

بهینه‌یابی موقعیت دیوارهای برشی در سازه‌های بلند

مهدی احمدی روحانی
کارشناس ارشد سازه

حسن حاجی کاظمی
دانشیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

سازه ساختمان بلند باید قادر به تحمل انواع مختلف نیروهای جانبی نظیر نیروهای ناشی از زلزله و باد باشد. از این رو، نوع و محل سخت‌کننده در جهت طولی و عرضی ساختمان باید طوری طراحی گردد که نیروهای جانبی اعمالی در تراز کف طبقات را تحمل نموده و در نهایت به پی انتقال دهد. یکی از متداول‌ترین نوع سخت‌کننده جانبی در سازه‌های متوسط و بلند، دیوارهای برشی هستند. در این مقاله، بهترین موقعیت قرارگیری دیوار برشی در پلان برای سازه‌های ۸ تا ۴۰ طبقه (حد مناسب تعداد طبقه برای سازه‌های قباب - دیوار) متناسب در ارتفاع و در حالت پلان متقارن و نامتقارن، تحت اثر بار جانبی یکنواخت برای حالت استاتیکی بررسی گردیده است و با استناد به نمودارهای حاصل از تغییر مکان‌ها و در صد جذب نیروهای برشی توسط دیوارهای برشی، موقعیت دیوارها انتخاب شده است.

Optimization of Shear Wall Location in Tall Buildings

H. Haji - Kazemi
Associate Professor

M. Ahmadi Rohani
Structural Engineer

Civil Engineering Department, School of
Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Tall buildings should be designed to carry lateral loads due to wind and earthquake. Therefore, it normally needs stiffeners which in most cases are in shear-wall form. In this paper, the best location of shear walls in tall buildings with symmetric and unsymmetric plan and uniform in height are investigated. Story drift and shear absorption are referenced for comparison.

Key Words

Tall building, Shear wall, Stiffener, Drift, Optimization.

سازه‌های بلندی که با قاب‌های صلب و یا مهاربندی شده ساخته می‌شوند، معمولاً از نظر کارایی و حجم مصالح به کار رفته چندان مطلوب نیستند. سختی جانبی یک قاب صلب به سختی خمشی ستون‌ها، شاه تیرها و اتصالات در صفحه خمشی بستگی دارد. امتیاز اصلی قاب صلب در ترکیب باز آن از نظر فضا سازی و آزادی عمل در طراحی است. اگر از قاب صلب به عنوان تنها عامل مقاوم در برابر نیروهای جانبی استفاده شود، این نوع ساختار سازه‌ای فقط برای ساختمان‌های تا ۲۵ طبقه اقتصادی خواهد بود [۱] در ساختمان‌های بیش از ۲۵ طبقه، برای کنترل جابجایی، به اعضا و مقاطع بزرگ غیر اقتصادی نیاز خواهد بود. برای جبران این نقص از دیوارهای برشی استفاده می‌شود. هنگامی که دیوارهای برشی با قاب‌ها ترکیب شوند، در اثر بار جانبی، دیوارها در زمان تغییر شکل خمشی و قاب‌ها در زمان تغییر شکل برشی تغییر شکل یکسانی خواهند داشت. سازه ترکیبی قاب - دیوار برای ساختمان‌های ۴۰ تا ۶۰ طبقه نیز مناسب است [۱، ۲].

نحوه مشارکت دیوار در تحمل بارها و اندرکنش آن با قاب از نظر تئوری به روش‌های گوناگونی مدل سازی شده است [۲-۷]. معمولاً دیوارهای برشی در اطراف پله‌ها، آسانسورها یا گذرگاه تأسیسات به صورت هسته و یا برای دسترسی به فضاهای باز و آزاد در محیط ساختمان جایگزین می‌شوند. در ساخت و سازهای کنونی جایابی دیوارها در پلان سازه از نظر بازدهی مقاومتی چندان مورد توجه قرار نگرفته و معمولاً براساس نیازهای معماری، گاهی نیز با آزمون و خطا انجام می‌شود. در این مقاله سعی شده است تا بهترین موقعیت قرارگیری دیوارهای برشی در پلان، با در نظر گرفتن عامل کمینه جابجایی جانبی کل سازه و بیشینه درصد جذب نیروی برشی طبقه توسط دیوار مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی تحلیلی و فرضیات

در این پژوهش برای آنالیز سازه‌های نمونه به منظور انجام مراحل مقایسه‌ای از نرم افزار ETABS استفاده شده است. در این نرم افزار، سازه‌های نمونه به صورت مجموعه‌ای از قاب‌ها و دیوارهای برشی قائم که توسط دیافراگم‌های افقی، کف طبقات را به هم ارتباط می‌دهند مدل سازی شده است. فرمول سازی این برنامه با

استفاده از اجزای محدود ایزوپارامتریک غشایی و با سختی‌های دورانی در صفحه انجام پذیرفته است. بنابراین ستون‌ها با تیرهای موجود در یک قاب که در داخل المان پائل قرار می‌گیرند، در صفحه دیوار پیوستگی کامل خود را حفظ می‌کنند [۸]. فرضیات مورد استفاده در مدل سازی عبارتند از:

۱ - از تنش‌ها و کرنش‌های عرضی دیوارها صرف نظر می‌شود، یعنی در تمام ترازهای ارتفاعی دیوار، $\sigma_x = \epsilon_x = 0$ فرض شده است.

۲ - تاوه‌های کف کاملاً صلب در نظر گرفته می‌شوند و از تغییر شکل در صفحه آنها صرف نظر می‌گردد.

۳ - تغییر شکل مقطع دیوارها ناچیز فرض می‌شود.

گرچه توابع شکل انتخابی در مدل سازی مزبور مانند بسیاری دیگر از نرم افزارهای مورد استفاده در صنعت قابلیت منظور نمودن عوامل مهمی نظیر برش اضافی (Parasitic shear) و سازگاری چرخشی اجزای خمشی و برشی را ندارد، ولی برای پژوهش مورد نظر و تعیین موقعیت بهینه دیوارها در پلان به روش مقایسه‌ای، کاملاً مناسب است.

برای دستیابی به بهترین موقعیت دیوارها در پلان سازه، ابتدا سازه‌هایی انتخاب و تحت اثر بار جانبی باد قرار گرفته‌اند. فشار مبنای باد طبق آیین نامه ۵۱۹ ایران [۹] در نظر گرفته شده است. از آنجا که هدف در این تحقیق، اعمال ضوابط آیین نامه نیست و فقط بررسی رفتاری سازه مدنظر است، فشار مبنا برای کل ارتفاع سازه به طور یکنواخت و برابر ۱۳۵ کیلوگرم بر مترمربع فرض شده است. در نتیجه بار جانبی اعمالی بر سازه برابر است با:

$$P = q \cdot l \cdot c = 0.135 \times 45 \times 1.25 = 7.6 \text{ t/m}$$

موقعیت دیوار در سازه‌های با پلان متقارن

جهت بررسی، سازه‌هایی با پلان مشابه و ابعاد ۲۵ × ۴۵ متر به صورت متقارن انتخاب شده‌اند (شکل ۲). پلان انتخابی دارای دهانه‌های پنج متری بوده و ابعاد آن با مقادیر متداول مورد استفاده در صنعت ساخت و ساز تطابق نسبی دارد.

ته سری سازه با تعداد طبقات ۸، ۱۲، ۱۶، ... و ۴۰ برای تحلیل انتخاب گردیدند که در اینجا برای اختصار، فقط نتایج تحلیل سازه‌های ۱۶ و ۴۰ طبقه ارائه می‌شوند.

توزیع جرم در کلیه طبقات یکسان بوده و بار مرده طراحی ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده طراحی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مربع فرض شده است.

نحوه قرارگیری دیوارها در پلان و شماره‌گذاری آنها در شکل (۳) آمده است. در حالت‌های W1 تا W5 دیوارها با ضخامت و طول یکسان در موقعیت‌های مختلف پلان قرار گرفته‌اند. در حالت W6 دیوار به صورت هسته مرکزی است و در حالت‌های W7 و W8، دیوارها در مجموع سطح مقطعی معادل حالت W4 دارند، یعنی ضخامت دیوار نصف و طول آن دو برابر گردیده است.

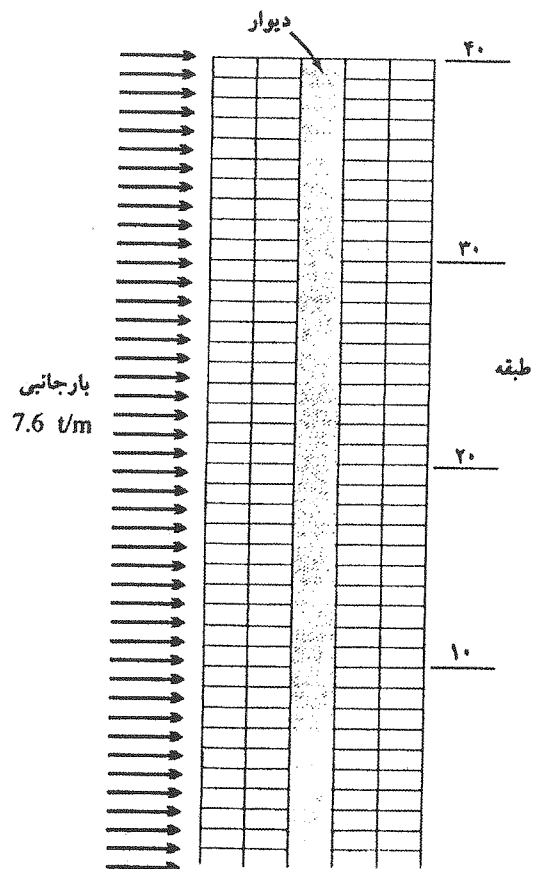
نتایج تحلیل در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) و در نمودارهای شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) ارائه گردیده است.

موقعیت دیوار در سازه‌های با پلان نامتقارن

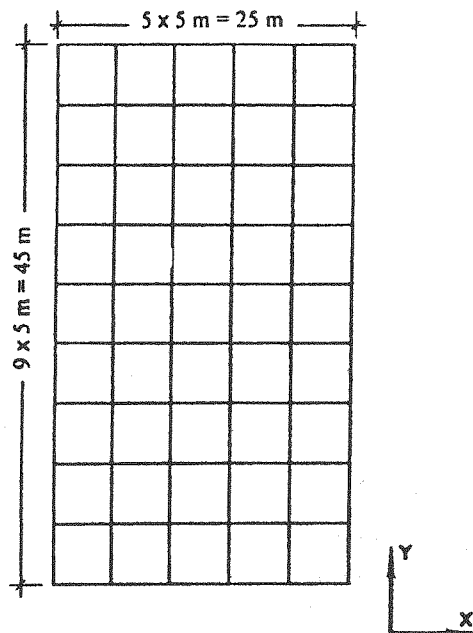
استفاده از تقارن در ساختمان عملکرد مناسب اجزای سازه‌ای را به دنبال خواهد داشت، ولی استفاده از این ویژگی همیشه امکان‌پذیر نیست. به همین منظور در ادامه بررسی، سازه‌های با پلان نامتقارن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

سازه‌های نامتقارن مورد بررسی، همگی دارای پلان مشابه به ابعاد 45×25 متر مطابق شکل (۷) می‌باشند. برای تحلیل، دو سری سازه ۱۶ و ۲۴ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. سایر مشخصات مطابق حالت پلان متقارن می‌باشد.

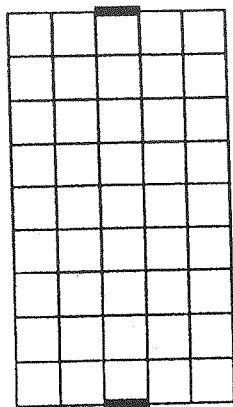
در این بخش، از نتایج حاصل از قسمت قبل استفاده شده و فقط شش حالت برای این نحوه قرارگیری دیوارها در پلان در نظر گرفته شده است (شکل ۸). در حالت‌های N1، N2 و N3 یک دیوار به صورت ثابت و دیوار دیگر در موقعیت‌های مختلف قرار داده شده است. در حالت‌های N4، N5 و N6 با جابجا کردن دیوار اول، همین عمل برای دیوار دوم تکرار گردیده است. نتایج تحلیل در جدول‌های (۴) و (۵) و شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است.



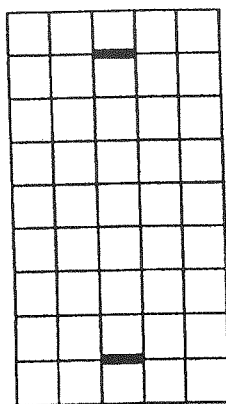
شکل (۱) سازه ۴۰ طبقه مورد بررسی.



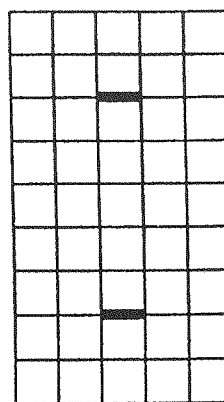
شکل (۲) پلان سازه‌های متقارن مورد بررسی.



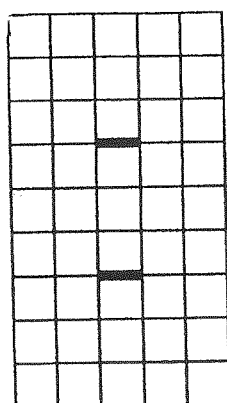
(W1)



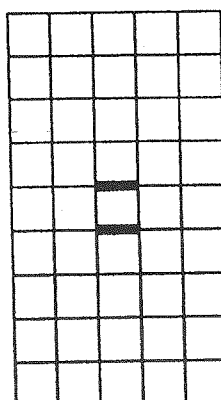
(W2)



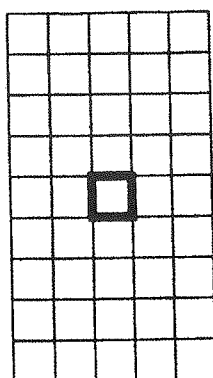
(W3)



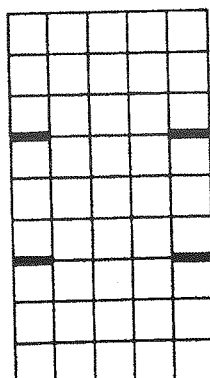
(W4)



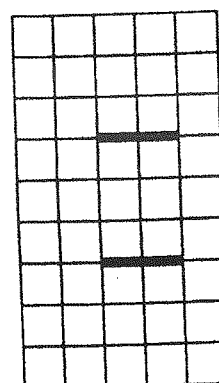
(W5)



(W6)



(W7)



(W8)

شکل (۳) موقعیت قرارگیری دیوارهای برشی در پلان متقارن.

مقایسه نتایج تحلیلی

نتایج حاصل از بررسی موقعیت دیوار سازه‌های با پلان متقارن بیانگر آن است که:

۱ - با بررسی جابجایی‌ها در حالت‌های W4, W3, W2, W1 و W5 مشاهده می‌گردد که اگر دیوار برشی در موقعیت‌های W3 و W4 قرار گیرد، کمترین تغییر مکان در سازه ایجاد می‌شود. تأثیر این موقعیت در کم کردن تغییر مکان بین ۱/۹ تا ۲/۲۴ درصد برای سازه‌های با تعداد طبقات مختلف می‌باشد. این اعداد از مقایسه دو حالت W4 (بهترین حالت) و W1 (نامناسب‌ترین حالت) به دست آمده‌اند.

نمودارهای درصد جذب نیروی برشی، مؤید مطلب فوق می‌باشد. به عنوان مثال درصد جذب نیروی برشی در سازه ۳۶ طبقه، در حالت W4 حدود چهار درصد بیشتر از حالت W1 می‌باشد.

۲ - وقتی از هسته بتنی بسته به عنوان دیوار برشی استفاده می‌شود، تغییر مکان ناشی از نیروهای جانبی به مراتب کمتر از حالت بهینه مرحله اول تحقیقات یعنی W4 است. دلیل این موضوع، آن است که هسته‌ها به صوت جدار بسته عمل کرده و رفتار بهتری نسبت به دیوارهای برشی مسطح دارند.

۳ - اختلاف تأثیر هسته با دیوار برشی مسطح، با زیاد شدن تعداد طبقات به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش به صورت درصد اختلاف تغییر مکان با حالت W5 (نامناسب‌ترین حالت قرارگیری دیوار برشی در پلان متقارن)، برای سازه‌های ۸ الی ۴۰ طبقه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان بلندی سازه‌هایی که هسته در آنها نقش مؤثری دارد را نیز تعیین نمود. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که حداکثر تعداد طبقه‌ای که هسته می‌تواند بر آن تأثیر بگذارد حدود ۳۲ است، زیرا از این تعداد طبقه به بعد، درصد اختلاف به زیر ده درصد می‌رسد.

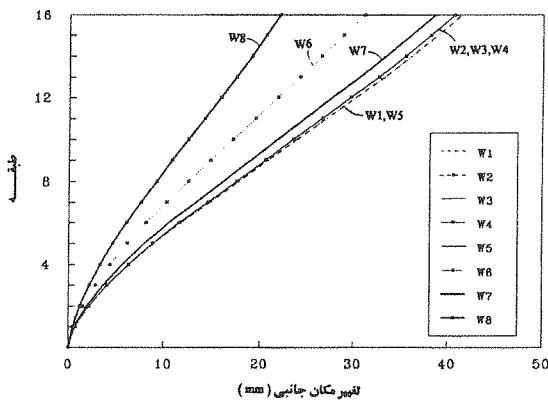
دلیل کاهش اثر هسته را می‌توان، ازدیاد لاغری در اثر افزایش ارتفاع دانست، تا جایی که در سازه ۴۰ طبقه، هسته در حد یک دیوار برشی مسطح عمل می‌نماید.

۴ - دیوارهای برشی اگر به صورت ممتد (پیوسته) در پلان قرار گیرند، عملکرد مناسب‌تری نسبت به حالت غیر ممتد خواهند داشت. یعنی دیوارهای حالت W8 بسیار بهتر از دیوارهای حالت W7 عمل می‌نمایند.

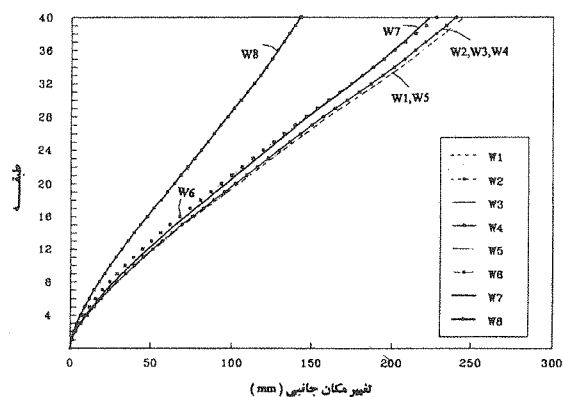
نتایج حاصل از این عملکرد در نمودار شکل (۱۲) به صورت درصد اختلاف تغییر مکان بین حالت W7 با W4 و W8 با W4 نشان داده شده است.

بهترین موقعیت قرارگیری دیوار در سازه با پلان نامتقارن آن است که، یکی از دیوارها در مرز نامنظمی پلان و دیوار دیگر در محلی که مرکز سختی کل سازه تا حد امکان به مرکز جرم آن نزدیک تر است، واقع گردد. شرط لازم آن است که حداکثر یک سوم بعد ساختمان دارای شکستگی در پلان باشد.

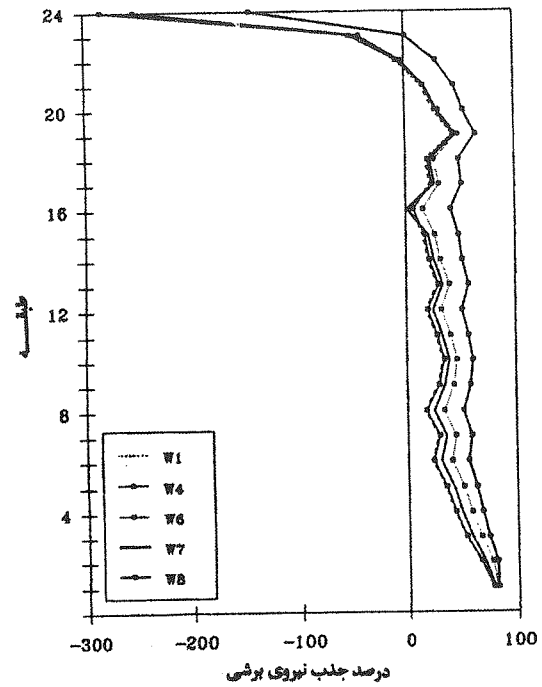
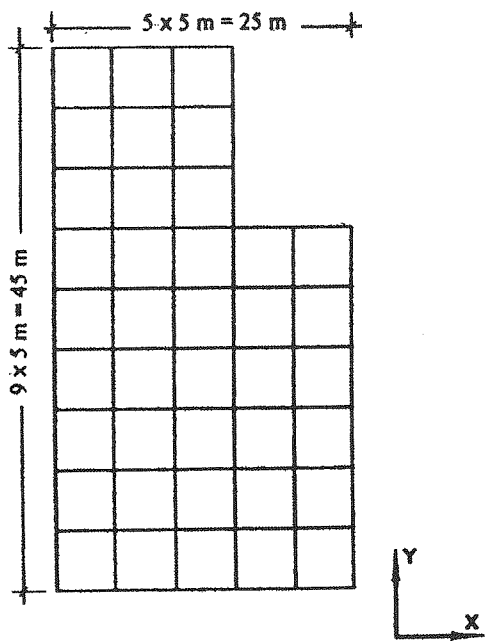
در نتیجه، می‌توان گفت که استفاده از توزیع دیوارها و قرار دادن آنها به صورت ممتد، به همراه رعایت بند یک همین بخش، بهترین موقعیت قرارگیری دیوارهای برشی را در پلان نامتقارن مشخص می‌نماید.



شکل (۴) نمودار جابجایی طبقه‌ای سازه ۱۶ طبقه.

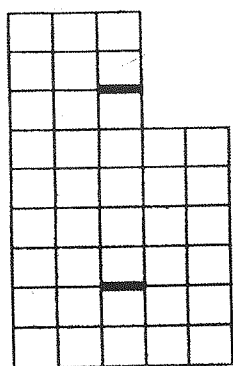


شکل (۵) نمودار جابجایی طبقه‌ای سازه ۴۰ طبقه.

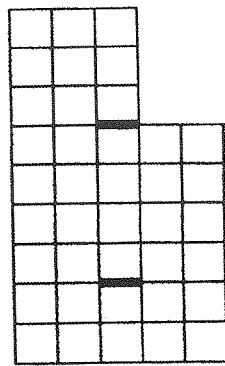


شکل (۷) پلان سازه‌های نامتقارن مورد بررسی.

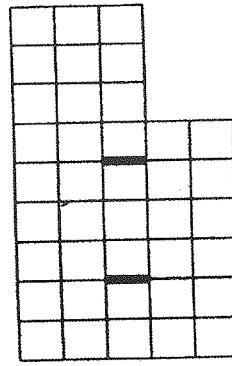
شکل (۶) نمودار درصد جذب نیروی برشی توسط دیوارها در سازه ۲۲ طبقه.



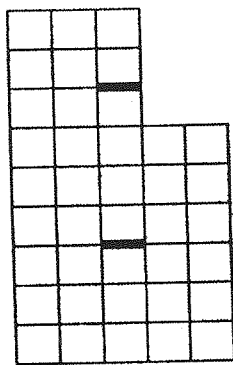
(N1)



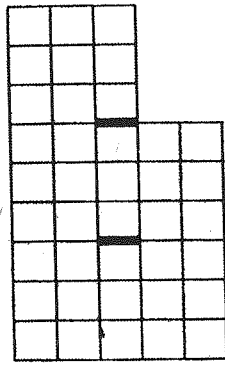
(N2)



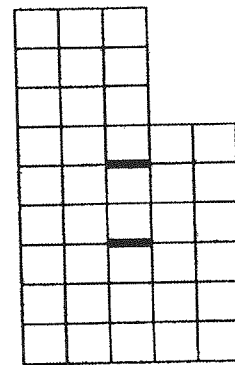
(N3)



(N4)

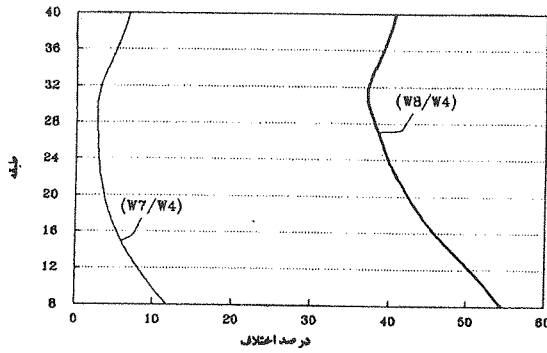


(N5)



(N6)

شکل (۸) موقعیت دیوارهای برشی در پلان نامتقارن.



شکل (۱۲) نمودار درصد اختلاف تأثیر توزیع دیوارها در پلان نسبت به حالت توزیع نشده.

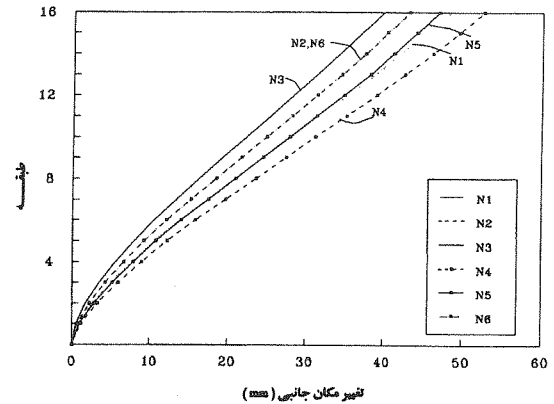
نتیجه گیری

باتوجه به نمودارهای درصد جذب نیروی برشی، تأثیر منفی دیوار بر قاب در طبقات فوقانی قابل مشاهده است. یعنی در طبقات فوقانی، قاب خمشی در مقابل تغییر شکل دیوار برشی محدودیت ایجاد کرده و نیروهایی در خلاف جهت به دیوار برشی وارد می کند. ولی در طبقات پایینی، عکس این حالت اتفاق می افتد. عامل این پدیده، نیروهای اندرکنش قاب - دیوار می باشند. لذا حالت بهینه در شرایطی بوجود می آید که قاب های بیشتری بتوانند با دیوار برشی عملکرد متقابل داشته باشند. به عنوان مثال در نامناسب ترین حالت ها که حالت های W1 و W5 هستند، فقط یک قاب کناری و یا یک قاب میانی می تواند بر دیوار تأثیر مستقیم داشته باشد. ولی در حالت های W3 و W4 که بهترین حالت برای دیوار تشخیص داده شده، تعداد قاب های اطراف دیوار بیشتر می باشند، و عملکرد متقابل بهتری را با دیوار خواهند داشت. این تأثیر می تواند باعث شود که تیرهای رابط و یا تاوره های کف، نیروهای کمتری را جهت انتقال نیروها از کف ها به دیوار متحمل شوند.

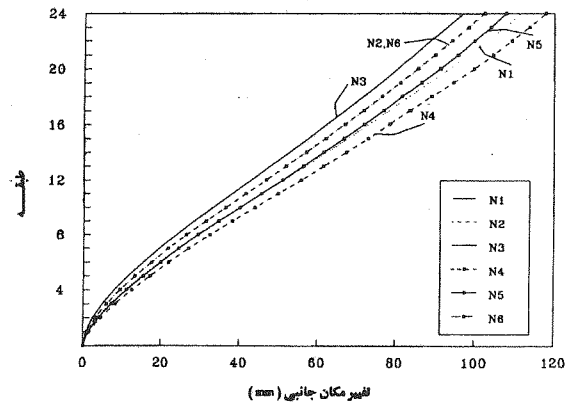
هرچه دیوارهای برشی در پلان بیشتر توزیع شوند (با همان سطح مقطع ثابت نسبت به حالت توزیع نشده) عملکرد بهتری نسبت به حالت توزیع نشده خواهند داشت. یعنی تغییر مکان سازه در حالت های W7 و W8 بسیار کمتر از حالت W4 می باشد.

توزیع دیوارها در پلان های نامتقارن باید با در نظر گرفتن شرایط فوق و محدودیت های نامنظمی و موقعیت مرکز جرم صورت پذیرد.

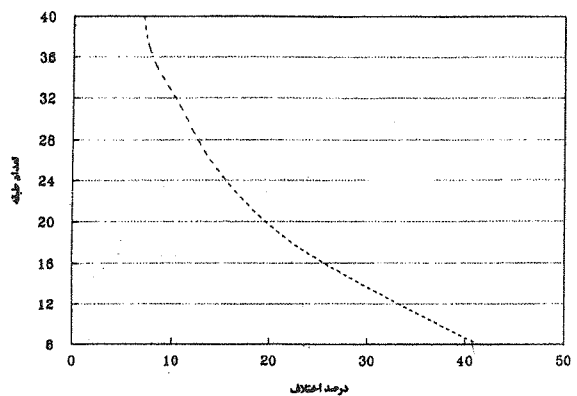
در ادامه پژوهش، لازم است سازه های با پلان متقارن که در ارتفاع دارای شکستگی هستند نیز مورد بررسی قرار گیرند، تا تأثیر شکستگی در ارتفاع بر عملکرد دیوار و قاب و همچنین اثرات عدم تناسب دیوارها در ارتفاع مشخص گردد.



شکل (۹) نمودار جابجایی طبقه ای سازه نامتقارن ۱۶ طبقه.



شکل (۱۰) نمودار جابجایی طبقه ای سازه نامتقارن ۲۲ طبقه.



شکل (۱۱) نمودار درصد اختلاف تأثیر هسته و دیوار برشی مستطی بر تغییر مکان جانبی سازه های ۸ الی ۲۰ طبقه.

جدول (۱) جابجایی طبقه ای سازه ۱۶ طبقه.

تغییر مکان جانبی (mm)								
طبقه	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
16	41.48	40.69	40.69	40.69	41.48	31.12	38.58	22.16
15	38.83	38.11	38.10	38.10	38.82	28.88	36.00	20.64
14	36.08	35.43	35.42	35.42	36.08	26.60	33.35	19.08
13	33.21	32.63	32.62	32.62	33.21	24.27	30.60	17.48
12	30.23	29.71	29.71	29.70	30.23	21.91	27.76	15.84
11	27.15	26.68	26.68	26.69	27.15	19.52	24.85	14.18
10	24.01	23.62	23.62	23.62	24.01	17.14	21.90	12.51
9	20.95	20.61	20.61	20.61	20.95	14.82	19.04	10.87
8	17.58	17.58	17.58	17.58	17.58	12.53	16.16	9.25
7	14.79	14.57	14.52	14.57	14.79	10.31	13.33	7.65
6	11.80	11.63	11.63	11.63	11.80	8.16	10.59	6.11
5	8.96	8.84	8.84	8.84	8.96	6.16	8.02	4.66
4	6.41	6.32	6.32	6.32	6.40	4.36	5.71	3.36
3	4.10	4.05	4.05	4.05	4.09	2.80	6.64	2.19
2	2.15	2.13	2.12	2.12	2.15	1.49	1.91	1.21
1	0.71	0.70	0.70	0.70	0.71	0.53	0.64	0.45

جدول (۲) جابجایی طبقه ای سازه نامتقارن ۱۶ طبقه.

تغییر مکان جانبی (mm)						
طبقه	N1	N2	N3	N4	N5	N6
16	48.45	43.32	39.94	52.59	47.00	43.28
15	45.37	40.52	37.13	49.50	44.22	40.47
14	42.17	37.61	34.28	46.22	41.28	37.58
13	38.82	34.59	31.38	42.74	38.17	34.57
12	35.33	31.46	28.41	39.04	34.86	31.44
11	31.73	28.23	25.41	35.17	31.40	28.22
10	28.07	24.96	22.37	31.21	27.86	24.95
9	24.52	21.76	19.35	27.43	24.46	21.74
8	20.94	18.53	16.35	23.58	20.99	18.51
7	17.38	15.34	13.42	19.71	17.52	15.31
6	13.89	12.22	10.59	15.87	17.08	12.20
5	10.59	9.28	7.94	12.21	10.8	9.25
4	7.61	6.61	5.53	8.92	7.86	6.58
3	4.90	4.22	3.42	5.87	5.14	4.19
2	2.60	2.20	1.70	3.20	2.78	2.18
1	0.87	0.72	0.52	1.11	0.96	0.71

جدول (۳) اختلاف فاصله مرکز جرم با مرکز سختی در شرایط مختلف دیوار گذاری.

حالت قرار گیری دیوار در پلان	مشخصات Y مرکز سختی (m)	فاصله مرکز جرم با مرکز سختی (mm)
N1	21.2136	102.13
N2	20.1266	6.57
N3	19.0396	115.27
N4	22.3006	210.83
N5	21.2136	102.13
N6	20.1236	6.57

مراجع

- trear, (1988).
- [6] Rosenblueth, E. and I. Holtz, "Elastic Analysis of Shear Walls in Tall Buildings", ACI Jr. 56 (12), (1960).
- [7] Smolira, M., "Analysis of Tall Buildings by the Force-Displacement Method", McGraw-Hill, (1975).
- [8] مختارزاده عباس - «برنامه ویژه تحلیل سه بعدی پیشرفته از دستگاه های ساختمانی ETABS»، مرکز خدمات فرهنگی سالکان (۱۳۷۵).
- [9] «حداقل بار وارده بر ساختمان ها و ابنیه فنی»، شماره استاندارد ۵۱۹ ایران، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- [۱۰] حاجی غفاری، حسین - «اندرکنش قاب بتنی و دیوار برشی در سازه های در حد نامنظمی در پلان»، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، جلد اول اردیبهشت (۱۳۷۶).
- [۱] حاجی کاظمی، حسن - «آنالیز و طراحی سازه های بلند»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۷۵).
- [2] Taranath, B. S., "Structural Analysis & Design of Tall Buildings", McGraw-Hill, NewYork, (1988).
- [3] Heidebrecht, A. C, and B. Stafford Smith, "Approximate Analysis of Tall Wall-Frame Structures", Jr, Struct. Div., Proc. ASCE 99, ST2, (1973).
- [4] Khan, F. R., and J. A. Sbarounis, "Interaction of Shear Walls and Frames", Jr. Struct. Div., Proc. ASCE 90, ST3, (1964).
- [5] Nollet, M. J. and B. Stafford Smith, "An Empirical Approach to the Evaluation of the Shear Rigidity of a Wall-Frame with Rigidly Jointed Link Beams", Structural Engineering Series Report, No. 88-5, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Mon-