

تأثیر اندازه المان بر رفتار غیر خطی دیوارهای برشی بالدار

سید محمد خاتمی^۱، علی خیرالدین^{۲*}

۱- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

kheyroddin@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۱۶

چکیده- تکمیل و توسعه مدل‌های تحلیلی قابل اطمینان با روش المان محدود می‌تواند کمک بسیار زیادی به بررسی و پیش‌بینی نتایج سازه‌ها کند. تحلیل هر مدل در نرم‌افزار المان محدود، نیاز به المان‌بندی دارد که نتایج کامپیوتری به صورت مشخص به هندسه و ابعاد آن المان وابسته است. که این پدیده را وابستگی مش می‌گویند. نیاز به یافتن روشی بدون وابستگی نتایج به المان‌بندی محسوس است؛ بنابراین و برای بررسی نقش مش بندی المان‌های محدود در دیوارهای برشی بالدار با استفاده از یک نرم‌افزار المان محدود، شبکه‌بندی‌های مختلف یک دیوار برشی بالدار آزمایش شده، تحلیل و بررسی شده و پس از کالیبره کردن مدل، شکل‌ها و ابعاد بهینه آن پیشنهاد می‌شود. برای المان‌بندی‌ها، ایده جدیدی ارائه شده که با استفاده از آن می‌توان تحلیل دیوارهای برشی بالدار را با دقت بیشتری برای تطبیق مقاومت نهایی و شکل‌پذیری انجام داد.

واژگان کلیدی: دیواربرشی بالدار، المان محدود، اندازه المان، مربع ضخامت جان، وابستگی مش

۱- مقدمه

امروزه استفاده از دیوارهای برشی در ساختمانهای بتن مسلح بلند، برای مقابله با نیروهای جانبی، از طرف مهندسين به شدت استقبال شده است. نتایج پژوهشات نشان داده که اگر دیوارهای برشی بالدار باشند، رفتار بسیار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند. دلیل رفتار بهتر دیوارهای برشی بالدار، بدون تردید در اندرکنش بال و جان دیوار است. تأثیر انکار نشدنی بال دیوار برشی در کنترل تغییرمکان و حضور هم‌زمان در کشش و فشار باعث اهمیت دیوارهای برشی بالدار شده است. دیوارهای برشی تحت بارگذاری‌های مختلف، رفتارهای گوناگونی دارند. تامسون و والاس [۱] با

انجام آزمایش‌هایی روی دیوارهای برشی T شکل به این نتیجه رسیدند که وقتی بال دیوارها در کشش باشد، شکل‌پذیری کمتری نسبت به حالتی که بال در فشار است از خود نشان می‌دهد. در بررسی‌های المان محدود مرتضایی و خیرالدین [۲] اثر اندازه المان بر رفتار و وابستگی المان‌ها در دیوارهای برشی بررسی شده است. در پژوهش دیگری که به وسیله‌ی رانگ و جینت [۳] انجام شده، دیوارهای برشی بالدار، مدل شده و با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تشابه آن دو به این نتیجه رسیدند که بال دیوار به سبب جذب نیروی بیشتر در محل اتصال به المان مرزی، سریع‌تر از جان دچار ترک خوردگی می‌شود. آن‌ها

شکل‌پذیری کم می‌شود و الزاماً کوچک کردن آن‌ها با دقت بیشتری همراه نخواهد بود؛ زیرا نتایج تحلیل به اندازه المان وابسته می‌شود. پس از بارگذاری و اعمال کشش بر دیوار برشی، در بتن ترک رخ می‌دهد که میزان و تعداد این ترک‌ها متناسب با اندازه المان است. اگر المان‌ها کوچک باشند، ترک‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد و دیوار برشی رفتار نرمی بروز می‌دهد. عکس این مطلب نیز در المان‌های بزرگ درست است. کوچک کردن این المان‌ها باعث افزایش گره‌ها شده و مدل با درجه آزادی بیشتری رو به رو می‌شود. گره‌های بیشتر المان تحلیلی باعث ترک‌خوردگی زود هنگام شده و به سبب تحلیل ماتریس‌های بیشتر، زمان تحلیل نیز به شدت افزایش می‌یابد در نتیجه، یافتن راهی برای ثبت پاسخ‌ها با المان‌های متفاوت و یا یافتن راه حلی برای از بین بردن وابستگی پاسخ به المان‌ها الزامی به نظر می‌رسد و لازم است برای دقت افزایش و بررسی دقیق این شرایط، المان‌ها بسیار منطقی انتخاب شوند. شایانفر و خیرالدین و میرزا [۷] با در نظر گرفتن پاسخ‌های متفاوت المان‌های سازه‌ای در نرم‌افزار المان محدود، معادله‌ای را پیشنهاد کردند که می‌تواند با ایجاد ارتباط مستقیمی بین اندازه المان و کرنش نهایی کششی بتن، پاسخ دیوارهای برشی را در تحلیل‌های المان محدود به صورت همگرا ارائه دهد.

$$\varepsilon_{iu} = 0.004e^{-0.008h} \quad (1)$$

در این رابطه، ε_{iu} ، کرنش نهایی بتن در کشش و h ، اندازه المان به میلی‌متر است. بنابراین، می‌توان با معیار قرار دادن تنش_کرنش و یا بار_تغییر مکان در یک المان محدود، ابعاد بهینه‌ای را برای المان‌بندی یافت.

۳- نرم‌افزار تحلیلی المان محدود

برای تحلیل اندازه‌مش‌ها در بال دیوارهای برشی بالدار، از

با تغییر در شبکه‌های مدل المان محدود، به این نتیجه رسیدند که افزایش المان‌ها در دیوار برشی و تغییر در نحوه قرارگیری آرماتورها، باعث سریع‌تر شدن روند باربری شده و بال با نیروی کمی دچار ترک‌خوردگی می‌شود. لیبن‌گود [۴] نیز در پژوهشی مقدار نیروی شکست، نحوه المان‌بندی و تأثیر اندازه بار را بر تیرهای مدل‌شده با المان محدود مطالعه کرده است. نوع المان‌بندی و تأثیر اندازه آن در نرم‌افزار المان محدود استفاده، شده بر بار نهایی و الگوی ترک‌خوردگی دیوار برشی بالدار، موضوع بحث پیش رو است. المان‌ها در نرم‌افزار المان محدود، بر دو نوع منظم و نامنظم دارد. برای این بحث، المان‌های منظم که دقت بالاتری دارد، استفاده شده و با تغییر در اندازه آن‌ها، معیارهای گفته شده بررسی شده است.

۲- تأثیرات المان‌بندی در نرم‌افزار المان محدود

المان‌بندی تأثیر چشم‌گیری بر نتایج غیرخطی المان محدود دیوارهای برشی دارد. نتایج به دست آمده در تحلیل‌های انجام شده پیشین با المان‌های مختلف تفاوت زیادی را نشان می‌دهد. در یک پژوهش که به وسیله‌ی خیرالدین و مرتضایی [۵] با استفاده از یک نرم‌افزار المان محدود به نام NONLACS2 و با دیدگاه عددی [۶] انجام شده است، پاسخ‌های یک قاب بتن مسلح با سه مدل المان‌بندی مختلف بررسی شده و هر مدل شبکه‌بندی، پاسخی متفاوت با دو مدل دیگر داشته است. نتایج پژوهش نشان داده است که مدل با المان‌های کمتر، سختی بیشتری نسبت به مدل‌های با المان‌های بیشتر و ریزتر از خود نشان می‌دهد. وابستگی مشخص پاسخ اعضا به اندازه المان‌ها نمی‌تواند قابل قبول باشد؛ به این صورت که در تحلیل‌های غیرخطی المان محدود، بزرگ بودن المان‌ها، سبب مقاومت بالا و

می‌شود. با افزایش بار، فولاد نیز به مقاومت تسلیم خود رسیده و دیوار برشی با تغییرات اندک بارگذاری، تغییر مکان چشم‌گیری را تجربه می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت تعریف معیارهای مختلف تنش-کرنش را دارد و می‌تواند مقاومت نهایی فولاد را در نمودارهای خاص تعریف کند. زمانی که همگرایی در سیستم نرم‌افزار ANSYS به پایان رسید، در حقیقت دیوار برشی قابلیت باربری خود را از دست داده و تحلیل متوقف می‌شود که در اصطلاح این حالت را شکست در المان گویند.

اما در مدل‌سازی رفتار بتن به دو فرض اساسی توجه می‌شود:

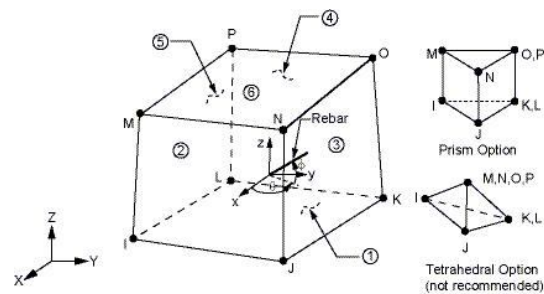
- ۱- محدوده خطی: تا مرحله ترک‌خوردگی بتن، ایزوتروپیک است.
- ۲- محدوده غیرخطی: بتن ممکن است حالت پلاستیک و خزش را تجربه کند [۹].

۳-۱- معیار مدل‌سازی

برای تأیید درستی نتایج نرم‌افزار المان محدود، یک مدل با پاسخ‌های دیوار برشی و کیو و پالرمو [۱۰] در نظر گرفته شده است. آن‌ها در سال ۲۰۰۲ و در آزمایشگاه دانشگاه تورنتو، نمونه دیوار برشی I شکلی را ساختند که دو دال سخت در بالا و پایین به ابعاد $640 \times 4000 \times 415$ میلی‌متر بود که دال بالائی نقش پخش‌کننده بارهای گرانشی و جانبی را بر عهده دارد و دال پایینی به عنوان فونداسیون عمل می‌کند.

جان دیوار برشی ۲۸۸۵ میلی‌متر طول، ۲۰۲۰ میلی‌متر ارتفاع و ۷۵ میلی‌متر ضخامت دارد که با فولاد D6 (قطر ۷ میلی‌متر) در هر ۱۴۰ میلی‌متر مسلح شده است. بال‌های این دیوار برشی طول ۳۰۷۵ میلی‌متر، ارتفاع ۲۰۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر دارد که مسلح به آرماتورهای D6

یک دیوار برشی H شکل استفاده شده است. این دیوار در نرم‌افزار المان محدود ANSYS (version 9) [۸] مدل شده و در ۶ حالت مجزا مش‌بندی و تحلیل غیرخطی قرار شده است. برای مدل‌سازی بتن دیوارهای برشی از المان Solid65 استفاده شده است. این المان یک ماده بسیار مهم و کاربردی که توانایی ساخت مدل‌های سه‌بعدی اجسام جامد دارای آرماتور یا بدون آرماتور را دارد. این المان در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل (۱) مشخصات مدل Solid در نرم‌افزار المان محدود [۸]

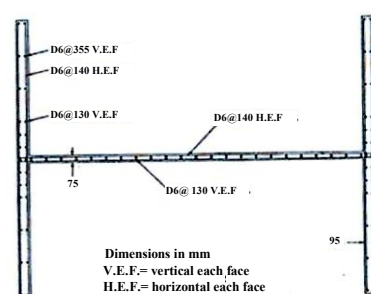
این المان، توانایی ترک‌خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار را دارد. Solid65 یک المان ۸ گره‌ای با ۳ درجه آزادی در هر گره است که رفتار غیرخطی مادی، تغییر شکل پلاستیک، و خزش از توانایی‌های این المان است. در این المان می‌توان آرماتور را به صورت حجمی در بتن در نظر گرفت. در این المان، ترک به دو صورت باز و بسته مدل می‌شود. بنابراین، کشش نهایی وارد شده در هر تکرار بارگذاری با کشش موجود مقایسه شده و در صورتی که از مقدار مجاز بیشتر شود، ترک‌خوردگی رخ می‌دهد. از آنجایی که بارگذاری، رفت و برگشتی است؛ ترک‌ها در بار فشاری، بسته شده و توان انتقال برش بیشتر را نسبت به بار کششی که باعث باز شدن ترک‌ها می‌شود، دارند. بدین سبب، ترک بسته ضریب انتقال برش بیشتری نیز خواهد داشت. افزایش بار پس از ترک‌خوردگی در مدل‌های بتنی باعث آغاز فاز دوم مقابله به وسیله فولاد

۴- بررسی اولیه تأثیرات المان بندی

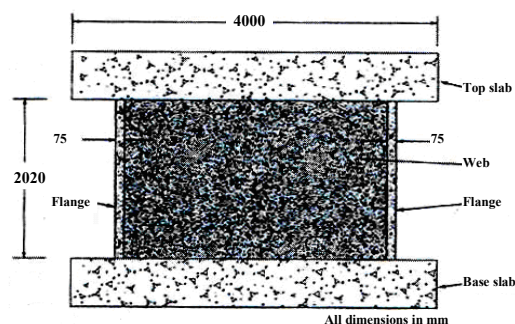
برای بررسی اولیه تأثیر اندازه شبکه‌ها بر رفتار غیرخطی دیوار برشی بالدار در نرم‌افزار المان محدود ANSYS، سه نمونه یکسان از نظر ابعادی و مشخصات مصالح، ساخته و در مش‌های متفاوت بررسی شده است. برای این‌کار از المان‌های مستطیلی استفاده شده است؛ اما اشکال این عمل در این جاست که در عمل برخی از المان‌ها تابع ضخامت یا ابعاد المان مطالعه شده است؛ یعنی اندازه و راستای المان‌ها باید به گونه‌ای باشد که هر بعد آن در برخورد با ضخامت یکی از مقاطع دیوار برشی، همانند جان و یا بال، از آن‌ها بیشتر نباشد. برای نمونه، مجموعه‌ای که المانی با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر دارد را می‌توان با المان‌های متفاوتی در فواصل ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر شبکه‌بندی کرد؛ ولی استفاده از المان‌های کلی بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر در راستای ضخامت این بخش ممکن نیست.

برای نام‌گذاری سه نمونه گفته شده، از SW به عنوان مخفف کلمه Shear Wall استفاده شده است. عدد به‌کار برده شده بعد از آن، تعداد المان‌های دیوار برشی است. برای مثال در نمونه SW900، طول ۳۰۰۰ میلی‌متری بال به ۳۰ قسمت ۱۰۰ میلی‌متری و ارتفاع آن به ۱۰ قسمت ۲۰۲ میلی‌متری تقسیم شده است. کل المان‌های این مدل، ۹۰۰ است. سطح پایینی دیوارهای نمونه، کاملاً صلب در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که گویا دیوار برشی با فونداسیونی قوی و بسیار مستحکم در اتصال است. همه‌ی مدل‌ها بر اساس ابعاد از پیش محاسبه شده شبکه‌بندی می‌شوند. مدل‌ها تحت تحلیل غیرخطی قرار می‌گیرند. تحلیل معمولاً زیاد و وقت‌گیر است. و هرچه المان بندی از قطعات بیشتری تشکیل شده باشد، مدل با گره‌های بیشتری رو به رو شده و بارگذاری و تحلیل گره به گره المان با توجه به افزایش درجات آزادی، نیاز

است. شکل ۲، هندسه و فولادگذاری مدل نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. پس از ساخت نمونه، بار ۱۰۰۰ کیلو نیوتن به وجه جانبی و ۲۴۰۰ کیلو نیوتن به صورت گرانشی بر دال بالایی وارد شده است. منحنی بار-تغییر مکان ارائه شده نشان می‌دهد که دیوار در بار جانبی ۸۵ کیلو نیوتن تسلیم شده و قبل از شکست، مقاومت جانبی ۱۲۹۸ کیلو نیوتن را از خود نشان داده است. این بار در جابه‌جایی جانبی ۱۲ میلی‌متری رخ داده است (شکل ۳).

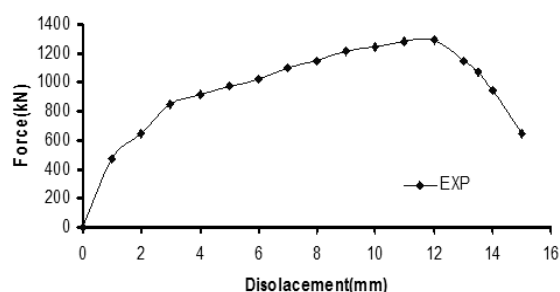


ب. نمای دیوار برشی Palermo و Vecchio



الف. پلان دیوار برشی

شکل (۲) پلان و نمای دیوار برشی آزمایش شده [۱۰]



شکل (۳) منحنی نیرو-تغییر مکان در حالت آزمایشگاهی

به زمان بیشتری برای تحلیل دارد.

۱-۴- نتایج تحلیل

تحلیل‌های غیرخطی انجام شده به صورت بارافزون (Pushover) بوده و پارامترهای نیرو-تغییر مکان از نتایج آن استخراج می‌شود. نتایج تحلیل این سه مدل نشان می‌دهد که مدل SW900 نیروی جانبی بیشتری نسبت به سه مدل دیگر ۴۵۰ المانی و ۳۶۰ المانی داده است. بار نهایی در مدل نرم‌افزاری در تغییر مکان جانبی که ۱۰ میلی‌متر بوده است، در حدود ۱۴۱۰ کیلو نیوتن است. در شکل ۴، مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان در مدل‌های نرم‌افزاری مشاهده می‌شود. در این تحلیل، مدل SW3600 نیز تا حدودی رفتار مشابه داشته است. بار نهایی این مدل ۱۱۱۰ کیلو نیوتن بوده که در تغییر مکان جانبی ۹ میلی‌متر دچار شکست شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل ۳۶۰ المانی دیوار برشی، توانایی بروز ۹۰ درصد تغییر مکان مدل SW900 را دارد و نتوانسته است سختی چشم‌گیری از خود بروز دهد. بار ترک خوردگی در این نمونه حدود ۴۳۰ کیلو نیوتن بوده که ۲۵ درصد بار نهایی است. به بیان ساده‌تر، بتن نقشی کمتر از فولاد در تحمل بار جانبی داشته و دچار ترک خوردگی شده است.

شکل‌پذیری این نمونه نیز ۵/۲ است که نتیجه قابل قبولی برای مش‌بندی‌های مشابه نیست. مفهوم شکل‌پذیری، توانایی سازه برای تحمل تغییر شکل‌های غیرخطی و زیاد بدون کاهش چشم‌گیر در مقاومت آن است. هرچه میزان پذیرش تغییر شکل غیرالاستیک بیشتر باشد، شکل‌پذیری نیز بیشتر است. ضریب شکل‌پذیری مطابق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

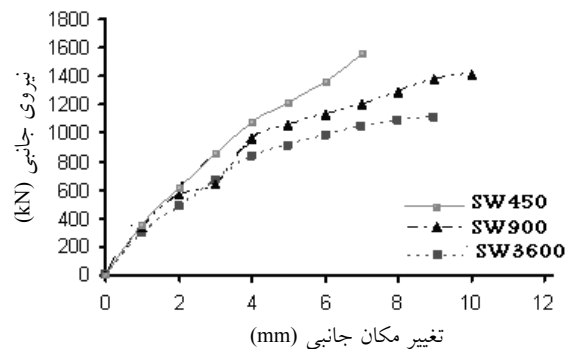
$$\mu = \frac{\Delta_{failure}}{\Delta_{yield}} \quad (2)$$

اما مدل SW450 روند همگرایی خود را در بار جانبی ۹۰۰ کیلو نیوتن از دست داده است و به صورت واگرا به روندی غیرعادی نسبت به مدل‌های دیگر تبدیل شده و در جابه‌جایی جانبی ۷ میلی‌متر، باری در حدود ۱۵۶۰ کیلو نیوتن را متحمل شده است که مدل، منطقی به نظر نمی‌رسد.

شکل‌پذیری بسیار کم این مدل شبکه‌بندی شده نشان می‌دهد که با شبکه‌های بزرگ و گره‌های کم، نتایج واگرا به دست می‌آید و نمی‌توان درستی الگوی ترک خوردگی و بارهای این نمونه را تأیید کرد. در جدول ۱ می‌توان از سه مدل نتایج کامل‌تری را مشاهده کرد. در این جدول، Δ_{Cr} ، تغییر مکان ترک خوردگی، Δ_y ، تغییر مکان تسلیم و Δ_{II} ، تغییر مکان نهایی است. P_{II} ، بار نهایی متناسب با جابه‌جایی نهایی است.

۵- مدل‌سازی عددی

برای بررسی دقیق و بحث در مورد تأثیر اندازه مش‌ها بر پاسخ‌های غیرخطی دیوار برشی، مدل دیوار برشی H شکل وکیو و پالرمو [۹] به عنوان مرجع اصلی ساخته می‌شود. این مدل با ابعاد و شرایط بارگذاری گفته شده در بند ۳-۱، ساخته و امان‌بندی شده است.



شکل (۴) مقایسه بار-تغییر مکان مدل‌ها

جدول (۱) نتایج تحلیل مدل‌ها در المان‌بندی‌های مختلف

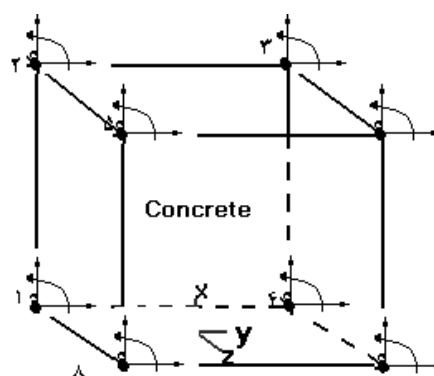
نام نمونه	تعداد المان‌ها	$\Delta_c(\text{mm})$	$\Delta_y(\text{mm})$	$\Delta_u(\text{mm})$	$P_u(\text{kN})$	شکل پذیری
SW450	۴۵۰	۰/۵۵	۱/۴۳	۶/۹۸	۱۵۶۰	۴/۸۸
SW900	۹۰۰	۰/۵۲	۱/۵۲	۱۲/۳۵	۱۳۹۰	۸/۱۲۵
SW3600	۳۶۰۰	۰/۴۲	۱/۴۲	۹/۰۵	۱۱۱۰	۶/۳۷

جدول (۲) اندازه المان‌بندی دیوار برشی در تحلیل شکل بهینه

نام مدل	تعداد المان‌های بال	تعداد المان‌های جان	تعداد المان‌های ضخامت	تعداد کل المان‌ها	نسبت ابعادی	هندسه شبکه‌ها	ابعاد شبکه بال و جان (mm)
5230NW	۱۷۶۰	۱۷۱۰	۱	۵۲۳۰	۱/۶۶		۷۵×۴۵
3068NW	۱۰۴۰	۹۸۸	۱	۳۰۶۸	۱		۷۵×۷۵
2340NW	۸۰۰	۷۴۰	۱	۲۳۴۰	۰/۷۵		۷۵×۱۰۰

۱-۵- شکل هندسی بهینه شبکه‌بندی

برای بررسی شکل هندسی بهینه المان‌بندی در نرم افزار المان محدود، از سه مدل المان‌بندی استفاده شده است. در ابتدا یک شبکه‌بندی دستی (Mapped) مربعی با طول و عرض برابر ساخته می‌شود. در دو حالت دیگر نیز شبکه‌های مستطیلی به صورت ایستاده و خوابیده تشکیل می‌شود. در شبکه‌بندی دستی، الزاماً باید المان‌ها از چهار ضلع تشکیل شده باشند (شکل ۵). هر المان، ۴ گره و ۱۲ درجه آزادی دارد. مشخصات المان‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود.



شکل (۵) شبکه چهارضلعی نمونه

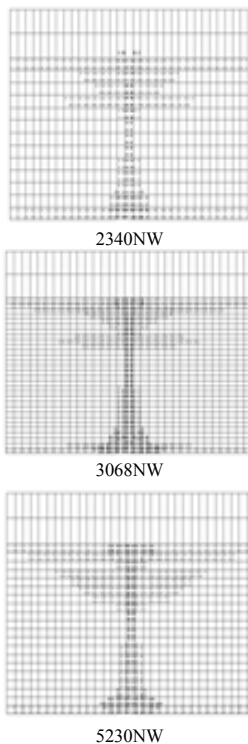
در نامگذاری مدل‌ها، عدد اول، تعداد کل شبکه‌ها، N، مخفف Nonlinear، نشان‌دهنده تحلیل غیرخطی و W، نشان‌دهنده دیواربرشی است. مدل 5230NW، المان‌هایی به طول ۷۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴۵ میلی‌متر دارد. این نوع المان‌بندی به شکل مستطیل خوابیده است و در حقیقت هر المان به اندازه ۴۱ بار کوچک شده ابعاد بال است. در مدل 3068NW، طول و ارتفاع بال به مربع‌های ۷۵ میلی‌متری تقسیم‌بندی شده است. مدل 2340NW، طول ۷۵ میلی‌متری در المان‌های خود دارد. این مدل به شکل مستطیل ایستاده است و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارد.

۲-۵- بررسی نتایج

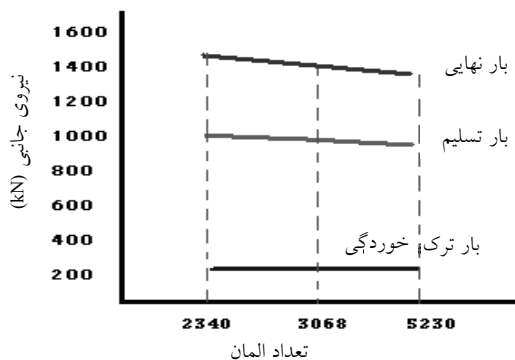
بحث و بررسی در مورد نتایج به دست آمده از سه مدل المان محدود با المان‌بندی‌های مختلف نشان داده است که المان مربعی، نزدیک‌ترین پاسخ‌ها را ارائه می‌کند.

کششی را از خود نشان می‌دهد که در اصطلاح "سختی کششی" نامیده می‌شود. چسبندگی کامل بین بتن و فولاد باعث می‌شود نسبت اختلاف بار تسلیم به بار نهایی در المان‌بندی‌های مختلف کمتر باشد. پس از تسلیم، به ترک‌خوردگی در المان‌بندی‌های کوچک‌تر به سرعت گسترش می‌یابد و سیستم، نرم شده و مقاومت نهایی کمتری از خود بروز می‌دهد.

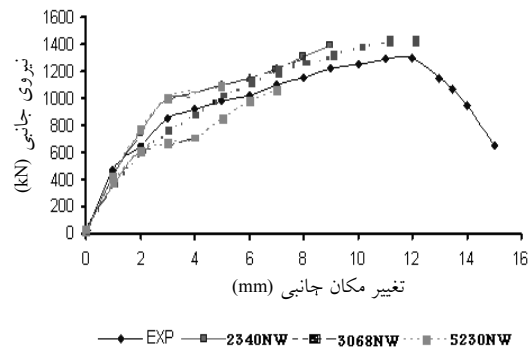
شکل (۸) میزان باربری را در المان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۷) الگوی ترک‌خوردگی در بال مدل‌ها



شکل (۸) میزان باربری با المان‌های متفاوت



شکل (۶) مقایسه منحنی بار- تغییر مکان در شکل بهینه المان

در شکل ۶، منحنی بار- تغییر مکان در چهار مدل تحلیلی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. مدل 3068NW بهترین و دقیق‌ترین پاسخ‌ها را در شرایط باربری و جابه‌جایی جانبی داشته است. برای نمونه، این مدل در مقاومت جانبی نسبت به مدل مستطیلی ایستاده 2340NW، ۶ درصد نزدیک‌تر به مدل آزمایشگاهی پاسخ داده است. تعداد بیشتر ترک‌ها در مدلی که المان‌های بیشتری دارد، باعث نرم شدن مدل شده و مقاومت جانبی کمتری از خود بروز می‌دهد. بزرگتر بودن المان‌ها نیز باعث سخت شدن و بالا رفتن مقاومت مدل می‌شود. در شکل ۷، الگوی ترک‌خوردگی سه مدل ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، اندازه المان‌ها تأثیر چشم‌گیری بر باربری دیوار برشی داشته است. المان‌های بزرگ‌تر که تعداد کمتری دارند، مقاومت بیشتری از خود بروز داده است که به خاطر آن است که دیرتر دچار ترک‌خوردگی شده‌است. المان‌های مربعی در حقیقت از چهار المان مثلثی که در مرکز مربع، رأس واحدی دارند ساخته می‌شود. مجموع سختی متناظر با هر یک از مثلث‌ها، سختی المان مربعی را تعیین می‌کند؛ در نتیجه المان‌های با ابعاد بزرگ‌تر، سختی بیشتری داشته و مقاومت بالاتری دارند. بتن پس از ترک‌خوردگی، به خاطر ماهیت درگیری بین سنگ‌دانه‌ها هنوز توانایی مقاومت در برابر نیروهای برشی را دارد. همچنین بتن بین ترک‌های رخ داده توانایی مقاومت

جدول (۳) نتایج به دست آمده تحلیل شکل‌های بهینه المان‌بندی

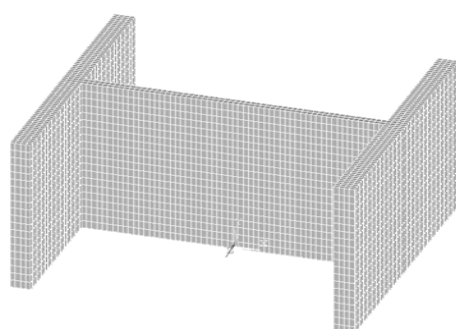
مدل	Δy (mm)	Δu (mm)	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	$P_{uexp}/P_{uanalysis}$	شکل (۷). الگوی ترک‌خوردگی در بال مدل‌ها شکل‌پذیری
5230NW	۲/۷۳	۷/۵	۲۳۲	۶۲۵	۱۰۲۵	۱/۲۶	۲/۸
3068NW	۳	۱۱/۳۵	۲۳۵	۹۸۷	۱۴۰۵	۰/۹۲	۳/۷۸
2340NW	۲/۹۴	۷/۸۳	۲۴۰	۹۹۰	۱۴۴۷	۰/۸۹	۲/۶۶

۳-۵- ابعاد بهینه شبکه‌بندی

پس از بررسی شکل بهینه المان‌ها برای المان‌بندی دیوارهای برشی، از مدل تأیید شده مربعی استفاده می‌شود. اشکال این کار در این جاست که در عمل برخی از المان‌ها تابع ضخامت یا ابعاد المان مطالعه شده است؛ به بیان دیگر، راستای المان‌ها باید به گونه‌ای باشد که در برخورد با ضخامت یکی از مقاطع دیوار برشی از آن بیشتر نباشد. برای نمونه، مجموعه‌ای که المانی با ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر دارد را می‌توان با المان‌های متفاوتی در فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر المان‌بندی کرد؛ اما المان‌های کلی بیشتر از ۱۵۰ میلی‌متر در راستای ضخامت این بخش غیر ممکن است؛ در نتیجه، برای بال و در راستای طول آن، به علت اتصال جان دیوار برشی که ضخامتی ۷۵ میلی‌متری دارد، از سه المان‌بندی ۲۵، ۳۷/۵ و ۷۵ میلی‌متری استفاده می‌شود. جدول ۴، اندازه المان‌ها را جداگانه نشان می‌دهد. مدل‌ها نیز nSNm نامیده می‌شوند. در این نام‌گذاری S، مخفف کلمه Square (مربع)، بوده و n، اندازه المان‌های بال در راستای طولی و m اندازه المان در ارتفاع است. N به معنای تحلیل غیرخطی است. همه‌ی مدل‌ها با المان‌بندی‌های مختلف گفته شده در جدول زیر مدل می‌شوند.

جدول (۴) اندازه المان‌بندی دیوار برشی در تحلیل ابعاد بهینه

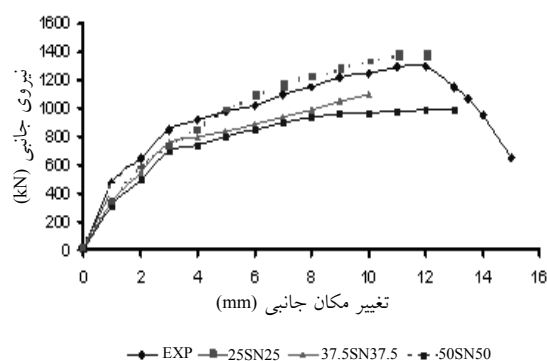
نام مدل	تعداد شبکه‌های بال	تعداد شبکه‌های جان	تعداد کل شبکه‌ها	ابعاد شبکه (mm)
25SN25	۹۹۲۰	۹۶۰۰	۱۱۷۷۶۰	۲۵×۲۵
37.5SN37.5	۳۸۷۵	۳۷۵۰	۲۳۰۰۰	۳۷/۵×۳۷/۵
75SN75	۶۲۰	۶۰۰	۱۸۴۰	۷۵×۷۵



شکل (۹) مدل المان‌بندی شده 25SN25

۳-۵-۱- بررسی نتایج عددی

بررسی نتایج عددی به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود غیرخطی، در هر سه مدل به صورت تفکیک شده انجام می‌شود. سپس نتایج با یکدیگر مقایسه شده و بحث می‌شود. بار ترک‌خوردگی، تسلیم و نهایی و جابه‌جایی متناظر با هر کدام از آن‌ها ارائه شده و الگوی ترک خوردگی مدل‌ها بررسی می‌شود. به دلیل این‌که مدل 75SN75 در حقیقت همان مدل 3068NW بررسی شده است، از تفسیر آن در این قسمت خودداری می‌شود.



شکل (۱۰) مقایسه منحنی بار-تغییر مکان در ابعاد بهینه المان

جدول (۵) نتایج به دست آمده از تحلیل ابعاد بهینه مش بندی

مدل	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	P_{uexp}/P_{uansys}	شکل پذیری
25SN25	۳/۱۷	۱۳	۱۹۸	۷۰۵	۹۹۴	۱/۳	۴/۱
37.5SN37.5	۳/۰۵	۱۰/۳۰	۲۱۲	۷۶۰	۱۱۰۵	۱/۱۷	۳/۳۷
75SN75	۳	۱۱/۳۵	۲۳۵	۹۸۷	۱۴۰۵	۰/۹۲	۳/۷۸

۶- ایده مربع ضخامت جان

نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها بیانگر آن است که الزاماً کوچک بودن المان‌ها، تضمینی برای دقت آن‌ها نیست؛ بلکه باید برای تحلیل دقیق از المان‌های بهینه استفاده کرد. همان‌طور که از نتایج پیداست، المان مدل 75SN75 یا همان مدل 3068NW، نزدیک‌ترین نتایج را از نظر شکل پذیری، بار نهایی و جابه‌جایی نهایی به واقعیت، نشان داده است. واقعیت آن است که در تحلیل‌های المان محدود کامپیوتری، به علت دقیق بودن ورودی‌ها، معمولاً پاسخ‌های تحلیل نسبت به مدل آزمایشگاهی، قوی‌تر و سخت‌تر است. به بیان ساده‌تر، نیروی بیشتر در جابه‌جایی جانبی یکسان و ترک خوردگی در بار بیشتر، از تفاوت‌های عمده این دو حالت است. در نتیجه، پاسخ‌های لرزه‌ای در دو مدل 25SN25 و 37.5SN37.5 به علت کمتر بودن میزان بار نهایی، بار ترک خوردگی و بار تسلیم، نمی‌تواند قابل قبول باشد و نتایج آن‌ها تأیید نمی‌شود؛ مدل المان بندی این دو توانسته به صورت درست و قابل قبول به انتظارات پاسخ دهد. به هر حال می‌توان با استفاده از این تحلیل‌ها و نتایج به دست آمده از تحقیقات گذشته، مدعی شد که المان‌های مربعی برای المان تحلیل شده می‌تواند پاسخ‌های قابل اعتمادتری را به دست دهد؛ اما ابعاد بهینه این المان‌ها در تحلیل ابعادی، نشان داد که المان‌های ایجاد شده با بعد ضخامت جان متصل به بال، توانسته است نزدیک‌ترین پاسخ‌ها را ارائه دهد. همان‌گونه که گفته شد، در نرم‌افزارهای المان محدود، ایجاد المان‌هایی با طول بیشتر از

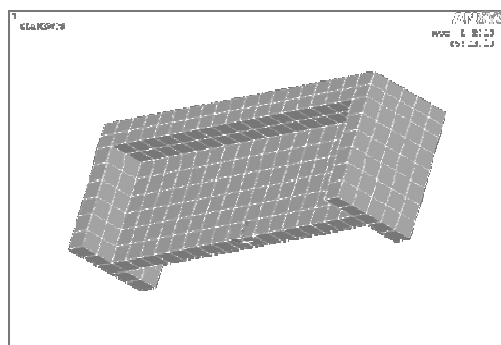
ضخامت المان متصل، ممکن نیست. جان دیوار برشی برای تغییر مکان جانبی تحت بار لرزه‌ای وارد شده، تمایل به جابه‌جایی دارد و این تغییر مکان باعث به وجود آمدن نیروی فشاری و یا کششی از طرف جان به بال در محل اتصال این دو می‌شود. این قسمت بیشترین قابلیت برای ترک خوردگی و برش را دارد؛ زیرا توزیع و انتقال نیرو از جان به بال در این محل روی می‌دهد؛ در نتیجه نیروهای استفاده شده در تحلیل، فقط به گره‌های کناری منحصر می‌شود و عملاً گره‌های میانی ضخامت جان از سیستم تحلیلی خارج می‌شوند. ایجاد المان‌های مربعی به اندازه ضخامت جان باعث می‌شود نیرو در چهار گره که در لبه انتهایی جان قرار دارد، توزیع و تحلیل شود. در این پژوهش با ثابت نگه داشتن کرنش نهایی، اندازه المان‌ها، مربعاتی با ضخامت جان در نظر گرفته می‌شود. با این کار از ایجاد گره‌های اضافی در میانه ضخامت جان جلوگیری شده و ماتریس نهایی تحلیلی، ابعاد کوچک‌تری خواهد داشت. برای تأیید درستی ایده مربع ضخامت جان، دیوار برشی I شکلی که به وسیله‌ی باردا [۱۲] در آزمایشگاه دانشگاه برکلی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته شده بود، تحلیل غیرخطی می‌شود. طول جان این دیوار ۱۷۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۰۰ میلی‌متر است. دو بال به ابعاد $۱۰۰ \times ۶۰۰ \times ۵۰۰$ میلی‌متر در دو سمت جان قرار گرفته و یک دال نیز در بالای آن برای توزیع بار استفاده شده است. دیوار آزمایش شده و در بار جانبی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن، متناظر با جابه‌جایی جانبی ۵/۶ میلی‌متر به مقاومت نهایی خود

شده ارائه شده است. اندازه المان‌های ۷۵ میلی‌متری به شکل مربع در مدل و کیو و پالرمو و المان‌های ۱۰۰ میلی‌متری در مدل باردا، نتایج بسیار نزدیکی در باربری جانبی و شکل‌پذیری ارائه کرده است.

۷- نتیجه‌گیری

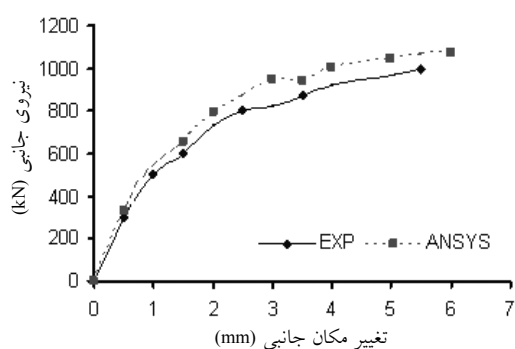
همان‌گونه که گفته شد و تحلیل‌ها بیانگر آن بود، المان‌بندی تأثیر غیرقابل انکاری در رفتار المان‌ها برای تحلیل المان محدود دارد. پاسخ‌های لرزه‌ای هر یک از مدل‌های تحلیلی، ارتباط مستقیم با نوع المان‌بندی، شکل و ابعاد آن دارد. هر یک از شکل‌های مختلف المان‌های مربعی و مستطیلی، پاسخ‌های متفاوتی برای رفتار ثابت یک دیوار برشی به همراه داشت. همچنین تفاوت در ابعاد المان‌ها، باعث ایجاد پاسخ‌های لرزه‌ای گوناگون می‌شود؛ از تحلیل دیوارهای برشی برمی‌آید که تفاوت در طول و یا ارتفاع المان‌ها، باعث ایجاد گره‌های متفاوت شده و تعداد این گره‌ها در تحلیل نهایی نقشی مؤثر دارد؛ زیرا تحلیل به صورت گره به گره انجام شده و درجات آزادی مختلف بروز کرده، و پاسخ‌های متفاوتی را ارائه می‌دهد. برای مثال، مقاومت نهایی نمونه با المان‌های ۷۵ میلی‌متری، حدود ۲۵ درصد بیشتر از نمونه با المان ۳۷/۵ میلی‌متری است؛ علاوه بر این نمونه‌های با المان بسیار زیاد که ابعاد کوچک دارند، نرمی بالایی دارند، یعنی نمونه‌های با المان‌های ریز، در بار کم، ترک خورده و تسلیم می‌شود. می‌توان مدعی شد که هر چه ابعاد المان‌ها به سمت صفر میل کند، نمونه در بار صفر دچار ترک‌خوردگی می‌شود؛ اما شکل‌پذیری بالایی از خود بروز می‌دهد. در حالت مقابل، المان‌های بزرگ، سختی بسیار بالا و بار ترک‌خوردگی و مقاومت نهایی بالایی دارند. تحلیل‌ها نشان داد که ایجاد المان‌هایی مربعی، نتایج

می‌رسد. این نمونه آزمایشگاهی، با استفاده از ایده مربع ضخامت جان مدل شده و المان‌بندی می‌شود (شکل ۱۱).



شکل (۱۱) مدل المان محدود دیوار برشی باردا

مدل المان محدود تحت تحلیل غیرخطی در بار جانبی ۱/۷۲ کیلونیوتن گسیخته می‌شود. این مقاومت نهایی نسبت به مدل آزمایشگاهی دارای ۷ درصد خطا دارد. تغییر مکان جانبی نهایی ۶ میلی‌متر بوده که نتیجه قابل قبولی است. نمودار بار-تغییر مکان این مدل در دو حالت آزمایشگاهی و المان محدود ارائه شده است.



شکل (۱۲) مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان در دو حالت آزمایشگاهی (باردا) و کامپیوتری

ایده مربع ضخامت جان به آن معناست که می‌توان المان‌های محدود را به شکل مربع و با اندازه ضخامت المان متصل، مدل کرده و نزدیک‌ترین پاسخ‌ها را مشاهده کرد. درستی این ادعا در پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های گفته

- Characteristics on Nonlinear Analysis of Frames” Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, No.B5, pp451-470
- [6] Kheyroddin, A. (1996). "Nonlinear Finite Element Analysis of Flexure Dominant-Reinforced Concrete Structures, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada.
- [7] Shayanfar, M.A. Kheyroddin, A and Mirza, M.S (1996) "Element Size Effects in Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Members", Computers & Structures, London, U.K.
- [8] Swanson Analysis Systems Inc, ANSYS (Revision 5.4) (1992). Users Manual. Theory, Vol. IV
- [9] Kheyroddin, A., Hoseini Vaez, S.R. and Naderpour, H. (2008) "Numerical Analysis of Slab-Column Concrete Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers". Journal of Applied Sciences, Vol. 8. No.3, pp. 420-431.
- [10] Vecchio, F.J., Palermo, D. (2002) "Behavior of Three Dimensional Reinforced Concrete Shear Walls", ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 1, Jan. Feb. 2002.
- [۱۱] خاتمی، س. م "بررسی رفتار خطی و غیرخطی دیوارهای برشی بالدار" رساله کارشناسی ارشد، ۱۳۸۹
- [12] Barda, F. (1972) "Shear Strength of Low-Rise Walls with Boundary Elements," Ph.D. Thesis, Lehigh University, Bethlehem, Pa.
- واقعی تری را به دست می‌دهد. برای نمونه، المان‌بندی مستطیلی خوابیده ۱ درصد نسبت به المان‌های مربعی و ۶ درصد نسبت به المان‌های مستطیلی ایستاده، مقاومت جانبی نزدیک تری به نمونه آزمایشگاهی دارند؛ اما شکل‌پذیری المان‌های مربعی، نزدیک تر به نمونه آزمایشگاهی است. در نتیجه برای المان‌بندی المان‌های محدود می‌توان با ایجاد المان‌هایی مربعی، نتایج دقیق‌تر و تأیید شده تری به دست آورد. برای به دست آوردن ابعاد بهینه هندسه مورد نظر، ترجیح داده می‌شود که بعد هر المان با ضخامت المان اتصال شده یکسان باشد. برای نمونه، اگر ضخامت المان متصل ۱۵۰ میلی‌متر است، نتایج به دست آمده از شبکه‌های با طول ۱۵۰ میلی‌متر دقیق‌تر از شبکه‌های با طول ۷۵، ۵۰ و یا ۲۵ میلی‌متر خواهد بود.
- ### ۸- مراجع
- [1] Thomsen, J.H., IV, and Wallace, J.W., (1995). "An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross-Section," Report: CU/CEE-95/06, Structure Engineering Research Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, New York
- [2] Mortezaei, A. R and Kheyroddin A (2009) "Size Effects in Reinforced Concrete Flanged Shear Walls" International Journal of Civil Engineering, page 27, Vol. 7, NO. 1.
- [3] Meng, J (2009) "Analysis Modelling of Seismic Behaviour of Lightweight Concrete Shear Walls" Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II IMECS 2009, March 18 - 20, Hong Kong.
- [4] Libengood, L.D., Darwin, A.M., and Dodds, R.H. (1986), "Parameters Affecting FE Analysis of Concrete Structures", Journal of Structural Engineering, V.112, No.2, pp. 326-341
- [5] Kheyroddin, A and Mortezaei, A, R. (2008) "The Effect of Element Size and Plastic Hinge

Investigation of Element Size Effect on the Nonlinear Behavior of Flanged Shear Walls

S.M. Khatami¹, A. Kheyroddin^{2*}

1- Teacher of Earthquake Engineering, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

kheyroddin@semnan.ac.ir

Abstract:

Completion and development of reliable analytical models using finite element method could help investigation and prediction of the actual structure response results. Analysis of each model in finite element software needs meshing, in which computer results are dependent specifically to geometry and dimensions of the elements, called "*mesh dependence*". Finding a strategy for independency of the results to meshing is tangible. For the mentioned purpose and also to investigate the role of finite elements meshing in flanged shear walls, finite element software was used. Different meshings of shear walls (tested by Vecchio and Palermo) were analyzed and studied. The results of analyses with different meshes showed different ultimate strengths and lateral displacements. Different shapes of mesh create various results, which are indicated in the finite element model. By increasing of the size of mesh, the final force was increased and the lateral displacement was decreased, which presents a rigid model. On the other hand, by decreasing of the dimension of mesh, a stiff model was seen. So, it is a need to create well prosed to analyze and evaluate the flanged section of shear walls with finite element model. Getting suitable accuracy of finite element model, the mentioned concrete shear wall (vecchio and Palermo) was modeled by ANSYS. 3D SOLID65 element was employed for modeling of shear wall structures. This element is capable of cracking in tension and crushing in compression. In concrete applications, for instance, the solid capability of the element may be used to model the concrete while the rebar capability is available for modeling of reinforcement behavior. After calibration, optimum forms and dimensions are recommended. As an illustration, an idea was presented, by which flanged shear wall could be analyzed more carefully in ultimate strength and ductility. This analysis showed that the results of squared mesh are closer to the fact. For example, this type of meshing 6% error in ultimate strength and ductility in accordance to lab Specimen, presented the closer responses. Furthermore, investigation on the optimum size of the mesh showed that if the mesh has the same size of the thickness of the connecting element (Shear Wall Web), the results will have very high accuracy. For instance, squared meshes with same dimension of meshes equal to web thickness, rather than those with half dimension of that led to 1% of lateral resistance, which is closer to experimental test. It is possible that web thickness is 150 mm, thereby, we can use mesh sizes of 150mm, 75mm or 50mm. However, in order to obtain ultimate loads accurately, the mesh size of 150mm seems reasonable. Square meshes have four degrees of freedom. If the size of square is chosen to be the same as the web thickness, nodal forces induced in the web would be proportionate. For this

Abstracts

challenge, a flanged section reinforced concrete shear wall tested was selected to confirm the web thickness square theory. This shear wall was modeled by finite element program. The results of analysis showed accuracy in the investigated theory. In this study, the web thickness square theory has indicated 8% error in ultimate strength.

Keywords: Flanged shear wall, Finite element, Element size, Web thickness square, Mesh dependency.