

بررسی رفتار غیر خطی دیوارهای باربر و برشی بتنی با استفاده از آنالیز استاتیکی غیر خطی

مژگان عسگری¹، سعید تاروردیلو²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه ارومیه

mojgan.asgari66@gmail.com

2- دانشیار، گروه عمران، دانشگاه ارومیه

s.tariverdilo@urmia.ac.ir

چکیده

آیین نامه های طراحی سازه های بتنی شامل آیین نامه ACI و آبا تنها برای طراحی دیوارهای برشی تدوین شده اند. این ضوابط در صورت اعمال روی دیوارهای باربر منجر به طراحی بسیار محافظه کارانه ای می گردد که با توجه به عملکرد مناسب سیستم های فوق در زلزله های قبلی که فاقد این تمهیدات اجباری آیین نامه بوده اند به نظر می رسد که نیاز به اصلاح اساسی در این ضوابط و تفکیک ضوابط دیوارهای باربر و برشی از هم می باشد. در این مطالعه رفتار غیرخطی دیوارهای باربر و برشی بتنی با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی بررسی شده و لزوم این تصحیح بررسی شده است.

واژه های کلیدی: دیوار برشی، دیوار باربر، رفتار غیرخطی، آنالیز استاتیکی غیرخطی

1. مقدمه

استفاده از دیوار بتنی به عنوان سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی امری متداول است. دیوارهای بتنی باید به گونه ای شبیه سازی شوند که در عین سادگی از دقت کافی برخوردار بوده و رفتار غیرخطی آنها به خوبی ارائه شود و از طرفی در مقاصد تجاری به راحتی مورد استفاده قرار گیرد.

اطمینان از صحت عملکرد مدل های تحلیلی ایجاد شده برای دیوارهای برشی، همواره موجب نگرانی مهندسين سازه بوده است. نرم افزارهای کاربردی مختلفی که امروزه برای تحلیل های غیرخطی تهیه شده اند هر یک محدودیت ها و ویژگی هایی دارند. برخی از نرم افزارها امکان تحلیل های غیرخطی دیوار را بصورت مستقیم داشته و برای نرم افزارهای فاقد این ویژگی، می توان از روش های تقریبی مدل سازی استفاده کرد.

مدل های تحلیلی مختلفی برای نمایش پاسخ غیرخطی دیوارهای برشی ارائه شده است که رفتار خمشی دیوارها را با درجات مختلفی از اطمینان نمایش می دهد. یک مدل کارآمد لازم است که نمایش دقیقی از رفتار

برشی و خمشی دیوارهای برشی داشته باشد. این مدل باید بطور مناسب ظرفیت تغییر شکل، سختی و مقاومت برشی را مدل‌سازی نماید، احتمال گسیختگی ناشی از خمش و برش و گسیختگی ناشی از تامین طول مهاري ناکافی در مقطع دیوار برشی و اندرکنش با سایر اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای را در نظر بگیرد.

2. روش مدل‌سازی مورد مطالعه

در این مطالعه برای مدل‌سازی دیوار در نرم افزار Opensees از مدل مقطع fiber استفاده شده است. در این مدل، عضو در امتداد طول خود به چندین قسمت تقسیم شده و هر بخش هم شامل لایه‌های موازی می‌باشد. بعضی از این لایه‌ها مصالح بتنی و بعضی دیگر مصالح فولادی را تشکیل می‌دهند. به کار بردن این مدل برای توزیع مناسب هندسه دیوار، رفتار مواد و مسلح‌کننده‌ها و محاسبه پاسخ‌های مهم، مثل جابجایی محور خنثی در طول مقطع عرضی دیوار در هنگام بارگذاری و باربرداری، اندرکنش با اجزای متصل به قاب‌ها مثل دال-ستون یا تیرهای همبند در صفحه دیوار و عمود بر آن، تاثیر تغییر محور بار روی مقاومت و سختی خمشی دیوار مناسب است. پارامترهای مهم مدل‌سازی شامل تعریف خصوصیات مصالح برای میلگردهای طولی، بتن هسته دیوار و پوشش جان بتن است. با استفاده از مدل fiber می‌توان دقت مدل را بدون استفاده از تحلیل‌های پیچیده اجزاء محدود افزایش داد [1].

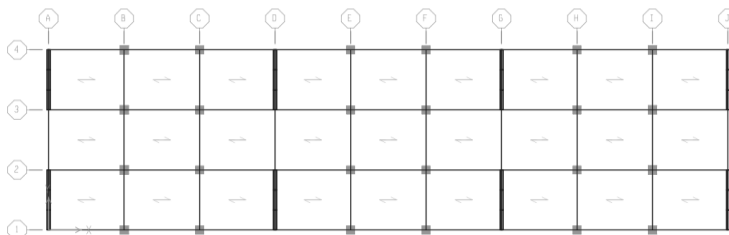
fiber های فولادی در این مطالعه با استفاده از Steel02 که مبتنی بر مدل تنش-کرنش Menegotto، Giuffre, Pinto است، مدل‌سازی شده است. در این مطالعه برای مدل‌سازی fiber های بتنی از Concret01 که بر اساس مدل تنش-کرنش اصلاح شده Kent-Park می‌باشد، استفاده شده است که مقاومت کششی آن صفر است [2].

المان مورد استفاده در مدل‌سازی دیوارها در نرم افزار Opensees، المان NonlinearBeamColumn می‌باشد و به دلیل این اینکه این المان قادر به لحاظ نمودن اندرکنش خمش و برش نیست لذا از تغییر شکل‌های ناشی از برش صرف نظر شده است.

3. طراحی دیوارهای نمونه

ابتدا ساختمان بصورت سه بعدی در نرم‌افزار ETABS 9.7.1 مدل‌سازی شده است و سهم بار ثقیلی دیوارهای نمونه از نرم افزار قرائت می‌شود. مشخصات مصالح در جدول (1) و بارگذاری در جدول (2) آورده شده است. دیوارها بر اساس آیین‌نامه ACI 318-05 و ASCE/SEI 7-05 طراحی شده‌اند [3,4]. برش پایه طراحی سازه و همچنین مقدار ضریب رفتار در جدول (3) ارائه شده است. سازه 10 طبقه بوده و دارای کاربری مسکونی است. ارتفاع طبقات 3/5 متر بوده و زیر بنای طبقات 540 مترمربع است طول دهانه‌ها در جهت x، 5 متر و در جهت y، 4 متر می‌باشد. شکل (1) پلانی از سازه مورد نظر را نشان می‌دهد. در طراحی دیوارها در پلان، دیوار

برشی در حدود 1 تا 2 درصد مساحت کف را تشکیل دهد. در مقابل دیوار باربر در حدود 5 تا 6 درصد از مساحت کف را به عنوان سیستم باربر جانبی تشکیل خواهند داد [5].



شکل (1): پلان سازه

جدول (1): مشخصات مصالح

$f'_c(MPa)$	$E_c(GPa)$	$f_y(MPa)$	$f_{ys}(MPa)$	$E_s(GPa)$
28	26.46	400	300	199.99

جدول (2): بارگذاری (N/m^2)

تراز	بار مرده	بار زنده
طبقات و بام	6000	2000

دیوارها در دو حالت شکل‌پذیری معمولی و ویژه طراحی شده، شکل مقطع دیوارها مستطیلی بوده و توزیع آرماتورهای قائم در آنها به دو صورت متمرکز در دو انتها و توزیع یکنواخت در طول دیوار می‌باشد. ارتفاع دیوارها 35 متر و طول آنها 4 متر می‌باشد. با توجه به اینکه نسبت ارتفاع دیوارها به طول آنها بزرگتر از 2 و برابر 8/75 می‌باشد، لذا رفتار غالب در این دیوارها، رفتار خمشی خواهد بود. مقاطع دیوار تا طبقه 4 یکسان و بعد از آن هر 3 طبقه یکبار تغییر یافته است. مشخصات دیوارهای نمونه در جدول (4) آورده شده است. در جداول (3) و (4) نام دیوارهای مورد مطالعه با 3 حرف مشخص شده است که حرف اول نشانگر نوع توزیع آرماتور در مقطع (یکنواخت، U، و متمرکز در دو انتها، L)، حرف دوم مربوط به نوع طراحی دیوارها (معمولی، O، و ویژه، S)، حرف سوم مربوط به نوع دیوار (باربر، B، و برشی، S) می‌باشد. برای مثال UOS به معنی دیوار برشی معمولی با توزیع یکنواخت آرماتور است. نسبت مساحت دیوارها به مساحت پلان A_w/A_p نیز در جدول (4) ارائه شده است.

جدول (3): مشخصات لرزه‌ای

Wall	UOS	LOS	UOB	LOB	USS	LSS	USB	LSB
ضریب رفتار (R)	5	5	4	4	6	6	5	5
$V_d(kN)$	8919	8919	10124	10124	6614	6614	7597	7597

جدول (4): مشخصات دیوارهای مورد مطالعه

Wall	Story	t(m)	$\rho\%$			Confined zone	A_w/A_p
			Total	Boundary	Web		
UOS	1-4	0.35	1.89	-	-	-	0.021
	5-7	0.3	1.41	-	-	-	0.018
	8-10	0.25	1.49	-	-	-	0.014
LOS	1-4	0.35	1.74	2.99	0.99	-	0.021
	5-7	0.3	1.3	2.81	0.91	-	0.018
	8-10	0.25	1.35	3.48	1.07	-	0.014
UOB	1-4	0.3	1.71	-	-	-	0.055
	5-7	0.25	1.09	-	-	-	0.047
	8-10	0.2	1.04	-	-	-	0.036
LOB	1-4	0.3	1.32	2.53	0.67	-	0.051
	5-7	0.25	0.97	2.03	0.62	-	0.046
	8-10	0.2	0.93	2.01	0.56	-	0.036
USS	1-4	0.3	2.53	-	-	1.00	0.018
	5-7	0.25	1.61	-	-	0.7	0.014
	8-10	0.2	1.54	-	-	-	0.012
LSS	1-4	0.3	2.1	3.27	1.16	0.9	0.018
	5-7	0.25	1.52	2.51	1.09	0.6	0.014
	8-10	0.2	1.32	2.32	0.98	-	0.012
USB	1-4	0.25	1.25	-	-	0.9	0.051
	5-7	0.2	1.19	-	-	0.7	0.040
	8-10	0.15	1.17	-	-	-	0.038
LSB	1-4	0.25	1.11	2.04	0.62	0.7	0.051
	5-7	0.2	0.93	2.01	0.57	0.5	0.040
	8-10	0.15	0.83	2.05	0.52	-	0.038

4. روش تحلیل

یکی از روش‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) است. در این روش بار جانبی ناشی از زلزله به تدریج و بصورت افزایشنده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در یک نقطه خاص تحت اثر بار جانبی به مقدار تغییر مکان هدف برسد و یا سازه فرو ریزد. اساس کلی این روش بدین صورت است که یک مدل ریاضی غیرخطی از سازه تحت یک الگوی بار جانبی قرار گرفته و این بار جانبی با آهنگ ثابتی افزایش می‌یابد تا زمانی که سازه به یک تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده برسد. این تغییر مکان هدف در یک نقطه کنترلی (مرکز جرم تراز بام) اندازه‌گیری می‌شود. در طول فرآیند افزایش صعودی بار جانبی، مقاومت و سختی اجزا سازه در هر گام با توجه به منحنی رفتاری غیرخطی که از پیش برای آنها تعریف شده اصلاح می‌شود.

اصلی‌ترین محصول این فرآیند، منحنی تغییرات برش پایه در مقابل تغییر مکان بام می‌باشد که به آن منحنی ظرفیت سازه گفته می‌شود که هر نقطه روی این منحنی بیان‌کننده یک حالت خسارت خاص برای سازه است.

در این مطالعه توزیع بار جانبی متناسب با شکل مود اول ارتعاش در جهت مورد نظر در نظر گرفته شده است [6].

5. بررسی نتایج حاصل از آنالیز

پس از طراحی دیوارها در برنامه ETABS، مدلها در نرم افزار Opensees مدلسازی شده و آنالیز می شوند. پس از انجام تحلیلها منحنی های برش پایه در برابر تغییر مکان بام ترسیم می شود. پارامترهای لرزه ای مهمی همچون نسبت شکل پذیری سیستم (μ_{Δ}) استخراج شده که از رابطه زیر بدست می آید، و همچنین مقایسه ای بین حداکثر مقاومت برشی سیستم های سازه ای که سیستم های باربر جانبی آن دیوار برشی و یا دیوار باربر است صورت گرفته است تا با استفاده از این داده ها رفتار لرزه ای این سیستم های سازه ای به خوبی مورد بررسی قرار گیرد. این مقادیر در جدول (5) آورده شده است.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{u}}{\Delta_{y}} \quad (1)$$

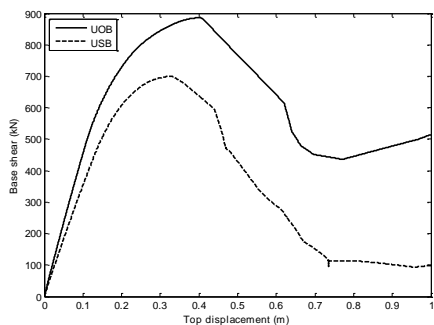
که در آن Δ_{y} جابجایی در تراز بام در نقطه تسلیم و Δ_{u} حداکثر جابجایی در تراز بام می باشد که نحوه محاسبه آنها در مراجع [6] و [7] بیان شده است.

همانطور که در شکل های (2-الف) و (3-الف) مشاهده می شود در دیوارهای برشی ویژه شکل پذیری پس از peak به دلیل محصور شدگی المانهای مرزی نسبت به دیوارهای برشی معمولی افزایش می یابد، اما در دیوارهای باربر ویژه همانگونه که در شکل های (2-ب) و (3-ب) مشاهده می شود محصور شدگی تاثیر چندانی در افزایش شکل پذیری ندارد. این تفاوت به دلیل کاهش ناحیه محصور شده در دیوارهای باربر به دلیل افزایش تعداد دیوارها در پلان سازه می باشد.

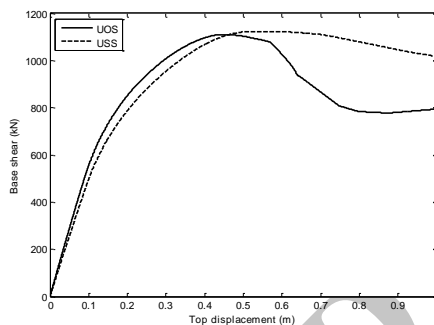
شکل های (4-الف) و (4-ب) تاثیر تمرکز آرماتور در دو انتهای دیوار را در دیوارهای برشی معمولی و ویژه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تمرکز آرماتور در انتهاها باعث افزایش ظرفیت برشی و به مقدار جزئی باعث کاهش شکل پذیری در دیوارهای برشی ویژه و معمولی خواهد شد.

شکل های (5-الف) و (5-ب) تاثیر تمرکز آرماتور در دو انتهای دیوار را در دیوارهای باربر معمولی و ویژه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تمرکز آرماتور در انتهاها باعث افزایش ظرفیت برشی و به مقدار جزئی باعث کاهش شکل پذیری در دیوارهای باربر ویژه و معمولی خواهد شد.

شکل های (6) و (7) تاثیر محصور شدگی در دیوارهای ویژه را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود در صورتی که محصور شدگی در دیوارها اعمال شود ظرفیت برشی دیوارها افزایش خواهد یافت.

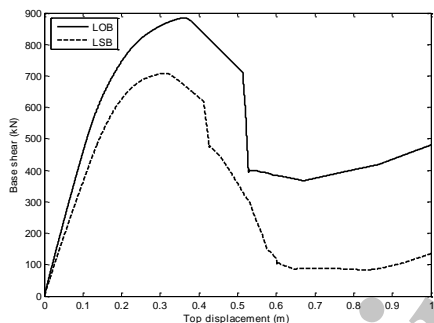


ب) UOB و USB

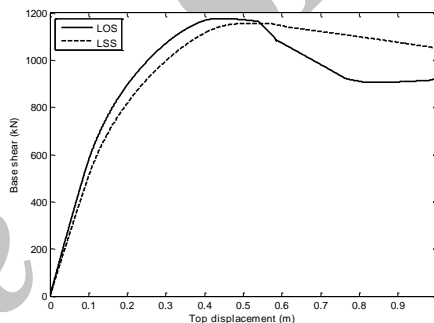


الف) UOS و USS

شکل (2): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای باربر و برشی و تاثیر محصورشدگی با توزیع یکنواخت آرماتور در مقطع

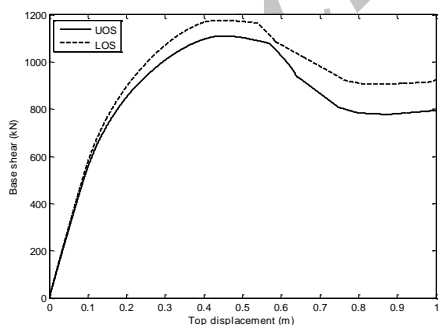


ب) LOB و LSB

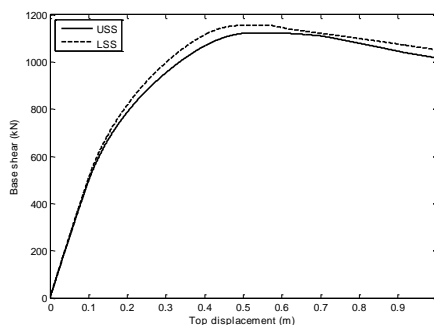


الف) LOS و LSS

شکل (3): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای باربر و برشی و تاثیر محصورشدگی در حالت تجمع آرماتورهای قائم در دو انتها

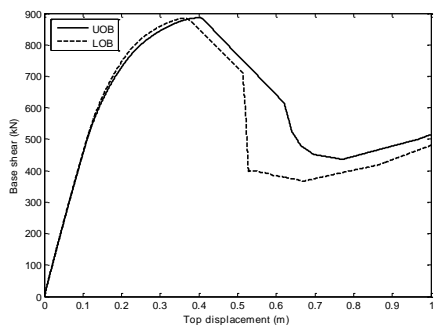


ب) UOS و LOS

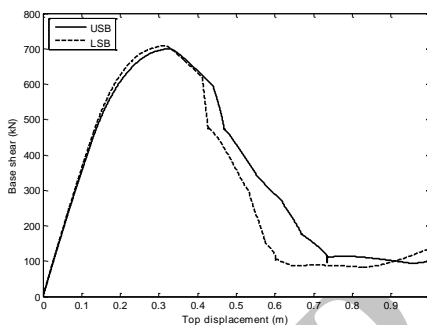


الف) USS و LSS

شکل (4): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای برشی معمولی و ویژه و تاثیر محصورشدگی در حالت تجمع آرماتورهای قائم در دو انتها

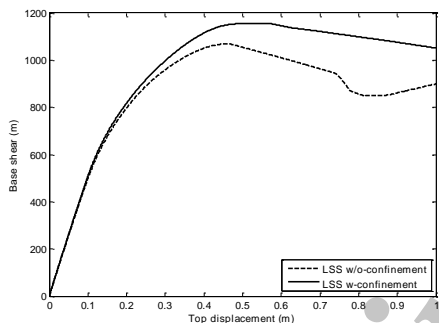


ب) UOB و LOB

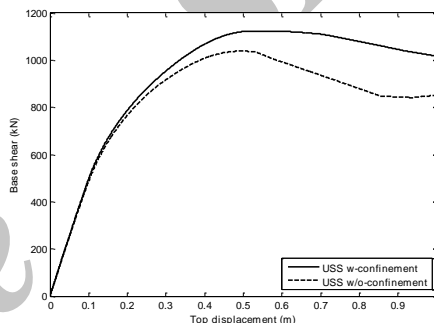


الف) USB و LSB

شکل (5): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای باربر معمولی و ویژه و تاثیر محصورشدگی در حالت تجمع آرماتورهای قائم در دو انتها

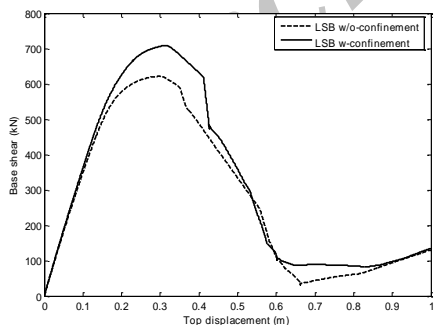


ب) LSS w/o-cofinement و LSS w-cofinement

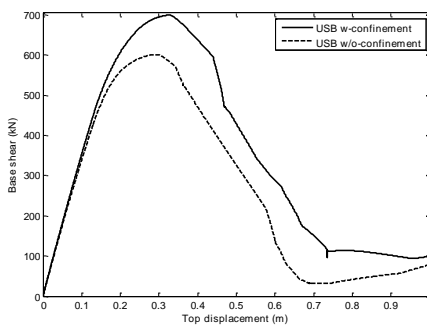


الف) USS w/o-cofinement و USS w-cofinement

شکل (6): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای برشی ویژه در دو حالت تجمع آرماتورهای قائم در دو انتها و توزیع یکنواخت



ب) LSB w/o-cofinement و LSB w-cofinement



الف) USB w/o-cofinement و USB w-cofinement

شکل (7): مقایسه منحنی ظرفیت دیوارهای باربر ویژه در دو حالت تجمع آرماتورهای قائم در دو انتها و توزیع یکنواخت

به منظور مقایسه مقاومت کل سیستم در حالت دیوار برشی و باربر بصورت زیر عمل می‌کنیم چون در سیستم‌های دارای دیوار برشی در این مطالعه از 8 دیوار استفاده شده و سیستم‌های دارای دیوار باربر دارای 20 دیوار در پلان هستند نیروی برش ماکزیمم به صورت تقریبی از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$f_s = 8 \times V_{\max} \quad (2)$$

$$f_B = 20 \times V_{\max} \quad (3)$$

که در آن f_s نیروی برشی ماکزیمم برای سیستم دارای دیوار برشی، f_B نیروی برشی ماکزیمم برای سیستم دارای دیوار باربر است و V_{\max} نیروی برشی حداکثر ناشی از آنالیز است که مقادیر آن در جدول (4) بیان شده است.

$$\alpha_1 = \frac{f_s}{V_d} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \frac{f_B}{V_d} \quad (5)$$

که V_d نیروی برش پایه طراحی سیستم‌های دارای دیوار برشی و باربر است که در جدول (3) مقادیر آن بیان شده است. α_1 و α_2 نسبت نیروی برشی ماکزیمم حاصل از آنالیز بر نیروی برش پایه طراحی است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود مقاومت سیستم‌های باربر نسبت به سیستم‌های دارای دیوار برشی بسیار زیاد است به طوری که UOS دارای کمترین مقدار و LSB دارای بیشترین مقدار است.

جدول (5): نتایج حاصل از آنالیز استاتیکی غیر خطی

Wall	V_y (kN)	V_{\max} (kN)	M_y (kN.m)	M_{\max} (kN.m)	α_2 و α_1	μ_Δ
UOS	966	1.11e+3	2.659e+4	3.015e+4	0.996	3.989
LOS	1024	1.18e+3	2.704e+4	3.196e+4	1.06	3.917
UOB	819	8.84e+2	2.041e+4	2.414e+4	1.75	2.781
LOB	835	8.86e+2	2.069e+4	2.388e+4	1.75	2.772
USS	908	1.12e+3	2.786e+4	3.153e+4	1.35	4.101
LSS	948	1.16e+3	2.889e+4	3.240e+4	1.40	4.059
USS w/o-c	878	1.04e+3	2.248e+4	2.845e+4	1.26	3.455
LSS w/o-c	917	1.07e+3	2.345e+4	2.890e+4	1.29	3.931
USB	681	6.99e+2	1.702e+4	1.906e+4	1.84	3.700
LSB	695	7.08e+2	1.729e+4	1.923e+4	1.86	3.044
USB w/o-c	598	6.02e+2	1.477e+4	1.652e+4	1.58	3.043
LSB w/o-c	617	6.21e+2	1.516e+4	1.706e+4	1.63	3.041

6. نتیجه‌گیری

- در دیوارهای برشی و باربر ویژه محصور شدگی باعث افزایش ظرفیت می‌شود.
- شکل‌پذیری دیوارهای برشی نسبت به دیوارهای باربر بیشتر است.

- در دیوارهای برشی ویژه شکل پذیری و ظرفیت پس از peak به دلیل محصور شدگی المانهای مرزی نسبت به دیوارهای برشی معمولی افزایش می‌یابد، اما در دیوارهای باربر ویژه محصور شدگی تاثیر چندانی در افزایش شکل پذیری و ظرفیت ندارد. این تفاوت به دلیل کاهش ناحیه محصور شده در دیوارهای باربر به دلیل افزایش تعداد دیوارها در پلان سازه می‌باشد.
- تمرکز آرماتور در قسمت‌های انتهایی دیوارهای برشی و باربر موجب افزایش ظرفیت می‌شود.
- شکل پذیری دیوارهای برشی و باربر ویژه و معمولی در حالتی که آرماتورها در انتهاها متمرکز شده است کاهش می‌یابد.
- مقاومت برشی سازه‌هایی که سیستم باربر جانبی آن دیوار برشی است کمتر از سیستم های سازه‌ای دارای دیوار باربر است.

7. مراجع

- [1] PEER, 2010, Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Building, PEER Report 2010/111, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- [2] Opensees Command Language Manual
- [3] ACI 318-05, Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute.
- [4] ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [5] Wallace John W., Moehle Jack P. "Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings." J. Stuct. Eng. **118**(6): 1625-1644.
- [6] FEMA356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2000.
- [7] Tjhin, T. N, et al. (2007). "Yield displacement-based seismic design of RC wall buildings." Engineering Structures **29**(11):294-2959.