

تحلیل المان محدود دیوارهای برشی بتنی کوتاه با مقطع مستطیلی تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت

فرهاد محمدی دارانی^۱، عبدالرضا سروقد مقدم^{۲*}

۱- کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی شهر کرد

۲- استادیار و رئیس پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

moghadam@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۰۶

چکیده - استفاده از دیوارهای برشی بتنی کوتاه در ساختمان‌های کم ارتفاع، طبقات پایین ساختمان‌های بلند مرتبه و نیروگاه‌های هسته‌ای متداول است. قطعات دیوار شکل گرفته در دیوارهای برشی به‌وسیله‌ی بازشوهای در و پنجره نیز، رفتاری مشابه دیوارهای کوتاه دارند. به دلیل غالب بودن رفتار برشی در این دیوارها، تحلیل آن‌ها همواره با پیچیدگی‌هایی همراه بوده است. هدف از این نوشتار، یافتن اطلاعات مفید در مدل‌سازی دقیق و سریع دیوارهای برشی بتنی کوتاه در نرم‌افزارهای پرکاربرد تحلیل سازه‌های ساختمانی است. برای این منظور ۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی از این دیوارها با مقطع مستطیلی، انتخاب و در نرم‌افزارهای SAP 2000 و 3D PERFORM شبیه‌سازی شده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش در حالت‌های مختلف مدل‌سازی، پارامترهای کلیدی برای مدل‌سازی این دیوارها مشخص و کالیبره شده و چگونگی تعریف این پارامترها برای هر نرم‌افزار بیان شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌ها با آزمایش‌ها، نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب روش‌های استفاده شده برای تحلیل دیوارهای برشی بتنی کوتاه است.

واژگان کلیدی: دیوار برشی کوتاه، تحلیل المان محدود، بارگذاری استاتیکی یکنواخت، مقاومت جانبی.

۱ - مقدمه

دیوارهای برشی با نسبت ارتفاع به طول کم‌تر از ۱/۵، معمولاً به عنوان دیوار برشی کوتاه شناخته می‌شوند [۱]. به دلیل غالب بودن رفتار برشی در دیوارهای برشی کوتاه و پیچیده بودن مکانیسم انتقال برش در سازه‌های بتن‌آرمه، تحلیل این دیوارها همواره با پیچیدگی‌هایی همراه بوده است. برخی از محققان تلاش‌هایی برای تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی کوتاه انجام داده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

دیوارهای برشی کوتاه از اجزای سازه‌ای پرکاربرد در ایجاد سختی و مقاومت جانبی در ساختمان‌هاست. از این دیوارها در ساختمان‌های کم ارتفاع، طبقات پایین ساختمان‌های بلند مرتبه و نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده می‌شود. همچنین در بعضی مواقع قطعات شکل گرفته در دیوار به‌وسیله‌ی بازشوهای در و پنجره، رفتاری مشابه دیوارهای برشی کوتاه دارند.

تخصصی تحلیل المان محدود سازه‌ها انجام شده است. این نرم‌افزارها در طراحی و ارزیابی سازه‌ها بر اساس عملکرد کاربرد چندانی ندارند و طراحان معمولاً از مدل‌سازی سازه‌های پیچیده و با تعداد المان زیاد در این نوع نرم‌افزارها اجتناب می‌کنند.

با توجه به گرایش‌هایی که بر اساس عملکرد، نسبت به طراحی به وجود آمده، تمایل به مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی کوتاه در نرم‌افزارهای پرکاربرد طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد افزایش یافته است.

با توجه به مطالب ذکر شده نیاز به مدل‌سازی هر چه بهتر دیوارهای برشی کوتاه، که دارای رفتار پیچیده‌ای نیز می‌باشند، در نرم‌افزارهای طراحی بر اساس عملکرد نیاز احساس می‌شود؛ تا ضمن کاستن از پیچیدگی و زمان تحلیل و افزایش دقت آن، امکان استفاده از امکانات این‌گونه نرم‌افزارها در تحلیل و طراحی وجود داشته باشد.

به همین دلیل در این نوشتار با انتخاب دو نرم‌افزار پرکاربرد در زمینه‌ی طراحی بر اساس عملکرد یعنی SAP 2000 [۸] و PERFORM 3D [۹] در یافتن پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه و یافتن راهکارهایی برای تحلیل هرچه بهتر آن‌ها سعی شده است.

برای این منظور ۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی انتخاب و نتایج مدل‌سازی و تحلیل با نرم‌افزارهای مذکور با نتایج آزمایش‌ها مقایسه شده است. در انتخاب نمونه‌ها برای پوشش جنبه‌های مختلف رفتاری دیوارهای برشی کوتاه سعی شده است. با تغییر در پارامترهای مدل‌سازی در هر نرم‌افزار سعی شده است نتایج تحلیل به نتایج آزمایش نزدیک تا پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی و چگونگی تعریف آن‌ها در هر نرم‌افزار مشخص شود.

در ادامه به معرفی نمونه‌های انتخاب شده پرداخته و پس از آن چگونگی مدل‌سازی در دو نرم‌افزار شرح داده

در سال ۱۹۹۱، مؤسسه‌ی NUPEC [۲]، دو دیوار برشی کوتاه را تحت بارگذاری دینامیکی، تا وقوع شکست آزمایش و سپس نسبت به تحلیل آن‌ها اقدام کرد. در تحلیل‌های المان محدود از نرم‌افزارهایی مثل ABAQUS [۳] و ADIANA [۴] استفاده شد. مقاومت برشی حداکثر تخمین زده شده به‌وسیله‌ی تحلیل المان محدود، بین ۶۵ تا ۱۱۵ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تجربی و میزان تغییر مکان در مقاومت برشی حداکثر بین ۲۵ تا ۱۸۵ درصد مقادیر تغییر مکان اندازه‌گیری شده‌ی تجربی به دست آمد. اختلاف بین مقادیر تغییر مکان تخمین زده شده ناشی از نبود دقت مناسب در تخمین صحیح تغییر مکان در مقاومت حداکثر است و چنین اختلافی در مقادیر شکل‌پذیری به دست آمده از تحلیل، به چشم نمی‌خورد.

در سال ۲۰۰۲، پالمو و وچو [۵] دو دیوار برشی کوتاه را، که با عناوین DP1 و DP2 نام‌گذاری شدند، آزمایش کردند. پاسخ دیوارها با نرم‌افزار VecTor2 [۶] شبیه‌سازی شد. مقاومت برشی حداکثر به ترتیب برای دیوارهای DP1 و DP2، ۲ درصد و ۱۷ درصد مقاومت برشی حداکثر اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی تخمین زده شد.

در سال ۲۰۰۹، گولک و ویتاکر [۷] با انتخاب دو نرم‌افزار ABAQUS [۳] و VecTor2 [۶] دست به مدل‌سازی ۶ نمونه دیوار برشی کوتاه زدند. در آن تحقیق، محققان با انجام مطالعات پارامتری روی پارامترهای مدل‌سازی ارائه شده در دو نرم‌افزار، پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه را در هر نرم‌افزار مشخص و پیشنهادهایی برای مدل‌سازی این‌گونه دیوارها در نرم‌افزارهای مذکور، ارائه کردند.

همانگونه که مشخص است تلاش‌های انجام شده برای تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی کوتاه اکثراً با نرم‌افزارهای

می‌شود. سپس نتایج تحلیل با نتایج آزمایش مقایسه و کارایی روش‌های پیشنهادی بررسی می‌شود.

M3 و M4 آزمایش گریفننگن [۱۳]، می‌باشد. جدول ۱ و ۲ بیانگر خصوصیات مدل‌ها است.

در جدول (۱)؛ h_w ارتفاع دیوار، l_w طول دیوار، l_c طول المان مرزی که ضخامت آن با ضخامت جان برابر است، t ضخامت دیوار، h_b ارتفاع تیر فوقانی، w_b عرض تیر فوقانی، ρ_v نسبت آرماتورهای قائم جان، ρ_h نسبت آرماتورهای افقی جان، ρ_1 نسبت آرماتورهای طولی المان مرزی، f_{vy} تنش تسلیم آرماتورهای قائم، f_{hy} تنش تسلیم آرماتورهای افقی و f_c مقاومت فشاری بتن است.

۲- معرفی نمونه‌ها

تعداد ۵ نمونه‌ی آزمایشگاهی برای راستی سنجی تحلیل‌های انجام شده، انتخاب شده است. این نمونه‌ها شامل نمونه‌ی WALL1 آزمایش شده به وسیله‌ی ویرادیناتا و ساتیوغلو [۱۰]، نمونه‌ی U1.0 آزمایش کوانگ و هو [۱۱]، نمونه‌ی SW26 آزمایش لفاز و همکاران [۱۲] و نمونه‌های

جدول (۱) مشخصات هندسی و مصالح نمونه‌های انتخاب شده

محقق	نمونه	h_w (mm)	l_w (mm)	l_c (mm)	t (mm)	h_b (mm)	w_b (mm)	ρ_v %	ρ_h %	ρ_1 %	f_{vy} (MPa)	f_{hy} (MPa)	f_c (MPa)
Wiradinata, Saatcioglu (۱۹۸۶)	Wall 1	۱۰۰۰	۲۰۰۰	-	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۰/۸	۰/۲۵	-	۴۳۵	۴۲۵	۲۵
Kuang, Ho (۲۰۰۸)	U1.0	۱۲۰۰	۱۲۰۰	-	۱۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۰/۹۲	۱/۰۵	-	۵۲۰	۵۲۰	۳۰/۴
Lefasetal. (۱۹۹۰)	SW26	۱۳۰۰	۶۵۰	۱۴۰	۶۵	۱۵۰	۲۰۰	۲/۵	۰/۴	۳/۳	۴۷۰	۵۲۰	۲۵
Greifenhagen (۲۰۰۶)	M3	۶۱۰	۹۰۰	-	۸۰	۵۰۰	۳۵۰	۰/۳	۰/۳	-	۵۰۴	۷۴۵	۲۰/۱
Greifenhagen (۲۰۰۶)	M4	۶۱۰	۹۰۰	-	۸۰	۵۰۰	۳۵۰	۰/۳	۰/۳	-	۵۰۴	۷۴۵	۲۴/۴

جدول (۲) مشخصات آزمایشگاهی و مود شکست نمونه‌های انتخاب شده

محقق	نمونه	نوع آزمایش	میزان بار محوری (KN)	مود شکست
Saatcioglu, Wiradinata (۱۹۸۶)	Wall 1	Cyclic	۰	کشش قطری (تسلیم آرماتورهای افقی)
Kuang, Ho (۲۰۰۸)	U1.0	Cyclic	۳۰۰	تسلیم آرماتورهای قائم، خرد شدگی بتن در پنجه‌ی دیوار
Lefasetal. (۱۹۹۰)	SW26	Monotonic	۰	خرد شدگی بتن جان
Greifenhagen (۲۰۰۶)	M3	Cyclic	۱۳۶	کشش قطری، کماتش آرماتورهای قائم و خرد شدگی بتن در پنجه‌ی دیوار
Greifenhagen (۲۰۰۶)	M4	Cyclic	۷۶	کمانش آرماتورهای قائم، تسلیم آرماتورهای قائم و خرد شدگی بتن در پنجه‌ی دیوار

۳- کلیات

نوع تحلیل در دو نرم‌افزار انتخاب شده، تحلیل المان محدود لایه‌ای غیرخطی است. در این نوع تحلیل هر المان از چند لایه تشکیل شده که هر لایه عهده‌دار وظیفه‌ی مدل‌سازی رفتار خاصی از المان است. رفتار هر لایه در حقیقت همان منحنی تنش-کرنش متناظر با مصالح و نوع تنش (محوری یا برشی) آن لایه است. به عنوان مثال برای سازه‌های بتن آرمه، المان باید شامل لایه‌هایی باشد که بتوانند رفتار آرماتورها که رفتاری محوری است و رفتار بتن که شامل رفتار محوری (کشش، فشار و خمش) و رفتار برشی است را مدل کنند. برای مدل‌سازی رفتار بتن معمولاً لایه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول وظیفه‌ی مدل‌سازی رفتار محوری و دسته‌ی دوم وظیفه‌ی مدل‌سازی رفتار برشی بتن را بر عهده دارند. برای مدل‌سازی رفتار برشی بتن دو روش به کار می‌رود. مدل‌سازی منحنی تنش برشی-کرنش بتن راه اول و تبدیل تنش‌های برشی به تنش‌های محوری قطری با کمک قوانین مربوط به تبدیل تنش‌ها و مدل‌سازی منحنی تنش محوری-کرنش بتن در امتداد قطری المان دومین راه است که در بعضی از موارد نیز از ترکیب دو روش استفاده می‌شود. در ادامه چگونگی تعریف المان‌ها برای هر نرم‌افزار به طور مجزا بیان می‌شود.

جزئیات تحلیل‌ها، پرهیز می‌شود.

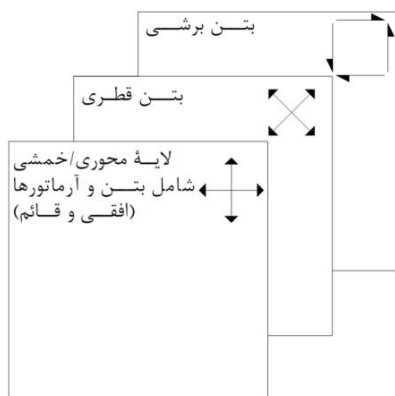
در ادامه، جزئیات لازم برای مدل‌سازی این دیوارها در PERFORM 3D شرح داده شده است.

۴-۱- المان‌ها

برای مدل‌سازی المان‌ها باید خصوصیات سه لایه‌ی تشکیل دهنده‌ی هر المان به نرم‌افزار معرفی شود. این لایه‌ها شامل ۱- لایه‌ی محوری/خمشی؛ ۲- لایه‌ی بتن قطری که زاویه‌ی آن نسبت به محور افقی ۴۵ درجه منظور شده؛ ۳- لایه‌ی بتن برشی، می‌باشد. لایه‌ی محوری/خمشی رفتار بتن و آرماتورها را در دو جهت افقی و قائم مدل می‌کند. شکل ۱ نشانگر المان دیوار به تفکیک لایه‌ها و جهت تأثیر آنهاست.

برای هر لایه باید منحنی تنش-کرنش مصالح آن لایه به نرم‌افزار معرفی شود. در ادامه به معرفی این منحنی‌ها پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که در معرفی رفتار تنش-کرنش مصالح، سعی شده تا خصوصیات آنها با خصوصیات مصالح کاربردی در ساخت و سازه‌های واقعی همخوانی داشته باشد.

آرماتورها: به صورت الاستیک-پلاستیک کامل با مدول الاستیسیته‌ای برابر $2 \times 10^4 \text{ KPa}$ و مقاومتی به اندازه‌ی تنش تسلیم آرماتورها مدل می‌شوند.



شکل (۱) لایه‌های تشکیل دهنده‌ی هر المان در PERFORM 3D و جهت تأثیر آنها

۴- مدل‌سازی در نرم‌افزار PERFORM 3D

مدل‌های مختلفی از نمونه‌های آزمایشگاهی معرفی شده در این نرم‌افزار ساخته شد. در این مدل‌ها تأثیر تغییر در پارامترهایی مثل لحاظ کردن مقاومت کششی برای بتن در لایه‌ی محوری/خمشی با مدل‌های مختلف رفتار کششی، لحاظ کردن لایه‌ی بتن برشی با مقادیر مختلف برای سختی و مقاومت آن، گیردار یا مفصلی بودن تکیه‌گاه‌ها و ابعاد المان‌ها بررسی شد که برای حفظ اختصار از پرداختن به

برای مقادیر $2 < h_w/l_w < 1.5$ از درون یابی خطی استفاده می شود.

در روابط فوق G مدول (سختی) برشی بتن، برای سختی لایه‌ی برشی است. v_c سهم بتن در مقاومت برشی بر حسب مگاپاسکال بر اساس ضوابط ACI318-08 [۱۴] فصل ۲۱، برای مقاومت لایه‌ی برشی استفاده می شود. α_c ضریب نسبت ارتفاع به طول دیوار و θ ضریب پواسون است.

۴-۲- مدل تحلیلی

صرف نظر از مدل سازی فونداسیون دیوارها، نقاط برخورد گره‌های المان‌ها با فونداسیون هم در مقابل انتقال و هم چرخش، مقید می شوند. ابعاد المان‌ها به گونه‌ای انتخاب می شود که ضلع کوچک تر دیوار را به حدود ۱۰ قسمت تقسیم کند و المان‌ها تا حد امکان مربعی باشند. البته نیازی نیست ابعاد المان از فاصله‌ی بین آرماتورها کوچک تر انتخاب شود تا توزیع آرماتورها در مدل به نمونه‌ی واقعی نزدیک تر باشد. در صورت وجود بار محوری، بهتر است لایه‌ی قطری در برابر آن غیر فعال شود تا سختی الاستیک دیوار بیش از حد، تخمین زده نشود.

۵- مدل سازی در SAP2000

تحلیل‌های فراوانی به منظور یافتن و بهینه کردن پارامترهای مدل سازی در نرم افزار SAP2000 انجام شد. تأثیر متغیرهایی مثل لحاظ کردن مقاومت کششی برای بتن و مدل‌های مختلف آن در لایه‌های بتن قطری یا بتن محوری/خمشی، تأثیر لایه‌ی محوری/خمشی، گیردار یا مفصلی مدل کردن تکیه‌گاه‌ها، ابعاد المان‌ها و تأثیر مدل سازی تیر بالایی و فونداسیون نمونه‌ی آزمایشگاهی در نتایج بررسی شدند.

در ادامه جزئیات لازم برای مدل سازی دیوارهای برشی کوتاه در SAP 2000 شرح داده شده است.

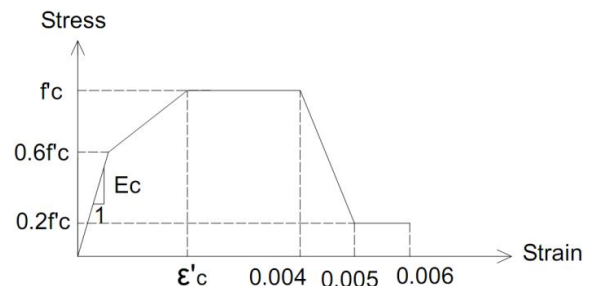
بتن در فشار: برای بتن هم در لایه‌ی محوری/خمشی و هم در لایه‌ی قطری از منحنی مشابه استفاده شده است. در شکل ۲ منحنی تنش فشاری-کرنش بتن که با توجه به محدودیت‌های نرم افزار 3D PERFORM ساخته شده، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که از مقاومت کششی بتن در مدل‌های ساخته شده در این نرم افزار صرف نظر شده است.

با توجه به شکل ۲؛ ϵ_c' و E_c از روابط زیر قابل محاسبه است [۶].

$$\epsilon_c' = 1.8 + 0.0075 f_c' (MPa) \quad (1)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_c'} (MPa). \quad (2)$$

در روابط فوق f_c' مقاومت فشاری مشخصه‌ی بتن بر حسب مگاپاسکال، E_c مدول الاستیسیته‌ی بتن بر حسب مگاپاسکال و ϵ_c' کرنش بتن در مقاومت مشخصه می باشد.



شکل (۲) منحنی تنش فشاری-کرنش بتن تعریف شده در 3D PERFORM

بتن برشی: رفتار این لایه به صورت دو خطی، الاستیک-پلاستیک کامل مدل می شود. سختی و مقاومت این لایه از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$G = \frac{E_c}{2(1+\theta)} \approx 0.4E_c. \quad (3)$$

$$v_c = \alpha_c \sqrt{f_c'} (MPa).$$

$$\text{for } \frac{h_w}{l_w} \leq 1.5 \rightarrow \alpha_c = 0.25. \quad (4)$$

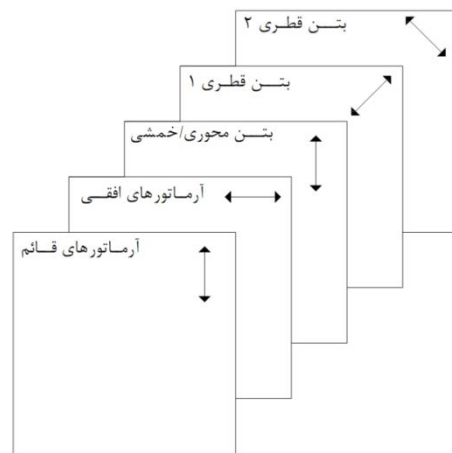
$$\text{for } \frac{h_w}{l_w} \geq 2 \rightarrow \alpha_c = 0.17.$$

۵-۱- المان‌ها

انتخاب لایه‌ها، نتایج خوبی در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در این نرم‌افزار به دست می‌دهند. این لایه‌ها شامل ۱- آرماتورهای قائم؛ ۲- آرماتورهای افقی؛ ۳- بتن محوری/خمشی؛ ۴- بتن قطری ۱؛ ۵- بتن قطری ۲، می‌باشند. زاویه‌ی لایه‌های قطری نسبت به محور افقی برابر ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نشانگر المان به تفکیک لایه‌ها و جهت تأثیر آن‌هاست. برای هر لایه باید منحنی تنش-کرنش مصالح تشکیل دهنده‌ی آن به نرم‌افزار معرفی شود. در ادامه به معرفی این منحنی‌ها پرداخته می‌شود.

آرماتورها: به صورت الاستیک-پلاستیک کامل با مدول الاستیسیته‌ای برابر $2 \times 10^4 \text{ KPa}$ و مقاومتی به اندازه‌ی تنش تسلیم آرماتورها مدل می‌شوند.

بتن در لایه‌ی محوری/خمشی: منحنی تنش فشاری-کرنش بتن بر اساس روابط (۵) تا (۷)، که مطابق یکی از پیش فرض‌های برنامه است، تعریف می‌شود [۱۵].



شکل (۳) لایه‌های تشکیل دهنده‌ی هر المان در SAP 2000 و جهت تأثیر آن‌ها

$$f_c = \frac{f_c' \times \epsilon_c}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'}\right)^r} \text{ For } \epsilon \leq 2\epsilon_c' \quad (5)$$

$$f_c = \left(\frac{2f_c' r}{r-1+2r} \right) \left(\frac{\epsilon_u - \epsilon}{\epsilon_u - 2\epsilon_c'} \right) \text{ For } 2\epsilon_c' < \epsilon \leq \epsilon_u \quad (6)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - (f_c' / \epsilon_c)} \quad (7)$$

در روابط فوق، ϵ کرنش فشاری در بتن، f_c تنش فشاری در بتن، E_c مدول الاستیسیته (رابطه‌ی ۲)، f_c' مقاومت فشاری بتن، ϵ_c' کرنش بتن در مقاومت فشاری (رابطه‌ی ۱) و ϵ_u کرنش نهایی بتن که برابر ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده، می‌باشد.

لازم به ذکر است که چون تأثیر مقاومت کششی بتن در مقاومت خمشی دیوار ناچیز است؛ در بتن لایه‌ی محوری/خمشی، از لحاظ کردن مقاومت کششی بتن صرف‌نظر شده است.

بتن در لایه‌ی بتن قطری: این لایه برای مدل‌سازی رفتار برشی دیوار مدل می‌شود. رفتار بتن در فشار در لایه‌ی قطری بر اساس منحنی‌های تنش فشاری-کرنش تک محوره و کاملاً مشابه بتن لایه‌ی محوری/خمشی مدل شده است.

به دلیل تأثیرگذاری مقاومت کششی بتن در مقاومت برشی دیوار، مقاومت کششی بتن در لایه‌های بتن قطری لحاظ و از دو روش برای مدل‌سازی رفتار کششی بتن استفاده شده است. مدلی با در نظر گرفتن افت تدریجی و مدل دیگر با افت ناگهانی پس از رسیدن به مقاومت کششی حداکثر، ساخته می‌شود. مدل اول، که با نام T1 نامگذاری شده، مطابق نمودار شکل ۴ و مدل دوم، که با نام T2 نامگذاری شده است، مطابق نمودار شکل ۵ مدل می‌شود.

در مدل T1 هدف لحاظ کردن اثر سخت شونده‌ی کششی است، این اثر بر این اصل استوار است که پس از ترک خوردگی، بتن بین ترک‌ها در اثر چسبندگی فولاد و بتن در تحمل تنش‌های کششی نقش ایفا می‌کند.

در مدل T2 اگر چه بعد از رسیدن بتن به تنش ترک خوردگی، نمودار تنش کششی-کرنش افت ناگهانی دارد؛

۵-۲- مدل تحلیلی

اگر حذف لایه‌ی محوری/خمشی در پاسخ دیوار (منحنی نیرو-تغییر مکان) هیچ گونه تأثیری نداشته و رفتار دیوار کاملاً برشی باشد، از مدل T1 و در غیر این صورت از مدل T2 استفاده می‌شود. بر همین اساس به غیر از نمونه‌ی WALL1 که در آن برای مدل‌سازی رفتار کششی بتن از مدل T1 استفاده شده، در بقیه‌ی مدل‌ها از مدل T2 استفاده شده است.

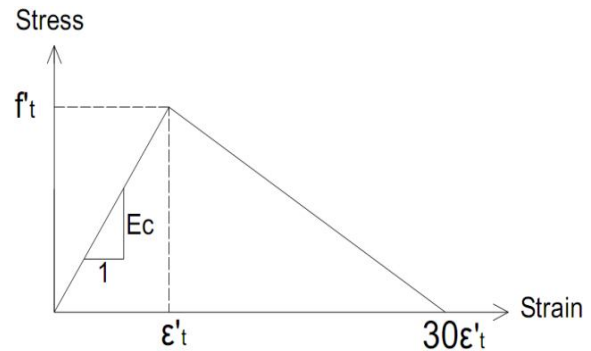
بررسی‌ها نشان داد برای دیوارهایی که فاصله‌ی آرماتورهای قائم و نسبت آن مناسب است، مدل‌سازی تکیه-گاه‌ها به صورت گیردار یا مفصلی تفاوتی با هم نمی‌کند، اما در مورد دیوارهایی که نسبت آرماتورهای قائم کم (حدود ۰/۳ درصد) و فاصله‌ی بین آن‌ها زیاد است مدل‌سازی تکیه‌گاه‌ها به صورت مفصلی نتایج بهتری را به دست می‌دهد. در این تحقیق نمونه‌های M3 و M4 با تکیه‌گاه مفصلی و بقیه‌ی نمونه‌ها با تکیه‌گاه گیردار مدل شدند. ابعاد المان‌ها مشابه آنچه برای PERFORM 3D گفته شد انتخاب می‌شود.

۶- مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش

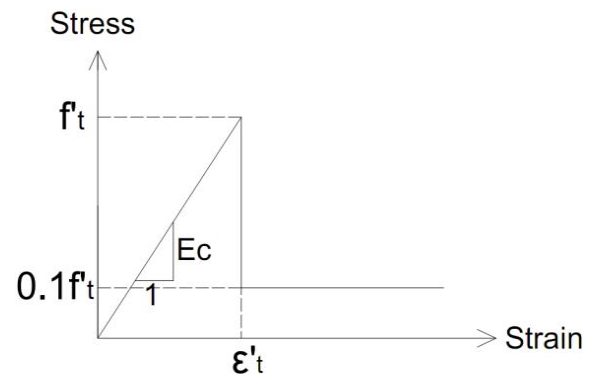
در این قسمت بر اساس مطالبی که ذکر آن رفت، نتایج تحلیل نمونه‌های انتخاب شده با نتایج آزمایش مقایسه می‌شود. نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی یکنواخت است. در مواردی که نمونه‌ی آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته، پوش منحنی هیستریزس برای مقایسه با نتایج تحلیل، استفاده شده است.

به دست آوردن حد تغییر شکل دیوار با دقت خوب نیازمند تحلیل المان محدودی است که برای مدل‌سازی شکست در سازه‌های بتن آرمه توسعه داده شده باشد؛ به عنوان مثال آثار ترک‌خوردگی، نرم‌شوندگی فشاری،

اما طبق توصیه‌های موجود مقاومت پسماندی برابر ده درصد تنش ترک خوردگی برای آن لحاظ می‌شود [۶].



شکل (۴) منحنی تنش کششی - کرنش بتن (مدل T1)



شکل (۵) منحنی تنش کششی - کرنش بتن (مدل T2)

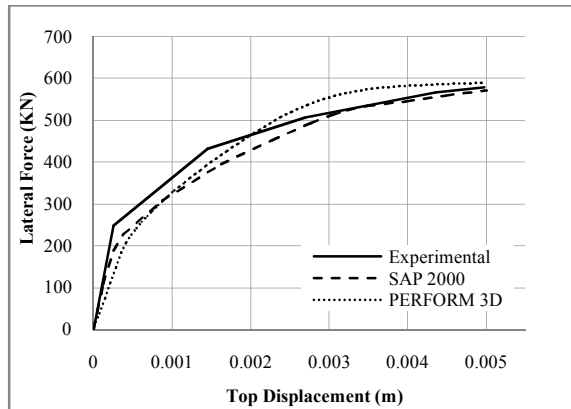
پارامترهای مدل‌سازی منحنی تنش کششی-کرنش بتن از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند [۶].

$$f'_t = 0.33\sqrt{f'_c} \text{ MPa.} \quad (8)$$

$$\epsilon'_t = f'_t / E_c = 6.6 \times 10^{-5}. \quad (9)$$

در روابط فوق f'_t مقاومت کششی یا تنش ترک خوردگی بتن بر حسب مگاپاسکال، E_c مدول الاستیسیته‌ی بتن بر حسب مگاپاسکال (رابطه‌ی ۲) و ϵ'_t کرنش ترک خوردگی بتن است. برای کرنش نهایی بتن در کشش در مدل T1 از حداکثر مقدار توصیه شده یعنی $30\epsilon'_t$ استفاده شده است [۱۶].

است. با توجه به نسبت ارتفاع به طول کم این نمونه (۰/۵) و این که رفتار نمونه کاملاً برشی است؛ نمودار شکل (۶) نشان می‌دهد روش‌های پیشنهادی برای تخمین دیوارهای با رفتار غالب برشی از دقت مناسب برخوردارند.



شکل (۶) مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نمونه‌ی WALL1 [۱۰]

با توجه به نمودار شکل ۷، هر دو نرم‌افزار مقاومت حداکثر بیش‌تری برای نمونه‌ی U1.0 در تغییر مکانی کم‌تر نسبت به مقدار واقعی به دست داده‌اند. علت این موضوع تغییر در خصوصیات آرماتورهای قائم و بتن تحت فشار ناشی از خمش در نمونه‌ی واقعی به دلیل بارگذاری چرخه‌ای است که این مورد در تحلیل‌های استاتیکی یکنواخت پوشش داده نمی‌شود. شکل کلی نمودار با دقت مناسبی به وسیله‌ی هر دو نرم‌افزار، تخمین زده شده است.

با توجه به نمودار شکل ۸، در خصوص نمونه‌ی SW26، نرم‌افزار SAP 2000 بهتر از PERFORM 3D عمل کرده و مقاومت و شکل کلی نمودار را بهتر تخمین زده است. مود شکست این دیوار خرد شدگی بتن در جان دیوار است. یعنی منحنی تنش فشاری-کرنش بتن در تعیین رفتار دیوار، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و چون این منحنی در PERFORM 3D با دقت کم‌تری نسبت به SAP 2000 تعریف می‌شود، دقت نتایج آن نیز کم‌تر است.

سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی کششی و مدل‌های آسیب پلاستیک بتن را شامل شده و توانایی اصلاح خصوصیات مدل را در طی روند تحلیل داشته باشد.

چون نرم‌افزارهای SAP 2000 و PERFORM 3D تا زمان انجام این تحقیق فاقد امکانات مذکورند از بحث درباره‌ی حد تغییر شکل تخمین زده شده با این نرم‌افزارها خودداری می‌شود. بنابراین در تحلیل‌های انجام شده حد تغییر شکل برای توقف تحلیل برابر با حد تغییر شکل حاصل از آزمایش به نرم‌افزارها معرفی شده است. لازم به ذکر است که برای حد تغییر شکل در دیوارهای برشی بتنی کوتاه می‌توان از توصیه‌های موجود در آیین‌نامه‌ها یا دستورالعمل‌ها در این زمینه استفاده کرد [۱].

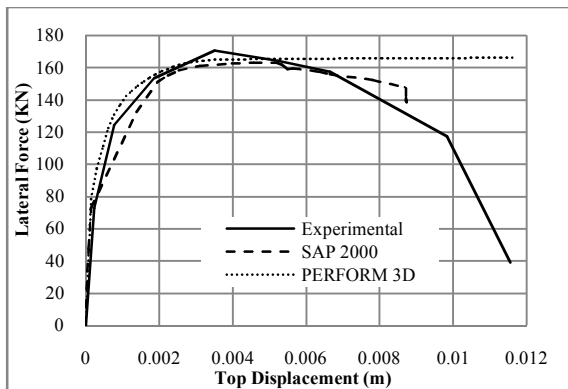
جدول ۳ نشانگر نسبت مقاومت جانبی حاصل از تحلیل به مقاومت حاصل از آزمایش برای هر نمونه است.

جدول (۳) نسبت مقاومت حاصل از تحلیل به مقاومت واقعی نمونه‌ها

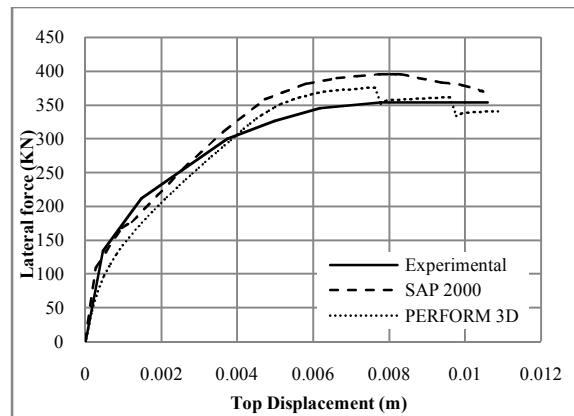
نمونه					
M4	M3	SW26	U1.0	WALL1	
۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۱/۱۱	۰/۹۹	SAP 2000 تحلیل
۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۸۳	۱/۰۶	۱/۰۲	PERFORM 3D آزمایش

با توجه به جدول ۳، میانگین نسبت مقاومت تخمین زده شده به مقاومت واقعی نمونه‌ها برای SAP 2000 برابر ۱/۰۰ و برای PERFORM 3D برابر ۰/۹۷ به دست می‌آید. این نتیجه حاکی از دقت مناسب روش‌های به کار گرفته شده در تخمین مقاومت دیوارهای برشی کوتاه در دو نرم‌افزار دارد. در ادامه نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از تحلیل و آزمایش برای هر نمونه ارائه و تفاوت‌های موجود بررسی می‌شود.

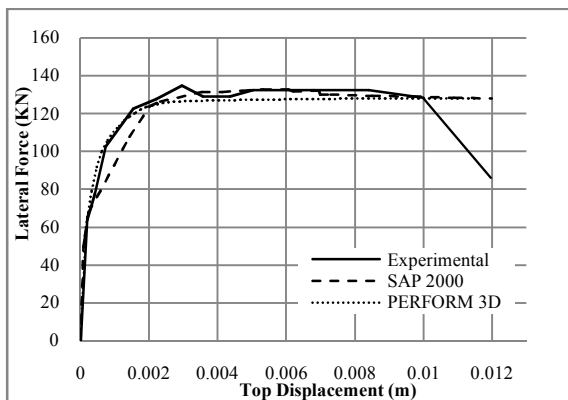
با توجه به نمودار شکل ۶، شکل کلی نمودار و مقاومت نمونه‌ی WALL1 با هر دو نرم‌افزار به خوبی تخمین زده شده، هرچند که سختی الاستیک این نمونه با نرم‌افزار PERFORM 3D کم‌تر از مقدار واقعی تخمین زده شده



شکل (۹) مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نمونه‌ی M3 [۱۳]



شکل (۷) مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نمونه‌ی U1.0 [۱۱]



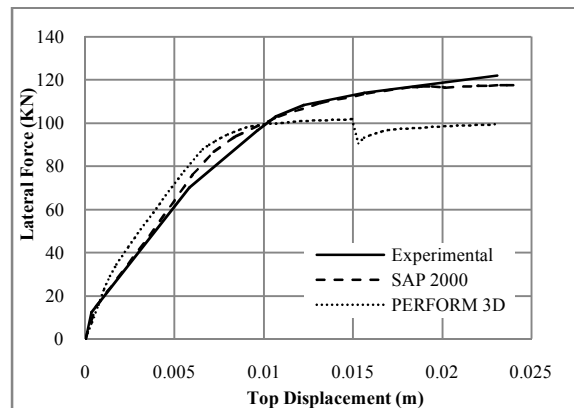
شکل (۱۰) مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نمونه‌ی M4 [۱۳]

در تحلیل‌هایی که بارگذاری روی مدل به صورت یکنواخت انجام می‌شود، در صورت قابلیت نرم‌افزار، می‌تواند میزان تغییر در نیروی اعمالی در هر گام تحلیل را با توجه به سختی حاصل از گام قبلی محاسبه کند. این تغییر در برخی موارد ممکن است به صورت کاهش باشد که همان افت مقاومت است.

همان‌گونه که برای نبود دقت مناسب تحلیل‌های المان محدود لایه‌ای غیرخطی در تخمین حد تغییر شکل نمونه‌ها بیان شد، تخمین میزان افت مقاومت نیز در این نوع تحلیل از دقت مناسبی برخوردار نیست. به همین دلیل در نمونه‌های M3 و M4 افت مقاومت نمونه‌ها به خوبی تخمین زده نشده است.

با توجه به نمودار شکل ۹ و شکل ۱۰ مقاومت و شکل

با توجه به نمودار شکل ۸ کاهش ناگهانی در سختی اولیه‌ی نمونه به خوبی با SAP 2000 مدل شده است. افت ناگهانی در قسمت افقی نمودار حاصل از PERFORM 3D ناشی از تسلیم یکی از المان‌ها و بازتوزیع تنش بین سایر المان‌هاست.



شکل (۸) مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایش نمونه‌ی SW26 [۱۲]

با توجه به نمودار شکل ۹ و شکل ۱۰، افت مقاومت پس از رسیدن به مقاومت حداکثر در نمونه‌های M3 و M4 مشهود است. لازم به یادآوری است که منحنی‌های ترسیم شده برای نتایج آزمایشگاهی این دو نمونه، پوش منحنی چرخه‌ای حاصل از آزمایش است که شامل افت مقاومت نیز می‌شود. نمودار آزمایش‌های با بارگذاری یکنواخت معمولاً بدون افت مقاومت تدریجی است.

- [14] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318) and Commentary, American Concrete Institute Committee 318, 2008.
- [15] Mander, J.B.; Priestly, M.J.N.; Park, R.; "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete"; Journal of Structural Engineering; 114(8), pp. 1804-1826, 1988.
- [۱۶] خیرالدین، ع.; مرتضایی، ع.; تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن آرمه به کمک روش اجزای محدود، دانشگاه سمنان، ۱۷۶، ۱۳۸۶.
- [10] Wirandianta, S.; Saatciuglu, M.; Tests of Squat Shear Wall Under Lateral Load Reversal, Proceedings, The 3rd US Conference on Earthquake Engineering, Charleston, South Carolina, 1986.
- [11] Kuang, J.S.; Ho, Y.B.; "Seismic Behavior and Ductility of Squat Reinforced Concrete Shear Walls with Nonseismic Detailing"; ACI Structural Journal; 105(2), 225, 2008.
- [12] Lefas, I.D.; Kotsovos, M.D.; Ambraseys, N.N.; "Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls: Strength, Deformation Characteristics and Failure Mechanism"; ACI Structural Journal; 87(1), pp. 23-31, 1990.
- [13] Greifenhagen, C.; Seismic Behavior of Lightly Reinforced Concrete Squat Shear Walls, PhD thesis, Lausanne EPFL, 2006.

چند در آزمایش‌های انجام شده روی دیوارهای برشی بتنی کوتاه به دلیل بسیار کوچک بودن تغییر شکل‌ها به خصوص در محدوده‌ی الاستیک خطای ابزارهای اندازه‌گیری قابل توجه است.

۸- مراجع

- [1] Elwood, K.J.; Matamoros, A.; Wallace, J.W.; Lehman, D.; Heintz, J.; Mitchell, A.; Moore, M.; Valley, M.; Lowes, L.N.; Comartin, C.; Moehle, J.P.; Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER Center), 2007.
- [2] Shear Wall ISP NUPEC's Seismic Ultimate Dynamic Response Test, Comparison Report, OECD/NEA/CSNI, Issy- Les-Moulineaux, France, Report No. OCDE/GD (96)188, Committee on the Safety of Nuclear Installations OECD Nuclear Energy Agency, 412, 1991.
- [3] ABAQUS Standard, version 5.3, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI. 1991.
- [4] ADIANA, version 6.1.5, R&D, Inc., Watertown, MA. 1991.
- [5] Palermo, D.; and Vecchio, F.J.; Behavior and Analysis of Reinforced Concrete Walls Subjected to Reversed Cyclic Loading, Publication No. 2002-01, Toronto, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 351, 2002.
- [6] Wong, P.S.; Vecchio, F.J.; VecTor2 and Formworks user's manual, Toronto, Dep., Civil Engineering, Univ. of Toronto, 2002.
- [7] Gulec, C.K.; Whittaker, A.S.; Performance-Based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls, Technical Report, MCEER-09-0010, 2009.
- [8] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, Berkeley, California, Computers and Structures, Inc., April 2009.
- [9] PERFORM COMPONENTS AND ELEMENTS FOR PERFORM-3D AND PERFORM COLLAPSE. VERSION 4, Berkeley, California, Computers and Structures, Inc., 2006.

کلی نمودار برای دو نمونه‌ی M3 و M4 تا قبل از نقطه‌ی افت مقاومت به خوبی توسط دو نرم‌افزار تخمین زده شده است. در نمونه‌ی M3 نرم‌افزار SAP 2000 تا حدودی افت و وقوع شکست را نشان داده است. هر دو نرم‌افزار سختی الاستیک این دو نمونه را کمی بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند. نرم‌افزار PERFORM 3D تغییر تدریجی از حالت الاستیک به پلاستیک برای این دو نمونه را با دقت بهتری به دست داده است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این نوشتار با مقایسه‌ی نتایج تحلیل با آزمایشات انجام شده روی ۵ نمونه‌ی دیوار برشی کوتاه، پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو نرم‌افزار پر کاربرد SAP 2000 و PERFORM 3D مشخص و چگونگی تعریف این پارامترها بیان شد. اهم نتایج حاصله به شرح زیر است.

- ۱- به طور کلی خصوصیات لایه‌ی بتن قطری در هر دو نرم‌افزار، مدل رفتار کششی بتن در SAP 2000 و خصوصیات لایه‌ی بتن برشی در PERFORM 3D از پارامترهای مهم و تعیین‌کننده در مدل‌سازی دیوارهای برشی بتنی کوتاه در این نرم‌افزارهاست.
- ۲- تحلیل‌های انجام شده با این دو نرم‌افزار، مقاومت و شکل کلی نمودار نیرو- تغییر مکان اکثر نمونه‌های مدل شده را با دقت مناسبی تخمین زده است. به طور کلی نرم‌افزار SAP 2000 مقاومت نمونه‌ها را از ۵ درصد کم‌تر تا ۱۱ درصد بیش‌تر از مقاومت حاصل از آزمایش و نرم‌افزار PERFORM 3D مقاومت نمونه‌ها را از ۱۷ درصد کم‌تر تا ۶ درصد بیش‌تر از مقاومت حاصل از آزمایش تخمین زده‌اند.
- ۳- به طور کلی می‌توان گفت این نوع تحلیل برای تخمین مقاومت دقت بهتری نسبت به تخمین سختی دارد. هر