

مطالعه موردی بهسازی لرزه ای ساختمان بتنی با قاب خمشی، با اضافه نمودن دیوارهای برشی شکل پذیر شده با کامپوزیت پلیمری الیاف GFRP در مقایسه با افزودن دیوارهای برشی معمولی

عبداله حسینی* ; علی کشاورز محمدیان**

چکیده

در این مقاله بهسازی لرزه ای یک ساختمان بتنی با سیستم «قاب خمشی» در تهران با هدف بهسازی ویژه مطالعه شد. در مرحله ارزیابی آسیب پذیری ساختمان بتنی با دو روش، یکی براساس «استاندارد ۲۸۰۰» با ضریب اهمیت $I=1/2$ و دیگری بر اساس «دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود» انجام گرفت. براساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که در زلزله های سطح خطر ۱ و ۲ سطح عملکرد «قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی» به ترتیب برآورده نمی گردد و لذا ضرورت انجام بهسازی لرزه ای مشخص گردید.

عمده ترین ضعف ساختمان تغییر مکان جانبی نسبی زیاد طبقات، کمبود مقاومت خمشی عمده ستونها، سختی جانبی بسیار کم و تشکیل مکانیزم طبقه در زیرزمین بود. روشهای مختلف مقاوم سازی مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به ضعف های اصلی ساختمان دوراھکار برای مقاوم سازی مورد توجه قرار گرفت. روش اول اضافه نمودن «دیوارهای برشی معمولی» به ساختمان و روش دوم اضافه نمودن «دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با استفاده از الیاف کامپوزیتی GFRP» بود.

به منظور محاسبه مشخصه های مفاصل غیر خطی دیوارهای برشی معمولی و دیوارهای برشی تقویت شده بالیاف، نرم افزاری تهیه شد و منحنی های «لنگر - انحناء» برای هر دو نوع دیوارهای برشی بدست آمد. در این مورد با مقایسه مدل عددی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین مشخص شد که مطابقت خوبی وجود دارد. تحلیل سازه تقویت شده با دیوارهای برشی معمولی و دیوارهای با شکل پذیری افزوده نشان داد که در مدل اول با وجود بهبود نسبی وضعیت ساختمان، دیوارهای برشی زیرزمین به جهت شکل پذیری کم دچار شکست می شوند و نمی توانند معیارهای پذیرش را تأمین نمایند. در صورتی که در مدل دوم با استفاده از روش جدید محصور کردن اجزای لبه ای دیوارهای برشی با الیاف GFRP، شکل پذیری خمشی دیوارها مقدار قابل توجهی افزایش می یابد. و سطح عملکرد مفاصل غیر خطی دیوارهای برشی به سطح عملکرد هدف می رسد.

واژه های کلیدی: بهسازی لرزه ای - طراحی لرزه ای - بتن مسلح - دیوار برشی شکل پذیر - الیاف مسلح پلیمری (FRP)

۱- مقدمه

به منظور بررسی رفتار لرزه ای و مزیت های نسبی دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با الیاف کامپوزیتی در مقایسه با دیوارهای برشی معمولی و کاربرد این دیوارها در بهسازی لرزه ای به صورت موردی یک ساختمان ۵ طبقه بتنی با هدف دستیابی به هدف بهسازی ویژه مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارزیابی آسیب پذیری ساختمان مشخص شد که ساختمان موجود حتی پاسخگوی اهداف بهسازی مینا نیز نمی باشد. پس از مشخص شدن نقاط ضعف سازه، هدف بهسازی ویژه با عملکرد « قابلیت استفاده بی وقفه » در سطح خطر ۱ و عملکرد « ایمنی جانی » در سطح خطر ۲ مد نظر قرار گرفت [۱].

با توجه به نتایج ارزیابی ساختمان موجود دو ضعف اصلی آن مشخص گردید. اولی عدم وجود سختی جانبی کافی و در نتیجه تغییر مکان های جانبی نسبی زیاد طبقات و دومی کمبود مقاومت خمشی ستون ها و در نتیجه نرسیدن منحنی ظرفیت ساختمان به نقطه عملکرد (*Performance*) می باشد.

گزینه های مختلف بهسازی جهت برطرف نمودن این دو ضعف اصلی ساختمان مطالعه شد؛ نهایتاً دو راهکار استفاده از دیوارهای برشی معمولی و یا استفاده از دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با الیاف کامپوزیتی انتخاب گردید. در این مقاله دو راهکار فوق مقایسه شده و رفتار لرزه ای و مزیت های نسبی دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با الیاف کامپوزیتی و تأثیر این روش در بهبود سطح عملکرد سازه نشان داده شده است.

پس از بررسی های صورت گرفته راهکار بهسازی با اضافه نمودن دیوارهای برشی تقویت شده با الیاف *FRP* به ساختمان انتخاب گردید.

۲- بهسازی ساختمان با استفاده از دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با الیاف کامپوزیتی شیشه (*G.F.R.P*) (*Glass Fiber Reinforced Polymers*)

در بهسازی لرزه ای ساختمانهای بتنی شکل پذیری اجزاء اهمیت قابل توجهی داشته بطوریکه افزایش کرنش پذیری فشاری بتن غیرمحصور از ۳ تا ۴ هزار میکروکرنش به مقدار ۸ تا ۱۲ هزار میکروکرنش با محصور نمودن مقطع اجزای لبه ای دیوار برشی با استفاده از الیاف کامپوزیتی (*FRP*) موجب افزایش شکل پذیری خمشی مقطع و زیاد شدن دامنه زاویه دوران خمیری مفاصل غیرخطی و محدوده های پذیرش می شود [۴]. علاوه بر آن الیاف کامپوزیتی بصورت محبوس کننده موجب افزایش مقاومت برشی و کاهش طول وصله لازم آرماتور طولی ستون ها می گردد [۵].

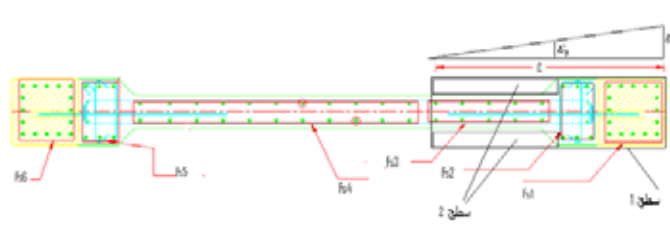
در مرجع [۲] اثرات افزایش شکل پذیری، مقاومت و جذب انرژی دیوارهای برشی محصور شده با الیاف *FRP* را با انجام آزمایش و ارائه مدل عددی مطالعه گردیده است.

۳- ارائه مدل عددی

به منظور بدست آوردن منحنی های « لنگر - انحناء » و محاسبه مشخصات مفاصل غیر خطی دیوارهای برشی نرم افزار خاصی تهیه شد که با آن منحنی های لنگر- انحناء با کنترل مقاومت برشی دیوار برای کلیه دیوارهای برشی بدست آمد.

۳-۱- دیوارهای برشی معمولی

دیوارهای برشی در داخل قابهای بتنی ساختمان قرار می گیرند از طرفین به ستونها و از بالا به تیرها متصل می گردند. با توجه به اینکه المانهای مرزی دو طرف دیوار (ستونها) در واقع به عنوان بالهای دیوار برشی عمل می کنند لذا به جهت بهبود رفتار خمشی دیوارهای برشی در کنار ستونها بخش دیگری هم بصورت اجزای مرزی (*Boundary element*) اضافه گردید. لذا مجموعه دیوار برشی شامل سه بخش دیوار برشی، ستونهای طرفین و اعضاء لبه ای اضافه شده می شود که در شکل (۱) نشان داده شده است.



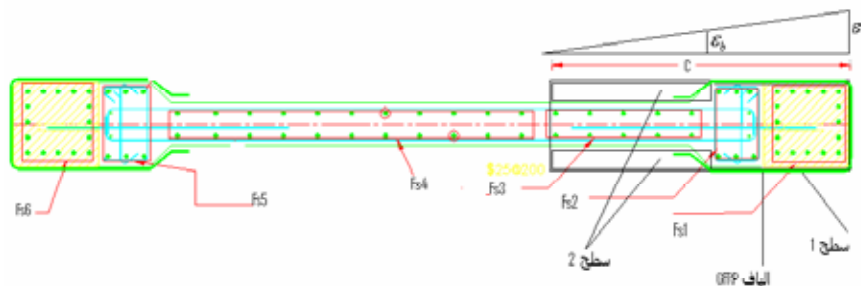
شکل (1): مجموعه دیوار برشی معمولی

به منظور عملکرد یکپارچه ستون های موجود با دیوارهای برشی اضافه شده از کاشت میلگرد های $\phi 25$ در فواصل ۲۵ سانتیمتری جهت انتقال نیروی برشی عمودی از طریق برش اصطکاکی بین ستونهای موجود و دیوار برشی استفاده گردید [۹].

برای محاسبه مشخصات مفاصل غیرخطی دیوارهای برشی معمولی از معادله تنش-کرنش بتن محصور نشده استفاده شد. منحنی های « $P-M$ » (محوری- خمشی) و منحنی های « $M-\phi$ » (لنگر - انحناء) در حد جاری شدن و حد نهایی بتن برای کلیه دیوارهای برشی با مقاطع و آرماتورگذاری های مختلف با استفاده از نرم افزار تهیه شده بدست آمد. با بدست آوردن نیروهای محوری بحرانی دیوارهای برشی در نقاط عملکرد، مشخصات مفاصل غیر خطی از روی منحنی های مذکور بدست آمد.

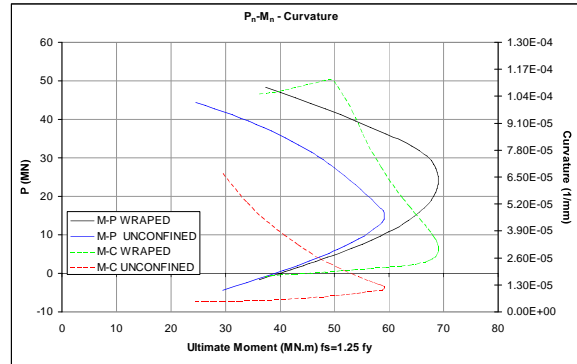
۳-۲- دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده با استفاده از الیاف GFRP

محاسبه مشخصات مفاصل غیرخطی خمشی دیوارهای برشی تقویت شده با الیاف مشابه روش محاسبات دیوارهای برشی معمولی می باشد با این تفاوت که در محاسبه منحنی های $P-M$ و $M-\phi$ در قسمت فشاری بتن از منحنی تنش - کرنش مدل $Lam-Teng (2001)$ [۸] استفاده شده است. در شکل (۲) نمونه ای از مجموعه دیوار برشی با شکل پذیری افزوده با استفاده از الیاف آورده شده است.



شکل (۲): مجموعه دیوار برشی محصور شده با الیاف کامپوزیتی GFRP

از الیاف GFRP جهت افزایش شکل پذیری مفاصل خمشی دیوار برشی استفاده می گردد. در اثر محصور شدگی بتن توسط الیاف کرنش نهایی شکست فشاری بتن و در نتیجه شکل پذیری افزایش می یابد. برای بتن محصور شده با الیاف بر خلاف بتن معمولی از رابطه تنش-کرنش دوخطی استفاده می شود نمونه ای از منحنی های لنگر و انحناء در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمونه ای از منحنی های لنگر- انحناء و نیروی محوری- لنگر در حد نهایی برای دیوارهای معمولی و دیوارهای محصور شده با الیاف

۳-۳- مقایسه مشخصات مفاصل غیر خطی یک نمونه دیوار برشی معمولی با دیوار برشی شکل پذیر شده با الیاف GFRP

لنگر و نیروی محوری بحرانی وارد بر دیوار برابر به ترتیب برابر $P=3000 \text{ KN}$, $M=30200 \text{ KN.m}$ می باشد. الف) دیوار برشی معمولی

$$M_y = 33760 \text{ KN.m} \quad \psi_y = 6.4 * 10^{-6} (1/\text{mm})$$

$$M_u = 45060 \text{ KN.m} \quad \psi_u = 2.94 * 10^{-5} (1/\text{mm})$$

طول مفصل خمیری بر اساس FEMA-356 مقدار $l_p = 2750 \text{ mm}$ می باشد.

$$\theta_y = 1.76 * 10^{-3} \quad , \quad \theta_u = 8.1 * 10^{-3}$$

ب) دیوار برشی شکل پذیر شده با الیاف GFRP

$$M_y = 33760 \text{ KN.m} \quad \psi_y = 6.5 * 10^{-6} (1/\text{mm})$$

$$M_u = 46480 \text{ KN.m} \quad \psi_u = 1.1 * 10^{-4} (1/\text{mm})$$

$$\theta_y = 1.79 * 10^{-3} \quad , \quad \theta_u = 0.0303$$

مقدار ψ_u دیوار برشی با شکل پذیری افزوده با الیاف GFRP ، $3/74$ برابر مقدار ψ_u دیوار برشی معمولی است و در نتیجه با افزایش

مقدار θ_u دیوار شکل پذیر شده با الیاف هم به همین نسبت افزایش می یابد.

در این حالت کرنش کششی آرماتورهای کششی انتهایی در اجزای مرزی در دیوارهای برشی تقویت شده با الیاف، تا کرنش کششی $\epsilon_s = 5\%$ افزایش می یابد، در حالی که در دیوارهای برشی معمولی آرماتورهای کششی در حالت حد نهایی تحت کرنش $1/2\%$ قرار می گیرند.

۴- مقایسه مدل عددی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی «KHALIL و GH OBARAH» [۲]

به منظور بررسی صحت و اعتبار مدل های عددی توسعه داده شده توسط نویسندگان نتایج مدل های عددی با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان مقایسه گردید.

برای انجام این مقایسه مشخصات مفاصل غیر خطی نمونه های آزمایشی $RW1$ و $RW2$ در شکل (۴) با استفاده از مدل عددی محاسبه و منحنی های لنگر- انحناء بدست آمده در شکل (۵) نشان داده شده است. پس از محاسبه مشخصات مفاصل غیر خطی نمونه های آزمایشی در نرم افزار Sap2000 مدل سازی گردیدند و مشخصات مفاصل پلاستیک بدست آمده ، به مقاطع دیوار در طول مفاصل پلاستیک آن اختصاص داده شد.

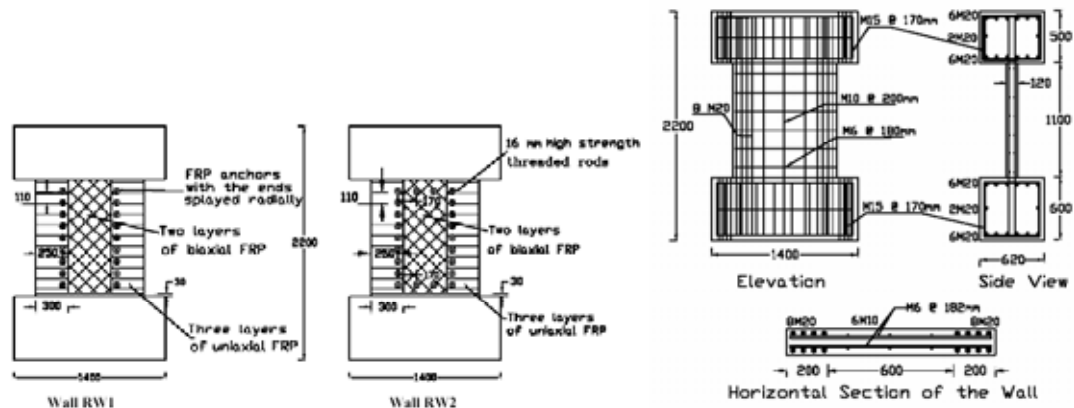
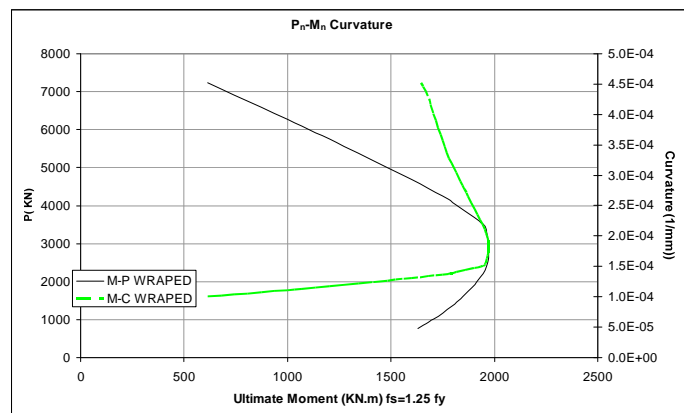


Fig. 6 Rehabilitation Schemes for RW1 and RW2

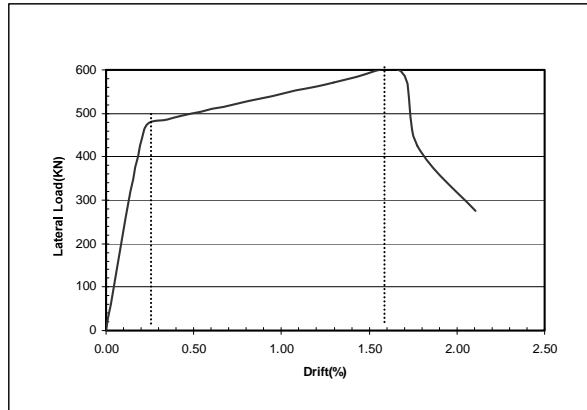
Fig. 2 Specimen dimensions and reinforcement details

شکل (۴): مشخصات نمونه های آزمایشی *Khalil, Ghojarah* [۲]

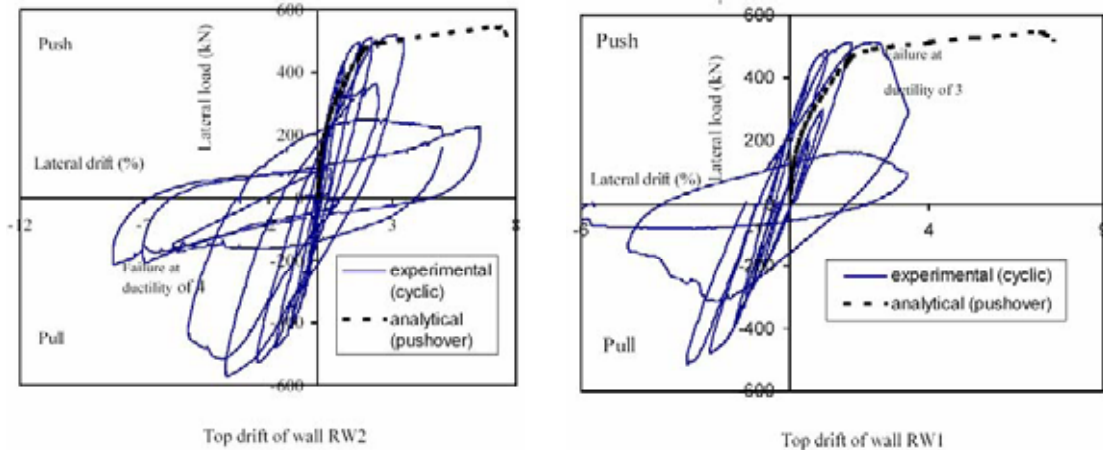


شکل (۵): منحنی های لنگر- انحناء و نیروی محوری- لنگر در حد نهایی بدست آمده برای نمونه آزمایشی دیوار تقویت شده با الیاف *Khalil, Ghojarah* [۲]

پس از انجام آنالیز *Pushover* منحنی ظرفیت مدل دیوار برشی با مشخصات مفاصل غیر خطی محاسبه شده توسط نویسندگان بدست آمد (شکل 6). با مقایسه این منحنی با منحنی ظرفیت بدست آمده در آزمایشات *Khalili, Ghojarah* که در شکل (7) آورده شده است مطابقت خوبی بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی مشاهده گردید. ظرفیت نیروی جانبی نهایی دیوار در نمونه *RW2* در آزمایش برابر 571 KN و در مدل تحلیلی به مقدار 597 KN محاسبه گردید. حداکثر کرنش آرماتورهای طولی در نمونه های آزمایشگاهی 0.02 mm/mm و در نمونه تحلیلی 0.028 mm/mm بدست آمد. نسبت شکل پذیری در نمونه آزمایشی *RW2* برابر ۴ و در مدل تحلیلی $4/6$ بدست آمد.



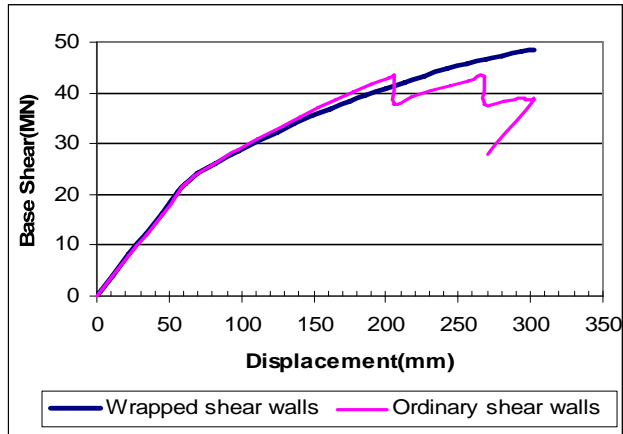
شکل (۶) : منحنی ظرفیت بدست آمده از مدل تحلیلی



شکل (۷) : منحنی های ظرفیت نمونه های آزمایشگاهی [۲]

۵- مقایسه عملکرد ساختمان تقویت شده با دیوار برشی معمولی و دیوار برشی شکل پذیر شده با الیاف GFRP

در سازه تقویت شده با دیوارهای برشی معمولی با وجود اینکه سازه تا حد زیادی به عملکرد هدف نزدیک شده است. ولی با شکست دیوارهای برشی تراز زیرزمین سازه نمی تواند عملکرد هدف را در هر دو سطح خطر تأمین نماید. لذا با تقویت دیوارهای برشی با الیاف GFRP شکل پذیری دیوارها تا حد زیادی افزایش یافته و در نتیجه محدوده پذیرش مفاصل غیرخطی نیز بیشتر می شود و با استفاده از این روش مشکل دیوارهای برشی به خوبی مرتفع گردید. استفاده از این روش موجب بهتر شدن منحنی ظرفیت سازه شده است. به طوری که منحنی ظرفیت سازه تقویت شده با دیوارهای برشی با شکل پذیری افزوده برخلاف سازه تقویت شده با دیوار برشی معمولی تا مرحله شکست نهایی دچار افت قابل ملاحظه ای نشده و مقاومت جانبی این سازه بیشتر از سازه با دیوارهای برشی معمولی می باشد شکل (۸).



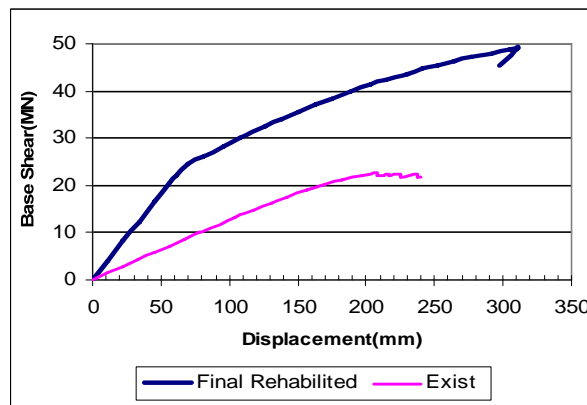
شکل (۸): مقایسه منحنی ظرفیت سازه تقویت شده با دیوار برشی معمولی و دیوار برشی باشکل پذیری افزوده در یکی از حالات تحلیل جهت X

۶- مقایسه عملکرد ساختمان بتنی موجود با ساختمان مقاوم شده با دیوارهای برشی باشکل پذیری افزوده با الیاف کامپوزیتی GFRP

با مقایسه منحنی های ظرفیت سازه موجود و سازه تقویت شده مشاهده گردید که مقاومت جانبی سازه در برابر بارهای جانبی با انجام طرح مقاوم سازی نهایی حداقل ۲ برابر می گردد و قابلیت تحمل تغییرمکان جانبی سازه نیز حدود ۳۰ درصد افزایش می یابد.

مقایسه رفتار سازه موجود و سازه تقویت شده در هر دو سطح خطر زلزله $DBE1$ و $DBE2$ در دو جهت x و y نشان داد که عملکرد سازه موجود از سطح عملکرد انهدام و فروریزش (CP) به سطح عملکرد استفاده بی وقفه (IO) در سطح خطر $DBE1$ و سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) در سطح خطر $DBE2$ ارتقاء یافت. تغییر مکان جانبی نقطه کنترل (سقف بام) سازه تقریباً به نصف کاهش یافت.

سازه تقویت شده از حالت شکست به صورت مکانیزم طبقه خارج شد و تغییر مکان نسبی طبقات در سازه تقویت شده مخصوصاً در تراز زیرزمین به کمتر از ۳۰ درصد آن در سازه موجود کاهش یافت شکل (۹) و جدول (۱).



شکل (۹): مقایسه منحنی ظرفیت سازه موجود و سازه مقاوم شده با دیوارهای برشی باشکل پذیری افزوده با الیاف در یکی از حالت های تحلیل جهت X تحت زلزله $DBE2$

جدول (1): تغییر مکان نسبی طبقات سازه موجود و سازه تقویت شده با دیوارهای برشی شکل پذیر تحت زلزله DBE2

طبقه (تراز)		$D_{rx}\%$		$D_{ry}\%$	
		سازه موجود	سازه تقویت شده	سازه موجود	سازه تقویت شده
(اول)	1.15	2.24	0.62	2.18	0.61
(دوم)	5.05	1.55	0.8	1.48	0.74
(سوم)	9.25	0.87	0.79	1.03	0.79
(چهارم)	13.5	1.04	0.92	1.19	1.01
(پنجم)	17.65	0.73	0.73	1.05	0.7

۷- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج بدست آمده از مطالعه موردی بهسازی لرزه ای یک ساختمان بتنی با قاب خمشی با اضافه نمودن دیوارهای برشی شکل پذیر شده با الیاف شیشه و مقایسه آن با دیوارهای برشی معمولی ارائه شد نتایج بدست آمده بیانگر اثرات بسیار مثبت استفاده از دیوارهای برشی شکل پذیر شده توسط الیاف، نسبت به دیوارهای برشی به لحاظ افزایش شکل پذیری تا حد ۳ برابر به دلیل اثرات محصور شدگی بتن در اجزای مرزی می باشد. تامین هدف بهسازی ویژه با استفاده از دیوارهای برشی معمولی، به دلیل شکست زود هنگام دیوارهای برشی در مدل، دستیابی به سطح عملکرد (IO) در سطح زلزله DBE1 و (LS) و در سطح خطر زلزله DBE2، میسر نگردید. در حالی که با اضافه نمودن الیاف شیشه به صورت دورپیچ در اجزای مرزی افزایش شکل پذیری هدف بهسازی ویژه محقق گردید.

توضیحات

- I. DBE1 : سطح خطر با احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ ساله)
 II. DBE2 : سطح خطر با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله)

۸- مراجع

- [1] ASCE(2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings." FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.; November 2000.
 [2] Ghobarah, A.; Khalil, A.A.; "Seismic Rehabilitation of reinforced concrete Walls using Fiber Composites." 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 2004, Paper No. 3316.
 [3] Kong, K.H.; Tan, K.H.; Balendra, T.; "Retrofitting of Shear Walls Designed to BS-8110 for Seismic Loads Using FRP", FRP CS-6, Singapore, 8-10 July 2003.
 [4]. Hosseini, A.; Khaloo, Ali.R; Fadaee, S.; "Seismic performance of high-strength concrete square columns confined with carbon fiber reinforced polymers (CFRPs)." Canadian Journal of Civil Engineering, NRC, June 2005, pp 569-578.
 [5] ACI 440.2R-02. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures." ACI Committee 440 Report, 2002.
 [6] Applied Technology Council (ATC), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC- 40", Redwood City, California, Applied Technology Council, 1996.
 [۷] موسوی، سید هاشم؛ «تقویت ستونهای بتن آرمه با استفاده از مواد پلیمری (FRP)»، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۳.
 [8] Teng, J.G.; Chen, J.F.; Smith, S.T.; Lam, L.; "FRP-Strengthened RC Structures", 2002, John Wiley and Sons.
 [9] ACI Committee 318. "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (318R-95)." American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995, 369.