملاحظه‌ای در رفتار نهایی مدل دارد. به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن لازم است از یک معادله برای پیش‌بینی رفتار یک‌طرفه بتن استفاده شد. در این مقاله از مدل ارائه شده توسط کنت و پارک به منظور شبیه‌سازی رفتار بتن به کار گرفته شد [14]. در محدوده فشاری این مدل شامل دو قسمت صعودی و نزولی است که قسمت صعودی به صورت یک معادله درجه ۲ است و مطابق با رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$f_c = k \cdot f_c' \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0 k} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 k} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_c \leq k \varepsilon_0 \quad (1)$$

که در آن  $\varepsilon_c$  کرنش طولی بتن،  $\varepsilon_0$  کرنش معادل در مقاومت فشاری ( $f_c'$ ) برای بتن محصور نشده و  $k$  ضریب اثر محصورسازی است که میزان آن بزرگتر مساوی با یک است. رابطه ۱ برای هر دو حالت محصور شده و نشده صادق است و این ضریب  $k$  است که اثر محصورشدگی را در مدل رفتاری بتن ایجاد می‌کند. اگر ضریب  $k$  برابر با یک باشد، آنگاه رفتار

$$f_t = \frac{f_t'}{1 + \sqrt{200\varepsilon_t}} \quad \varepsilon_t > \varepsilon_{ct} \quad (6)$$

که در آن کرنش طولی بتن در کشش است و  $\varepsilon_{ct}$  کرنش معادل بتن در تنش حداکثر ( $f_t'$ ) است. در این پژوهش از مدل رفتاری پلاستیسیسته آسیب (CDP) برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای بتن استفاده شده است. از ویژگی‌های مدل CDP توانایی آن در مدل‌سازی اجسام ترد تحت بارگذاری چرخه‌ای و دینامیکی است [17, 18]. در مدل CDP آسیب‌های ناشی از ترک خوردگی و خردشدگی به وسیله دو پارامتر آسیب  $d_t$  و  $d_c$  به ترتیب معرفی می‌شوند. مقدار این دو پارامتر بین صفر و یک تعریف می‌شود. عدد صفر بیانگر عدم آسیب بتن است و عدد ۱ نشان دهنده خردشدگی کامل در فشار و یا ترک خوردگی کامل در کشش است. ضرایب آسیب کششی و فشاری از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند:

$$d_c = \frac{f_c' - f_c}{f_c'} \quad (7)$$

$$d_t = \frac{f_t' - f_t}{f_t'} \quad (8)$$

مقادیر آسیب در دو معادله فوق تنها در محدوده نرم‌شوندگی تعریف می‌شوند و در سایر نواحی مقدار آنها برابر با صفر است.

#### ۴-۱- ریزمدلسازی (اجزاء محدود)

به منظور بررسی رفتار غیر خطی مدل‌های ماکروسکوپی، ابتدا دیوار برشی بتنی با المان‌های میکروسکوپی مدلسازی و رفتار آن با مدل تجربی راستی آزمایی می‌شود. المان مورد استفاده در مدل‌های میکروسکوپی شامل ۲ المان مکعبی و میله‌ای است. شبکه‌های مکعبی بخش بتنی دیوار را مدلسازی می‌کنند و از نوع C3D8 با هشت گره می‌باشند. شبکه‌های میله‌ای برای مدلسازی میلگردهای درون دیوار برشی استفاده می‌شود و از نوع t3D2 می‌باشند. این المان‌ها تنها رفتار محوری را مدل می‌کنند و دو گره در ابتدا و انتهای آنها در نظر گرفته شده است. به منظور ایجاد چسبندگی بین بتن و میلگردهای فولادی از اندرکنش ناحیه مدفون استفاده شده است. این

که در آن  $f_{sys}$  مقاومت تسلیم خاموت است و میزان  $\rho_v$  نسبت حجم محصورسازی به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho_v = \frac{A_{sw} l_w}{b_c h_c s} \quad (5)$$

که در آن  $A_{sw}$  مساحت سطح مقطع خاموت و  $b_c \times h_c$  مساحت مقطعی که در آن بتن به صورت موثر محصور شده است را تعریف می‌کند. در بتن محصور شده هیچگاه تنش به صفر نمی‌رسد و میزان آن از  $0.2k f_c'$  کمتر نمی‌شود. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جداول (۱ و ۲) میزان عدد  $k$  برای دیوار بتنی مورد مطالعه برابر با ۱,۳۱ در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) معادله رفتار بتن تحت فشار برای دو حالت محصور شده و نشده نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود رفتار بتن محصور شده تفاوت زیادی با مدل محصور نشده دارد. مطابق با آن، محصورسازی سبب افزایش مقاومت و جذب انرژی در بتن می‌شود.

شکل ۲. رفتار بتن محصور شده و محصور نشده در فشار

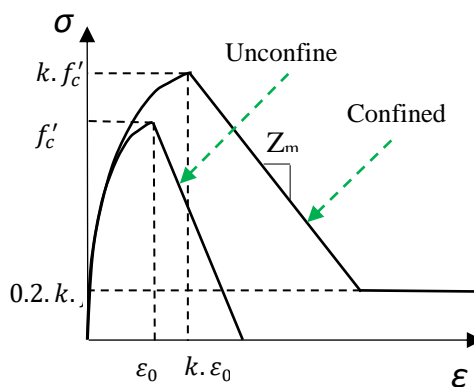


Fig. 2. Confined and unconfined concrete behavior in compression

محصورسازی تأثیری بر رفتار کششی بتن ندارد و بتن محصور شده در کشش رفتاری کاملاً مشابه با بتن محصور نشده از خود نشان می‌دهد. مدول الاستیسیته یانگ بتن در کشش برابر با مدول الاستیسیته در فشاری است و تفاوتی ندارد. بتن در کشش پس از رسیدن به حد نهایی خود در تنش دچار نرم‌شوندگی می‌شود و رفتار آن مطابق با رابطه ارائه شده توسط سلبی و وچو تعریف می‌شود [16]:

است. بر اساس نتایج تجربی دیوار میانی و تیر پیوند بیشترین آسیب کششی را تجربه می‌کنند. همچنین بر اساس شکل مذکور پای ستون‌ها نیز از نقاط مستعد ترک خوردگی است. در مدل‌های عددی این آسیب‌ها به صورت رنگ‌های آبی تا قرمز نشان داده شده است. رنگ قرمز نشان‌دهنده آسیب کششی زیاد (تقریباً ترک خوردگی کامل) و رنگ آبی نشان‌دهنده عدم آسیب است.

شکل ۵. آسیب کششی مدل عددی و تجربی در جابجایی طبقه ۰/۷۵ درصد

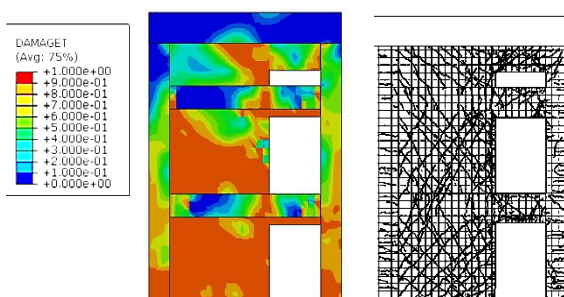


Fig. 5. Tensile damage at the 0.75 drift for FEM and experiment models

### ۱-۵- توصیف مدل ماکروسکوپی

در این مقاله به منظور درشت مدلسازی دیوار برشی بتنی کوبله از مدل Multiple-Vertical-Line-Element (MVLEM) استفاده شده است. این المان‌ها دارای سه بخش کلی شامل المان‌های قائم (مسئول شبیه‌سازی رفتار محوری و خمشی)، المان افقی (مسئول شبیه‌سازی رفتار برشی) و دو تیر صلب هستند [5, 19]. مطابق شکل (۶) المان‌های قائم به تیرهای صلب بالا و پایین متصل می‌شوند. چگونگی اتصال این المان‌ها به تیرهای صلب به صورت نیم‌مفصل است. از این رو هر کدام از این المان‌های قائم از خود تنها رفتار محوری نشان می‌دهند. به منظور اختصاص رفتار محوری غیر خطی مناسب به هر کدام از این المان‌های قائم، مقطع دیوار برشی مورد نظر به چندین ناحیه مطابق شکل (۶) تقسیم‌بندی می‌شود. هر کدام از این المان‌های قائم رفتار بخش مربوط به ناحیه خود را شبیه‌سازی می‌کنند. سختی محوری آنها برابر با رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود که موازی بودن این دو را نشان می‌دهد:

اندرکنش می‌تواند یک ناحیه را درون یک ناحیه دیگر پیوند دهد و رفتاری یک پارچه از نظر تغییر شکل بین دو ناحیه ایجاد کند. مطابق شکل (۳) اندازه شبکه‌های بکار گرفته شده در مدل‌های ریزمدل معمولاً ۱۰۰ میلی‌متر است.

شکل ۳. شبکه‌بندی ریزمدل دیوار برشی بتنی

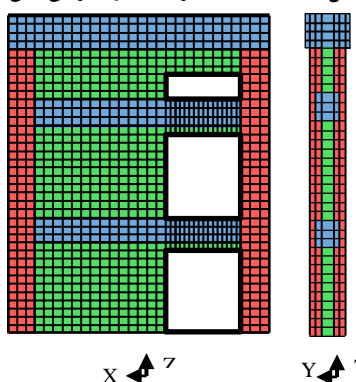


Fig. 3. Microscopic mesh of the shear wall

پس از مدلسازی، بار چرخه‌ای به تیر بارگذاری اعمال می‌شود. پروتکل بارگذاری اعمال شده به مدل عددی مشابه با مدل تجربی می‌باشد. در شکل (۴) منحنی هیستریزیس مدل عددی میکروسکوپی در کنار مدل تجربی ارائه شده است. ریزمدل دارای رفتار غیر خطی قابل قبولی نسبت به دیوار آزمایش می‌باشد. در این مقاله دیوار برشی بتنی با المان‌های میکروسکوپی ASW نامگذاری شده است.

شکل ۴. هیستریزیس مدل اجزاء محدود و تجربی

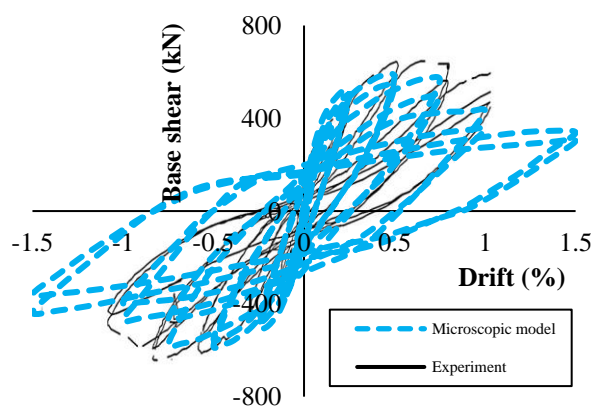


Fig. 4. Hysteresis of FEM and experiment models

به منظور اطمینان از درستی رفتار غیرخطی ریزمدل در شکل (۵) آسیب کششی مدل آزمایشگاهی (ترک خوردگی) با میکروسکوپی در جابجایی طبقه ۰/۷۵ درصد مقایسه شده

در این مقاله، درشت مدلسازی برای دیوار برشی بتنی به وسیله نرم افزار آباکوس انجام شده است. بدین منظور در مدل‌های ماکروسکوپی از صفحات صلب به عنوان تیرهای المان MVLEM استفاده شد. شبکه مورد استفاده در این صفحات از نوع shell با چهار گره و انتگرال کاهش یافته (S4R) می‌باشد. فنرهای قائم و افقی نیز به وسیله المان‌های 3D truss با دو نقطه (t3D2) مدل شده‌اند.

در این پژوهش به جای فنرهای افقی نیز از المان‌های truss استفاده شده است. این المان افقی وظیفه شبیه‌سازی رفتار برشی دیوار را بر عهده دارد و دارای رفتاری غیر خطی است. این رفتار شامل سه قسمت کلی است که هر کدام حالت خاصی از MVLEM را مدل می‌کند. در قسمت اول رفتار برشی به صورت کاملاً خطی است و هیچگونه ترکی در آن در نظر گرفته نمی‌شود. در قسمت دوم سختی برشی کاهش می‌یابد و علت آن بروز ترک‌های برشی در دیوار است. در قسمت سوم نیز سختی دوباره کاهش می‌یابد و این امر ناشی از تسلیم شدن است. رفتار المان افقی به گونه‌ای است که هیچ اثری در ایجاد تغییر شکل ماندگار ندارد. زیرا سختی این المان در هنگام باربرداری به گونه‌ای است که از نقطه مبدا خود عبور می‌کند. در واقع در المان‌های MVLEM میله‌های قائم مسئول ایجاد تغییر شکل ماندگار در دیوار برشی هستند.

آنچه که در شکل (۶) مشاهده شد، نمونه‌ای از درشت مدلسازی یک دیوار برشی ساده بود. اما دیوار برشی بتنی همراه با بازشو را نمی‌توان به این شکل مدل کرد. دیوار برشی کوپله دارای تیر پیوند است که این تیر دو طرف دیوار برشی بتنی را به یکدیگر متصل می‌کند. بنابراین برای مدلسازی این نوع از دیوارها باید دو طرف آنها را به صورت دیوار برشی ساده در نظر گرفت و به وسیله تیر پیوند به یکدیگر متصل کرد. چگونگی مدلسازی و اتصال تیر پیوند نیز بخش مهمی از درشت مدلسازی دیوار برشی کوپله است.

#### ۱-۵-۱- مدلسازی دیوارهای اطراف بازشو

در این مقاله، مدلسازی دیوارهای اطراف بازشو تقریباً مانند مدلسازی یک دیوار بدون بازشو است. مهمترین تفاوت

$$k_i = \frac{E_c A c_i}{L} + \frac{E_s A s_i}{L} \quad (9)$$

که در آن  $E_c$  و  $E_s$  به ترتیب مدول الاستیسیته یانگ بتن و فولاد،  $A_{c_i}$  و  $A_{s_i}$  به ترتیب مساحت مقطع بتن و فولاد در ناحیه  $i$  ام و  $L$  ارتفاع المان MVLEM هستند.

شکل ۶. مدلسازی یک دیوار برشی ساده به وسیله المان‌های

ماکروسکوپی MVLEM

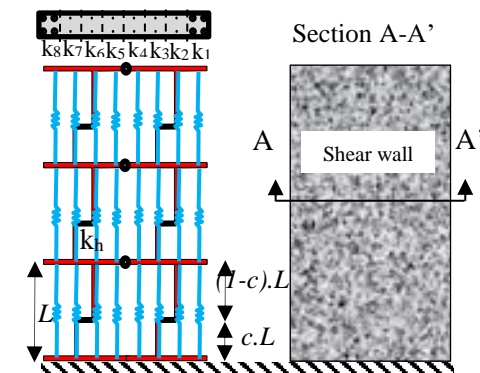


Fig. 6. Modeling of a simple shear wall by MVLEM

المان افقی رفتار برشی دیوار را مدل می‌کند و در هر المان MVLEM تنها یک المان افقی وجود دارد. رفتار این المان شامل سه قسمت: ناحیه الاستیک، ناحیه ترک خوردگی و ناحیه تسلیم کامل است. در المان افقی تغییر شکل ماندگار وجود ندارد و در باربرداری به شکل اولیه خود برمی‌گردد [3].

پارامتر مهم دیگری که روی دقت المان MVLEM تأثیر زیادی دارد ارتفاع قرارگیری المان افقی است. دوران نسبی بین تیرهای صلب بالا و پایین المان، حول نقطه‌ای که المان افقی در آن قرار دارد رخ می‌دهد. دوران‌ها و تغییر مکان‌های عرضی بر مبنای انحنای دیوار هستند، که مرکز این انحنا در ارتفاع  $c.L$  در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶).

ولکانو بر مبنای مقایسه پاسخ مدل با نتایج آزمایشگاهی، هنگامی که دیوار متحمل تغییر شکل‌های غیرخطی می‌باشد مقدار  $0/4$  را به عنوان مقدار متوسط ضریب مرکز دوران برای کل دامنه بارگذاری پیشنهاد نمود [20]. در این مقاله نیز از  $0/4$  برای ضریب ارتفاع  $c$  استفاده شده است.

سانتی‌متر و ۳۰ سانتی متر دیگر دارای ضخامت ۲۰ سانتی‌متری است. برای درشت مدلسازی این دو ناحیه ۲ روش پیشنهاد شد (شکل ۸).

شکل ۷. تقسیم‌بندی نواحی مختلف دیوار برشی بتنی

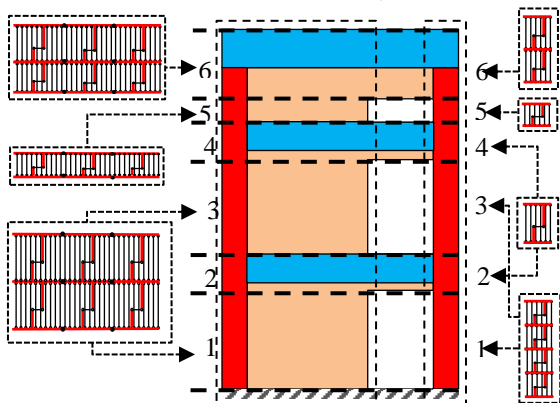


Fig. 7. Division of the shear wall into different parts

شکل ۸. روش‌های مدلسازی قسمت‌های ۲ و ۴ از دیوار برشی

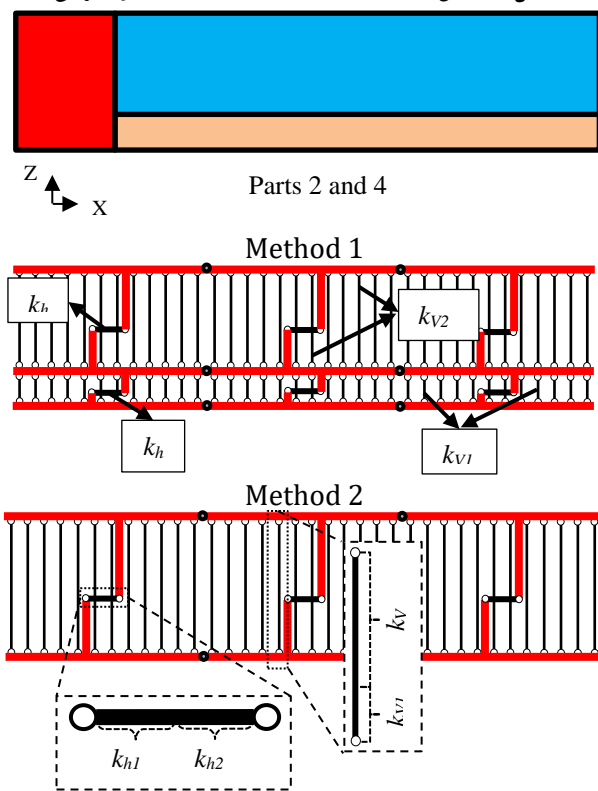


Fig. 8. Modeling methods of parts 2 and 4

در روش اول دو تراز برای نواحی ۲ و ۴ در نظر گرفته شده است که ارتفاع تراز پایینی برابر با ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع تراز بالایی برابر با ۳۰ سانتی‌متر است. در روش اول نسبت ارتفاع به طول برای MVLEM‌هایی که در تراز پایینی قرار

این روش با مدلسازی دیوارهای برشی معمولی در تقسیم‌بندی نواحی مختلف دیوار برای جایگذاری المان‌های MVLEM است. در دیوارهای معمولی به راحتی می‌توان ابعاد دلخواهی برای MVLEM انتخاب کرد، اما در دیوار برشی مورد مطالعه تقسیم بندی نواحی دارای محدودیت‌هایی است که توسط بازشوها تعیین می‌شود. بدین منظور مطابق شکل (۷)، دیوار به ۶ ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود. در هر کدام از این نواحی متناسب با مقطع دیوار المان MVLEM مناسب انتخاب و جایگذاری می‌شود. مطابق شکل (۷) برای نواحی ۱ و ۳ تعداد دو تراز در نظر گرفته شده که در هر تراز ۳ المان MVLEM در کنار یکدیگر قرار داده شده است. بنابراین برای مدلسازی هر کدام از نواحی ۱ و ۳ در مجموع تعداد ۶ المان MVLEM در نظر گرفته شده است. اندازه هندسی در ناحیه ۵ به گونه‌ای است که نسبت ارتفاع به طول المان‌های MVLEM برای درشت مدلسازی مناسب نیست. برای آنکه المان‌های MVLEM در این ناحیه دارای نسبت ارتفاع به طول نزدیک به یک باشند، باید تعداد المان‌های MVLEM را در یک تراز افزایش داد. با این روش تعداد المان‌های MVLEM در کل سازه افزایش می‌یابد. از آنجا که بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در ریزمدلسازی این ناحیه کمتر دچار تخریب شده است از استفاده از المان‌های MVLEM با نسبت ارتفاع به طول برابر با یک در ناحیه ۵ صرف نظر شده است و تنها از سه المان MVLEM در یک تراز استفاده شده است. نواحی ۲ و ۴ در اتصال با تیر پیوند هستند. ناحیه ۶ در دیوار برشی مورد مطالعه از ۲ تراز با ضخامت‌های مختلف تشکیل شده است. ارتفاع تراز اول برابر با ۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع تراز دوم برابر با ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. این دو ارتفاع به گونه‌ای انتخاب شده اند که مرز بین دو تراز در ناحیه ۶ دقیقاً مرز بین تیر بارگذاری و دیوار برشی باشد.

مطابق شکل (۸) در این ناحیه تعداد ۳ المان در هر تراز (در مجموع ۶ المان) در نظر گرفته شده است. نواحی ۲ و ۴ نسبت به نواحی دیگر دارای پیچیدگی بیشتری هستند. در این دو ناحیه ضخامت دیوار تغییر می‌کند. ارتفاع این ناحیه ۴۰ سانتی‌متر است که ۱۰ سانتی‌متر از آن دارای ضخامت ۸



بسیار کمتر از سختی جانبی سمت چپ آن است، می توان گفت که لنگر در سمت راست تیر به طور تقریبی صفر و در سمت چپ آن لنگر بیشینه است. در دیوارهای برشی بتنی معمولی تحت بار جانبی میزان لنگر در بالای دیوار صفر است در پای دیوار به بالاترین حد خود می رسد. از این رو تیر پیوند به صورت یک دیوار برشی بتنی معمولی مدلسازی می شود که بالای دیوار نقطه A و پایین دیوار نقطه B است. در شکل (۱۰) تیر پیوند توسط المان های ریزمدل و MVLEM مدلسازی شده است و تحت بار جانبی قرار گرفته است. در درشت مدلسازی دو المان MVLEM روی یکدیگر قرار داده شده اند. رفتار این دو روش مدلسازی در شکل (۱۱) نشان داده شده است که بر اساس آن رفتار غیرخطی مدل ماکروسکوپی به مدل میکروسکوپی نزدیک است.

شکل ۹. توزیع لنگر در تیر پیوند و معادلسازی آن با دیوار برشی ساده

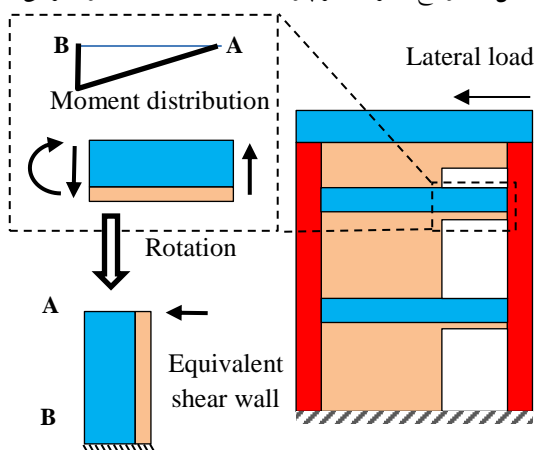


Fig. 9. Moment distribution in the coupling beam and its equation with a simple shear wall

شکل ۱۰. درشت مدلسازی تیر و بارگذاری آن

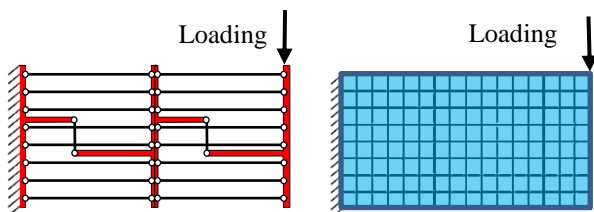


Fig. 10. Macroscopic modeling of the beam and its loading

در بخش های قبلی شیوه مدلسازی تیر پیوند و دیوارهای میانی به طور کامل بیان شد. بر اساس نتایج بدست آمده المان های

دارند برابر با  $0.2$  است که از عدد یک فاصله زیادی دارد. مطابق با تحلیل دیوار ریزمدل در نواحی ۲ و ۴ رفتار غیر خطی رخ می دهد بنابراین دقت درشت مدلسازی در این دو ناحیه مهم است و نمی توان از المان هایی با نسبت ارتفاع به طول  $0.2$  استفاده کرد. بنابراین استفاده از المان های MVLEM معمولی در نواحی ۲ و ۴ قابل قبول نیست. از این رو باید یک المان اصلاح شده معرفی شود. مطابق شکل (۸) در المان اصلاح شده به جای بکارگیری آن دو تراز تنها از یک تراز استفاده شده است. علاوه بر این تفاوت اصلی المان اصلاح شده با المان MVLEM معمولی در مشخصات هندسی میله های قائم است. در المان های MVLEM معمولی مساحت سطح مقطع میله های قائم در طول آن ثابت است. اما در المان MVLEM اصلاح شده مساحت سطح مقطع میله ها در طول آن تغییر میکند. مطابق شکل (۸) سطح مقطع میله های قائم در المان اصلاح شده در  $10$  سانتی متر اول آن کمتر از سطح مقطع آن در  $30$  سانتی متر بالا در نظر گرفته شده است. به عبارت در المان اصلاح شده سختی میله های قائم برابر اتصال سری  $kv1$  و  $kv2$  است و همچنین سختی فنر افقی در المان اصلاح شده برابر اتصال سری  $kh1$  و  $kh2$  است. به منظور مدلسازی ستون سمت راست دیوار برشی مطابق شکل (۷) از چهار تراز که در هر تراز یک المان MVLEM وجود دارد، استفاده شد. در ناحیه ای که ستون با تیر پیوند متصل شده است (قسمت ۲ و ۴) یک المان بکار گرفته شد. ناحیه ۵ در ستون نیز دارای یک المان است و ناحیه ۶ ستون دارای دو تراز است که هر تراز متشکل از یک المان است.

### ۱-۵-۲- مدلسازی تیرهای پیوند و اتصال آنها به دیوار

مهمترین قسمت های دیوار برشی بتنی، تیرهای پیوند آن است که دو سمت دیوار برشی بتنی را به یک دیگر متصل می کنند. توزیع لنگر روی تیر پیوند یک عامل تعیین کننده در رفتار و مود شکست تیر است. شکل (۹) چگونگی توزیع لنگر روی تیر پیوند در دیوار برشی را نشان داده است. در این دیوار از آنجا که سختی جانبی سمت راست دیوار (ستون ها)

دیوار میانی (در نواحی ۲، ۴ و ۶ در شکل ۷) افزایش می‌یابد. برای رفع این مشکل اتصال C2 معرفی شد، که در آن المان قائم AB تأثیری در سختی خمشی المان MVLEM دیوار میانی ندارد. از این رو روش C2 مشکل روش C1 را بر طرف کرده است. اما در این روش اثر تیر پیوند در تحمل بار قائم برشی تحت بار قائم قرار می‌گیرد این بار توسط دیوار میانی به زمین منتقل می‌شود. اما در هنگام انتقال نیرو به زمین، نقاط A و B به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند و به واسطه آن دو طرف تیر پیوند نیز در جهت قائم فشرده تر می‌شوند. بنابراین کناره های تیر پیوند در تحمل بار قائم مشارکت دارند و این موضوع در روش C2 در نظر گرفته نشده است. برای رفع این مشکل اتصال C3 پیشنهاد شد که مطابق شکل (۱۲) از لحاظ ظاهری مشابه با اتصال C2 است و تنها تفاوت در آن اضافه کردن یک المان قائم کمکی است.

شکل ۱۲. سه روش برای مدلسازی اتصالات

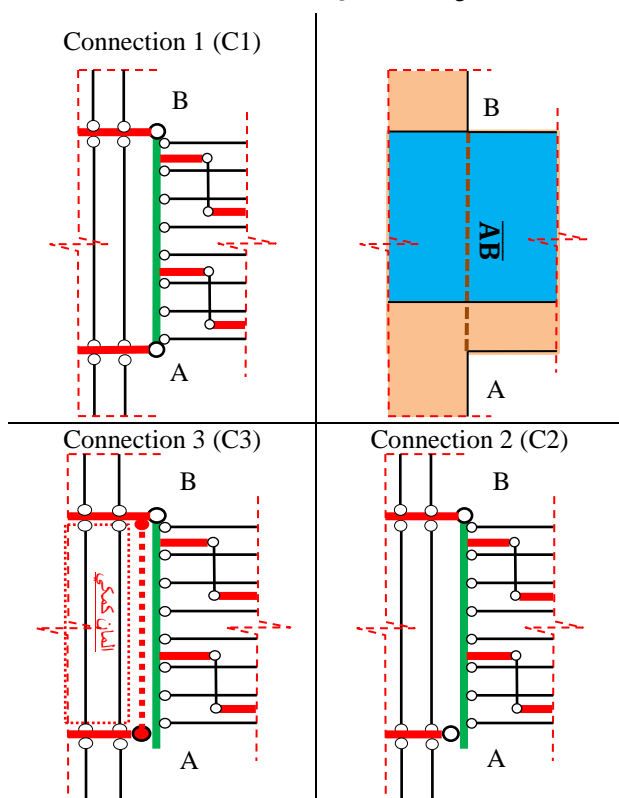


Fig. 12. Three methods of the connection modellings

المان‌های کمکی میزان تحمل تیر پیوند در اثر بار قائم را شبیه‌سازی می‌کند. در المان کمکی، تنها رفتار فشاری در نظر

مدلسازی ماکروسکوپیک دیوار برشی بتنی همراه با بازشوهای نامتقارن به خوبی توانستند رفتار غیرخطی تیرهای پیوند و دیوار میانی را شبیه‌سازی کنند.

شکل ۱۱. نمودار برش پایه تیر پیوند تحت مدلسازی میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک

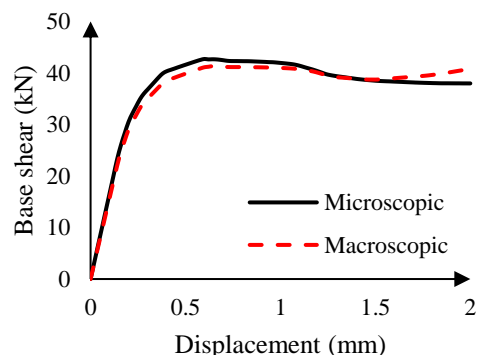


Fig. 11. Base shear of the coupling beam for microscopic and macroscopic modeling

پارامتر مهم دیگر در مدلسازی دیوار برشی کوبله، شبیه‌سازی طریقه اتصال تیر به دیوار می‌باشد. اگر اتصال بین تیر و دیوار به درستی مدل نشود، با وجود شبیه‌سازی صحیح، مدل نهایی خطای زیادی خواهد داشت. بدین منظور سه روش برای مدلسازی اتصال تیر پیوند مطابق شکل (۱۲) با نام های C1، C2 و C3 پیشنهاد شده که برای تشریح این سه روش نقاط پایین و بالا در محل اتصال به ترتیب A و B نامگذاری شده است. در اتصال C1، نقاط A و B به صورت مفصلی کامل می‌باشند که در آن فاصله AB در طول هر گونه بارگذاری تغییر نخواهد کرد (به علت صلب بودن المان AB). در این مقاله دیوار ماکروسکوپیک که اتصال در آن به صورت C1 می‌باشد، ASW1 نامگذاری شده است. در اتصال C2 نقطه B به صورت مفصل کامل می‌باشد در صورتی که نقطه A نیم مفصلی است که می‌تواند در راستای قائم حرکت کند. در این اتصال طول AB ثابت نیست و می‌تواند در طول بارگذاری تغییر کند. در این مقاله نام دیوار ماکروسکوپیک که اتصال در آن به صورت C2 می‌باشد، ASW2 انتخاب شده است. در روش C1 المان AB بخشی از المان‌های قائم (فترهای قائم) در MVLEM برای دیوار میانی می‌شود و از آنجا که AB صلب است میزان سختی المان MVLEM در

اتصال C1 تیر به وسیله دو مفصل و یک المان صلب به دیوار متصل شده است. در مدل ASW2 اتصال به گونه‌ای است که المان صلب AB نمی‌تواند بخشی از میله‌های قائم در المان MVLEM باشد. در مدل ASW1 بیشترین مقاومت و در مدل ASW2 کمترین مقاومت تسلیم مشاهده می‌شود. از لحاظ شکل‌پذیری نیز مدل ASW3 نزدیکترین رفتار را نسبت به مدل میکروسکوپی دارد.

شکل ۱۴. نمودار هیستریزس مدل‌های میکروسکوپی در کنار مدل

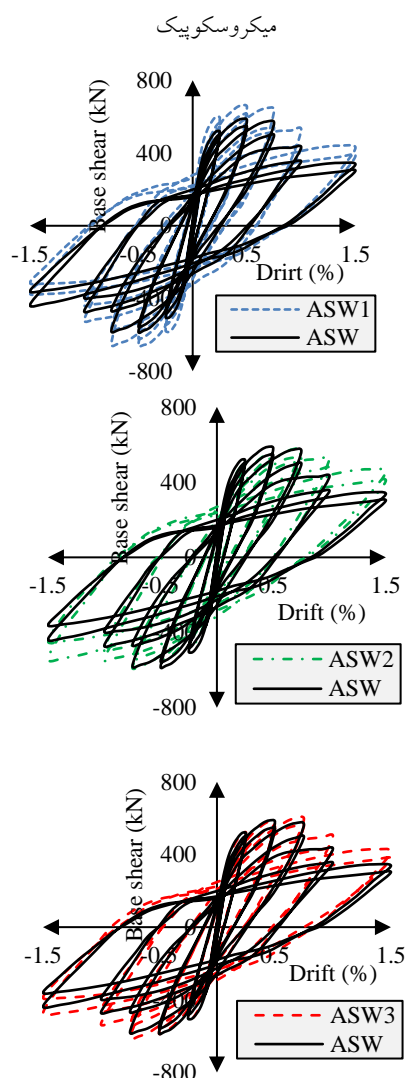


Fig. 14. Hysteresis diagram of macroscopic models next to the microscopic model

پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمالی به مدل‌های عددی مشابه پروتکل اعمالی به دیوار آزمایشگاهی است. در شکل (۱۴) نمودار رفتار چرخه‌ای مدل‌های میکروسکوپی در کنار

گرفته شده است و از آنجا که در طول بارگذاری جانبی اطراف تیر دچار ترک خوردگی می‌شود از مقاومت کششی آن صرف‌نظر شده است. در این پژوهش نام دیوارهای ماکروسکوپی که اتصال در آنها به صورت C3 می‌باشد ASW3 انتخاب شده است.

## ۲- نتایج تحلیل‌های عددی

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های ماکروسکوپی پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های میکروسکوپی دو تحلیل استاتیکی و شبه‌دینامیکی انجام شد. تحلیل استاتیکی به صورت بارگذاری یکطرفه و تحلیل شبه‌دینامیکی به صورت چرخه‌ای است. در شکل (۱۳) نمودار برش پایه برای مدل‌های عددی میکروسکوپی و ماکروسکوپی ارائه شده است، که در آن مدل‌های میکروسکوپی پیشنهادی دارای دقت قابل قبولی هستند.

شکل ۱۳. نمودار برش پایه مدل‌ها

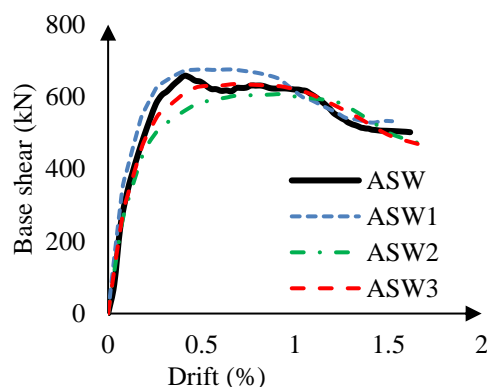


Fig. 13. Base shear diagrams of models

در مدل ASW1 میزان سختی بیشتر از مدل‌های دیگر است و مدل ASW2 کمترین سختی را از خود نشان می‌دهد. مدل ASW3 که دارای المان کمکی است، نزدیکترین سختی را به ریزمدل دارد. دلیل تفاوت سختی در مدل‌های مذکور در چگونگی اتصال موجود در تیر پیوند است. همان‌گونه که گفته شد اتصال C1 دارای بیشترین سختی است و به همین علت سختی در مدل ASW1 بیشتر از سایر مدل‌هاست. در

مقاومت جانبی در ASW1 از سایرین بیشتر است. مدل ASW2 در چرخه‌های ابتدایی کمترین اتلاف انرژی را از خود نشان می‌دهد، زیرا مقاومت جانبی برای ASW2 در دریافت های کوچک کم است. مدل ASW3 نسبت به مدل‌های ماکروسکوپیک دیگر، نزدیکترین اتلاف انرژی به ریزمدل را دارد.

### ۳- زمان تحلیل مدل‌ها

مهمترین مزیت درشت مدلسازی کاهش زمان محاسبات است. این کاهش ناشی از پایین بودن درجه آزادی مدل ماکروسکوپیک نسبت به میکروسکوپیک است. با کاهش درجه آزادی کامپیوتر معادلات کوچکتری را حل می‌کند. زمان محاسباتی برای تحلیل سازه به طور مستقیم به نوع پردازنده سیستم نیز وابسته است. در این پژوهش، پردازنده سیستم مورد استفاده، CPU Core i7 @ 2.00GHz با حافظه نصب شده ۴ گیگابایت می‌باشد. در جدول (۳) زمان محاسباتی برای این مدل‌ها ارائه شده است. مدل‌های ماکروسکوپیک به شکل قابل توجهی زمان تحلیل را کاهش دادند.

جدول ۳. مدت زمان تحلیل‌های عددی میکروسکوپیک و

	ماکروسکوپیک			
	ASW1	ASW2	ASW3	ASW
Monotonic loading	16	16	16	27,495
Cyclic loading	101	103	104	156,732

Table 3. Time spent for microscopic and macroscopic numerical analyses

### ۴- نتیجه گیری

روش‌های مختلفی که برای مدلسازی دیوار برشی وجود دارد که شامل دو دسته ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک است. روش‌های میکروسکوپیک دارای دقت بیشتری نسبت به روش‌های ماکروسکوپیک هستند، ولی مدل‌های ماکروسکوپیک دقت کمتری نسبت به مدل‌های میکروسکوپیک دارند و از طرفی زمان بسیار کمتری برای

مدل میکروسکوپیک ارائه شده است. بر اساس نتایج، مدل ASW3 دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های ماکروسکوپیک دارد. در مدلی که دارای اتصال C3 (ASW3) است توان باربری دیوار در چرخه‌های مختلف نزدیک به مدل میکروسکوپیک است. اما در مدل ASW1 در چرخه‌های ابتدایی، مقاومت جانبی بیشتری نسبت به دیوار ریزمدل مشاهده می‌شود.

به علت آسیب‌های وارد شده به بتن در طول بارگذاری چرخه‌ای، میزان مقاومت جانبی مدل‌ها به طور مداوم کاهش می‌یابد. در جابجایی‌های بزرگتر میزان این کاهش محسوس‌تر است، زیرا میزان گسترش آسیب بتن در تغییر شکل‌های بزرگ به مراتب بیشتر است. در مدل‌های ماکروسکوپیک نیز کاهش مقاومت در چرخه‌های بزرگ مشاهده می‌شود، اما میزان این کاهش متفاوت است. در مدل ASW1 میزان افت مقاومت بیشتر از سایر مدل‌ها است. در شکل (۱۵) میزان توان اتلاف انرژی برای مدل‌های مختلف ماکروسکوپیک در کنار مدل میکروسکوپیک ارائه شده است.

شکل ۱۵. اتلاف انرژی در چرخه‌های مختلف

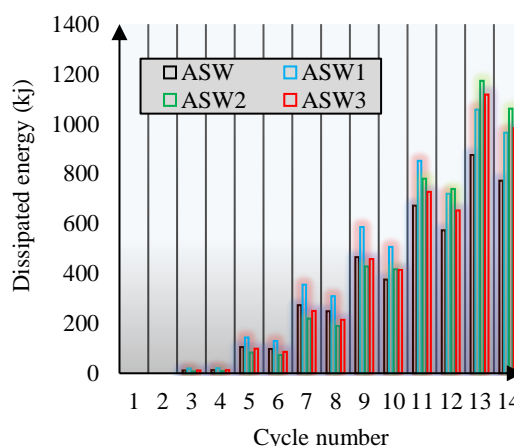


Fig. 15. Energy dissipation in different cycles

مطابق با شکل فوق، در چرخه‌های ابتدایی میزان انرژی اتلاف شده تقریباً در همه مدل‌ها برابر با صفر است. با ایجاد تغییر شکل غیرخطی در نمودار هیستریزس میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. در چرخه‌های ابتدایی این انرژی برای مدل ASW1 بیشتر از مدل میکروسکوپیک است، زیرا میزان

۱۷۰۰ برابر سریعتر از روش میکروسکوپییک اجزاء محدود بود، در سایر تحلیل‌ها نیز مشاهده شد.

## ۵- مراجع

- [۱] A. Shakeri and K. Bargi, "Use of applied element method for structural analysis," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 1375-1384, 2015.
- [۲] A. Soltani, F. Behnamfar, K. Behfarnia, and F. Berahman, "Numerical tools for modeling of RC shear walls," *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2011*, 2011.
- [۳] T. Kabeyasawa, H. Shiohara, S. Otani, and H. Aoyama, "Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure," *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo*, vol. 37, no. 2, pp. 431-478, 1983.
- [۴] A. Vulcano, V. V. Bertero, and V. Colotti, "Analytical modeling of RC structural walls," in *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering*, 1988, vol. 6, pp. 41-46.
- [۵] K. Orakal and J. Wallace, "Modeling of slender reinforced concrete walls " *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada 2004*.
- [۶] K. Orakal, L. M. M. Sanchez, and J. W. Wallace, *Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled-shear-flexural responses*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2006.
- [۷] K. Orakal, J. W. Wallace, and J. P. Conte, "Flexural modeling of reinforced concrete walls-model attributes," *Structural Journal*, vol. 101, no. 5, pp. 688-698, 2004.
- [۸] A. Shabani and M. Kioumars, "A novel macroelement for seismic analysis of unreinforced masonry buildings based on MVLEM in OpenSees," *Journal of Building Engineering*, p. 104019, 2022.
- [۹] K. Kolozvari, K. Kalbasi, K. Orakal, L. M. Massone, and J. Wallace, "Shear-flexure-interaction models for planar and flanged reinforced concrete walls," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 12, pp. 6391-6417, 2019.
- [۱۰] P. Esmaeiltabar, J. Vaseghi, and H. Khosravi, "Nonlinear macro modeling of slender reinforced concrete shear walls," *Structural Concrete*, vol. 20, no. 3, pp. 899-910, 2019.
- [۱۱] M. Rezapour and M. Ghassemieh, "Macroscopic modelling of coupled concrete shear wall," *Engineering Structures*, vol. 169, pp. 37-54, 2018.
- [۱۲] S. M. R. Mortazavi and B. Zaeimdar, "Shear wall modeling with asymmetric openings by macro elements," in *Structures*, 2021, vol. 29, pp. 899-910: Elsevier.

تحلیل نیاز دارند. در این مقاله روشی برای مدل‌سازی دیوار برشی کوپله به کمک المان‌های ماکروسکوپییک MVLEM ارائه شد. المان ماکروسکوپییک در مدل‌سازی رفتار دیوارهای برشی ساده به خوبی عمل میکند. اما وجود بازشو در دیوار می‌تواند دقت آنها را کاهش دهد.

به منظور امکان استفاده از این المان در دیوارهای برشی همراه با بازشو، مطابق با نتایج حاصل می‌توان گفت که در یک دیوار برشی کوپله نامتقارن می‌توان تیر پیوند را به صورت یک دیوار برشی ساده در نظر گرفت. روش اتصال تیر پیوند به بدنه اصلی دیوار برشی در رفتار نهایی دیوار تعیین کننده است. در این مقاله سه روش برای اتصال تیر پیوند به دیوار مطرح شد. چگونگی اتصال هر سه مدل به صورت دوسر مفصل است و تنها تفاوت آنها در صلبیت قائم اتصال است. صلبیت این اتصال بر رفتار کلی دیوار موثر است. در بارگذاری یکطرفه، هر چه میزان صلبیت این اتصال کمتر باشد، توان باربری و سختی اولیه مدل ماکروسکوپییک کمتر از ریزمدل می‌شود و برعکس هرچه صلبیت این اتصال بیشتر باشد توان باربری و سختی الاستیک مدل افزایش می‌یابد. میزان سختی اتصال تیر پیوند بر رفتار چرخه‌ای دیوار نیز تأثیرگذار است. به گونه‌ای که هرچه سختی اتصال بیشتر باشد افت توان باربری بیشتری در بارگذاری چرخه‌ای مشاهده می‌شود. در مدل ASW1 که اتصال آن دارای سختی بیشتری نسبت به سایر مدل‌هاست در چرخه‌های نهم و دهم دچار افت مقاومت می‌شود. در مدل ASW2 که سختی اتصال آن از همه کمتر است افت کمتری مشاهده می‌شود و از خود رفتار نرمی نشان می‌دهد. اما در دیوار ASW3 شکل اتصال دارای سختی متعادلی است از این رو هم در بارگذاری یکطرفه و هم در چرخه‌ای رفتار قابل قبول و نزدیک به ریزمدل دارد.

مهمترین امتیاز درشت مدل‌سازی نسبت به مدل‌سازی میکروسکوپی در زمان تحلیل است. به طور نمونه در این مقاله زمان مورد نیاز برای بارگذاری یکطرفه مدل میکروسکوپییک اجزاء محدود برابر با ۲۷,۴۹۵ ثانیه بوده که این رقم برای مدل‌های ماکروسکوپییک برابر با ۱۶ ثانیه بوده است. این سرعت بالای تحلیل در روش ماکروسکوپییک که حدوداً

pavements (JPCP) using FEM," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 245-252, 2018.

[۱۸] M. Ghassemieh, M. Rezapour, and V. Sadeghi, "Effectiveness of the shape memory alloy reinforcement in concrete coupled shear walls," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 28, no. 5, pp. 640-652, 2017.

[۱۹] K. Orakcal, D. Ulugtekin, and L. Massone, "Constitutive modeling of reinforced concrete panel behavior under cyclic loading," in *Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012, vol. 3573.

[۲۰] A. Vulcano, V. V. Bertero, and V. Colotti, "Analytical modeling of RC structural walls," in *Proceedings, 9th world conference on earthquake engineering*, 1988, vol. ۶, pp. 41-46.

[۲۱] M. Warashina, S. Kono, M. Sakashita, and H. Tanaka, "Shear behavior of multi-story RC structural walls with eccentric openings," in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, 2008, pp. S15-029.

[۲۲] D. C. Kent and R. Park, "Flexural members with confined concrete," *Journal of the Structural Division*, 1971.

[۲۳] B. Scott, R. Park, and M. Priestley, "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates," in *Journal Proceedings*, 1982, vol. 79, no. 1, pp. 13-27.

[۲۴] R. Selby and F. Vecchio, "A constitutive model for analysis of reinforced concrete solids," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 460-470, 1997.

[۲۵] V. Sadeghi and S. Hesami, "Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete

# Macroscopic Modelling of the Concrete Shearwall with Asymmetrical Openings

M. Rezapour<sup>1</sup>, M. Ghassemieh<sup>\*2</sup>

1- PhD, School of Civil Engineering, University of Tehran

2- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran

Received: 23/11/2022

Accepted: 11/03/2023

m.ghassemieh@ut.ac.ir

## Abstract

So far, various elements have been introduced for modeling concrete shear walls, which are classified into two general categories: microscopic and macroscopic. Compared to microscopic elements, macroscopic elements have less degrees of freedom and therefore require less time for analysis. This is the main advantage of these elements. In this article, a special type of macroscopic elements called Multiple-Vertical-Line-Element-Model (MVLEM) is used to model the concrete shear wall. These elements simulate the behavior of simple shear walls well, but when the opening is embedded in the wall, it does not work satisfactory. In this article, the modified MVLEM is used to model the concrete shear wall with asymmetric openings. For this purpose, an experimental concrete shear wall with asymmetric openings was selected and verified using the microscopic finite element method in Abaqus software. After validation, the shear wall was subjected to macroscopic modeling in Abaqus software. In this model, a method for macroscopic modeling of the coupling beam was proposed, which is based on the moment distribution diagram in the beam. When the wall is subjected to lateral loading, due to its geometric shape, the amount of moment on one side of the beam is almost zero and on the other side it is maximum. In simple concrete shear walls under lateral load, the amount of moment at the top of the wall is zero and at the bottom is maximum too. Therefore, the coupling beam can be considered as a simple shear wall. In the shear wall with asymmetric openings, the coupling beams are modeled as simple shear wall whose base is connected to the main wall. After modeling the coupling beam, three different methods were proposed to connect this beam to the main body of the wall. This research includes a microscopic wall with asymmetric openings, three macroscopic walls. The main difference between the macroscopic walls is in the way of connecting the beam to the shear wall, which is based on the difference in the stiffness of the connection. In order to check the accuracy of the proposed models, macroscopic and microscopic walls were subjected to static and quasi-dynamic loading. Based on the results of the aforementioned analyses, the models showed acceptable behavior. The amount of connection stiffness caused the behavior of macroscopic models to be different from each other. Based on the results, as the stiffness of the beam to the wall increases, the bearing capacity and elastic stiffness of the model increases and the ductility decreases. The degree of stiffness of the connection also affects the cyclic behavior of the wall. In such a way that the higher the stiffness of the connection, the greater the loss of carrying capacity is observed in cyclic loading. In the model whose stiffness is higher than the other models, it experiments a large resistance drop in the ninth and tenth cycles. In the model whose stiffness is less than the others, less drop is observed and it shows a soft behavior. The model in which the connection stiffness was in the middle level showed the most accuracy compared to other models.

**Keywords:** Concrete shear wall; Macroscopic modeling; Asymmetrical openings; Coupling beam; Finite element metho