



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 نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی شامل آیین نامه ACI و آبا تنها برای طراحی دیوارهای برشی تدوین شده‌اند. این ضوابط در صورت اعمال روی دیوارهای باربر منجر به طراحی بسیار محافظه کارانه‌ای می‌گردد که با توجه به عملکرد مناسب سیستم‌های فوق در زلزله‌های قبلی که فاقد این تمهیدات اجباری آیین نامه بوده‌اند به نظر می‌رسد که نیاز به اصلاح اساسی در این ضوابط و تفکیک ضوابط دیوارهای باربر و برشی از هم می‌باشد. 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.

واژه‌های کلیدی: دیوار برشی، دیوار باربر، رفتار غیرخطی، آنالیز استاتیکی غیر خطی

1. مقدمه

استفاده از دیوار بتنی به عنوان سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی امری متداول است. دیوارهای بتنی باید به گونه‌ای شبیه‌سازی 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 مدل‌های تحلیلی ایجاد شده برای دیوارهای برشی، همواره موجب نگرانی مهندسين سازه بوده است. نرم‌افزارهای کاربردی مختلفی که امروزه برای تحلیل‌های غیرخطی تهیه شده‌اند هر یک محدودیت‌ها و ویژگی‌هایی دارند. برخی از نرم‌افزارها امکان تحلیل‌های غیرخطی دیوار را بصورت مستقیم داشته و برای نرم‌افزارهای فاقد این ویژگی، می‌توان از روش‌های تقریبی مدل‌سازی استفاده کرد.

مدل‌های تحلیلی مختلفی برای نمایش پاسخ غیرخطی دیوارهای برشی ارائه شده است که رفتار خمشی دیوارها را با درجات مختلفی از اطمینان نمایش می‌دهد. 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 مدل سازی 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 سازه ای و غیر سازه ای را در نظر بگیرد.

2. روش مدل سازی مورد مطالعه

در این مطالعه برای مدل سازی 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 لایه های موازی می باشد. بعضی از این لایه ها مصالح بتنی و بعضی دیگر مصالح فولادی را تشکیل می دهند. به کار بردن این مدل برای توزیع مناسب هندسه دیوار، رفتار مواد و مسلح کننده ها و محاسبه پاسخ های مهم، مثل جابجایی محور خنثی در طول مقطع عرضی دیوار در هنگام بارگذاری و باربرداری، اندرکنش با اجزای متصل به قاب ها 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 مدل سازی شامل تعریف خصوصیات مصالح برای میلگردهای طولی، بتن هسته دیوار و پوشش جان بتن است. با استفاده از مدل fiber می توان دقت مدل را بدون استفاده از تحلیل های پیچیده اجزاء محدود افزایش داد [1].

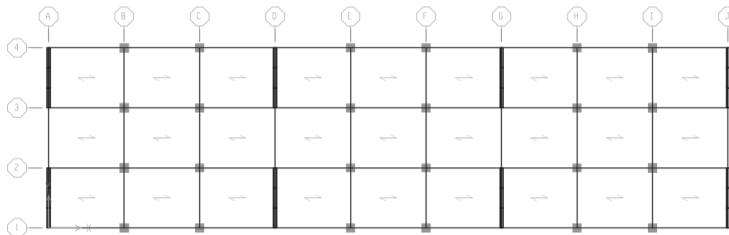
fiber های فولادی در این مطالعه با استفاده از Steel02 که مبتنی بر مدل تنش-کرنش Menegotto، Giuffre, Pinto است، مدل سازی شده است. در این مطالعه برای مدل سازی fiber های بتنی از Concret01 که بر اساس مدل تنش-کرنش اصلاح شده Kent-Park می باشد، استفاده شده است که مقاومت کششی آن صفر است [2].

المان مورد استفاده در مدل سازی دیوارها در نرم افزار Opensees، المان NonlinearBeamColumn می باشد و به دلیل این اینکه این المان قادر به لحاظ نمودن اندرکنش خمش و برش نیست لذا از تغییر شکل های ناشی از برش صرف نظر شده است.

3. طراحی دیوارهای نمونه

ابتدا ساختمان بصورت سه بعدی در نرم افزار ETABS 9.7.1 مدل سازی شده است و سهم بار ثقیلی دیوارهای نمونه از نرم افزار قرائت می شود. مشخصات مصالح در جدول (1) و بارگذاری در جدول (2) آورده شده است. دیوارها بر اساس آیین نامه ACI 318-05 و ASCE/SEI 7-05 طراحی شده اند [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 دهانه ها در جهت x، 5 متر و در جهت y، 4 متر می باشد. شکل (1) پلانی از سازه مورد نظر را نشان می دهد. 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 شکل پذیری 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 می باشد. ارتفاع دیوارها 35 متر و طول آنها 4 متر می باشد. با توجه به اینکه نسبت ارتفاع دیوارها به طول آنها بزرگتر از 2 و برابر 8/75 می باشد، 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) می باشد. 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 لرزه ای

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 غیر خطی (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.

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

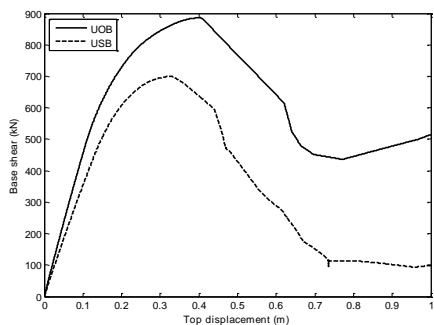
که در آن Δ_{y} جابجایی در تراز بام در نقطه تسلیم و Δ_{u} حداکثر جابجایی در تراز بام می باشد که نحوه محاسبه آنها در مراجع [6] و [7] بیان شده است.

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.

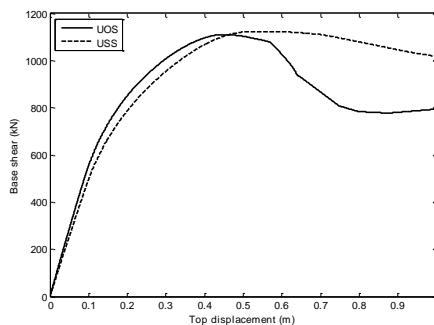
شکل های (4-الف) و (4-ب) تاثیر تمرکز آرماتور در دو انتهای دیوار را در دیوارهای برشی معمولی و ویژه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تمرکز آرماتور در انتهاها باعث افزایش ظرفیت برشی و به مقدار جزئی باعث کاهش شکل پذیری در دیوارهای برشی ویژه و معمولی خواهد شد.

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.

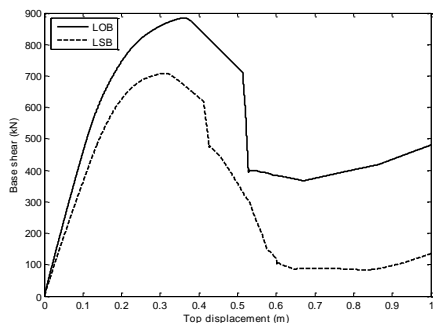


ب) UOB و USB

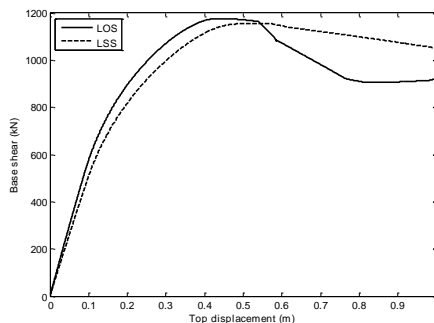


الف) UOS و USS

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

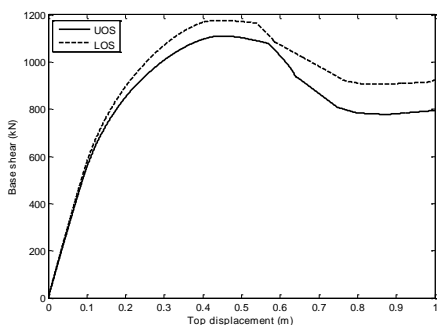


ب) LOB و LSB

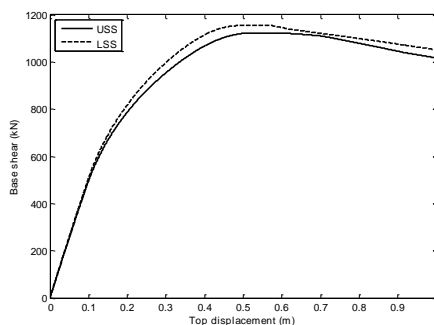


الف) LOS و LSS

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

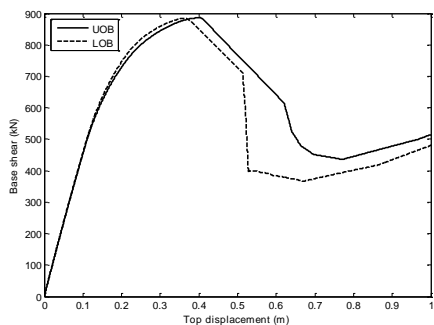


ب) UOS و LOS

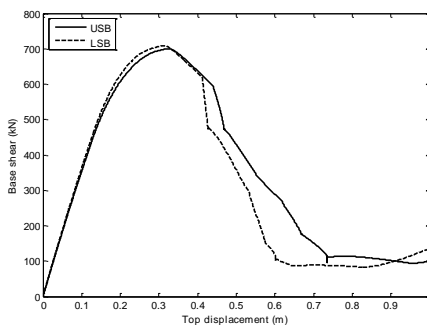


الف) USS و LSS

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

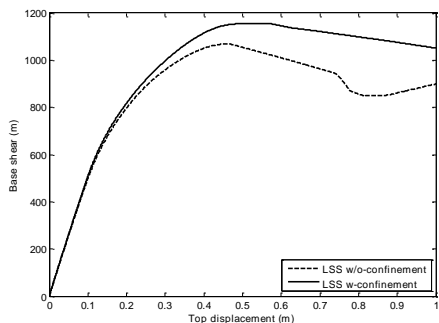


ب) UOB و LOB

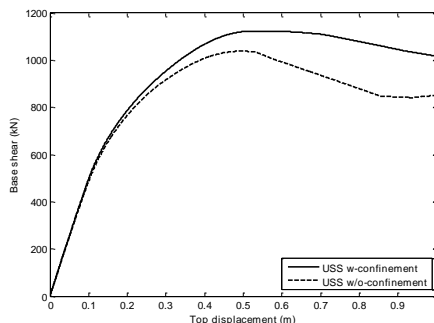


الف) USB و LSB

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

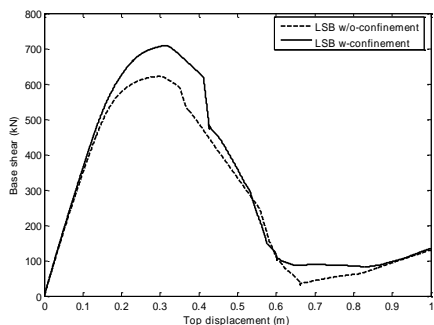


ب) LSS w/o-cofinement و LSS w-cofinement

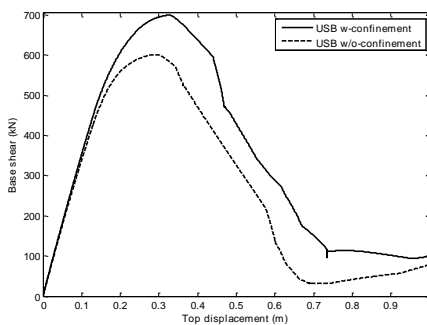


الف) USS w/o-cofinement و USS w-cofinement

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.