



کد مقاله: ۱۳۰-۱

طراحی کاربردی و اجرای سازه دیوار برشی فولادی بر اساس ضخامت ورق‌های موجود در بازار

معصومه قلی‌پور^۱، محمدمهدی علی‌نیا^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Gholipour_m@aut.ac.ir

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در طراحی متداول قاب‌های فولادی، مقاطع تیر و ستون از میان مقاطع موجود در بازار و با ظرفیتی بزرگتر از نیازهای طراحی انتخاب می‌گردند. در طراحی سازه دیوار برشی فولادی نیز لازم است ضخامت ورق از میان ضخامت‌های موجود انتخاب گردد. در طراحی متداول سازه دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق با صرف نظر از ظرفیت برشی قاب فولادی، برای تحمل کل برش طبقه طراحی می‌گردد. در اینجا نیز در زمان طراحی سازه، ممکن است ضخامت ورق طراحی شده در بازار موجود نبوده و نیاز به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب ضخامت بزرگتر یا کوچکتر از ضخامت طراحی باشد. در این مقاله، سازه‌های ۴، ۱۰ و ۱۳ طبقه دیوار برشی فولادی در سه حالت، (۱) ضخامت ورق‌های تئوری به دست آمده از روابط طراحی، (۲) ضخامت ورق‌های کوچکتر موجود و (۳) ضخامت ورق‌های بزرگتر موجود بررسی و رفتار آن‌ها تحت تحلیل بارافزون مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییر ضخامت طراحی ورق همچنین بر اساس روش پیشنهاد شده در دستورالعمل *Steel Design Guide 20* مبنی بر بازبینی طراحی ورق و اعضای مرزی سازه دیوار برشی فولادی بر اساس نتایج مربوط به سهم ورق و قاب از برش طبقه نیز بررسی گردیده است. مطالعه رفتار سازه دیوار برشی فولادی برای ضخامت ورق‌های مختلف نشان می‌دهد که در طراحی ورق سازه دیوار برشی فولادی، بر خلاف روند طراحی معمول تیر و ستون که مقطع طراحی بزرگتر از حد نیاز انتخاب می‌گردد، انتخاب ضخامت ورق کوچکتر از مقادیر تئوری مناسب بوده و در عین حفظ رفتار مطلوب سازه، سبب کاهش مقاطع اعضای مرزی، سبک‌تر شدن سازه، صرفه‌جویی در مصرف فولاد و اقتصادی شدن طرح می‌گردد. روش ارائه شده در دستورالعمل *Steel Design Guide 20* نیز روشی کاملاً تقریبی و وقت‌گیر بوده و نتایج قابل قبولی خصوصاً برای طراحی سازه‌های بلند ارائه نمی‌دهد. در مرحله اجرای سازه نیز، در صورت موجود نبودن ضخامت ورق طراحی، کاهش ضخامت ورق در سازه‌های کوتاه‌مرتبه می‌بایست به کمترین مقدار ممکن انجام گیرد. لیکن با افزایش ارتفاع سازه، امکان کاهش بیشتر ضخامت ورق‌ها وجود داشته و اثر نامطلوبی بر ظرفیت باربری سازه ایجاد نمی‌شود.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق تئوری، طراحی کاربردی، ضخامت ورق موجود در بازار

۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی به عنوان یکی از انواع سیستم‌های باربر جانبی از دهه ۷۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم در شکل متداول آن متشکل از تیرها به عنوان اعضای مرزی افقی (HBE: Horizontal Boundary Elements) ستون‌ها به عنوان اعضای مرزی قائم (VBE:)

Vertical Boundary Elements) و ورق فولادی پرکننده قاب می‌باشد. نتایج آزمایشات و مطالعات انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی، نشان‌دهنده سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی مطلوب این سیستم سازه‌ای است [۷-۱]. در طراحی متداول قاب‌های فولادی، مقاطع تیر و ستون از میان مقاطع موجود در بازار و با ظرفیتی بزرگتر از نیازهای طراحی انتخاب می‌گردند. در سازه دیوار برشی فولادی، علاوه بر اعضای قاب، طراحی ضخامت ورق پرکننده نیز مطرح می‌باشد. ضخامت ورق محاسبه شده بر اساس روابط طراحی لزوماً در بازار موجود نبوده و نیاز به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب ضخامت بزرگتر یا کوچکتر از ضخامت تئوری است. در روش طراحی متداول سازه دیوار برشی فولادی، ضخامت ورق با صرف نظر از ظرفیت برشی قاب فولادی، برای تحمل کل برش طبقه طراحی می‌گردد. از طرفی مطابق اصول "طراحی بر اساس ظرفیت" طراحی اعضای مرزی برای ظرفیت پلاستیک کامل ضخامت ورق انجام می‌گیرد. لذا مقدار ضخامت ورق نقش قابل‌توجهی بر طراحی اعضای قاب و ظرفیت باربری سازه داشته و به منظور طراحی مطلوب و اقتصادی سازه دیوار برشی فولادی نیاز به انتخاب ضخامت مناسب ورق می‌باشد.

در این مقاله به منظور بررسی طراحی مناسب و کاربردی ضخامت ورق، سازه‌های ۴، ۱۰ و ۱۳ طبقه دیوار برشی فولادی در سه حالت طراحی شده و رفتار آنها تحت تحلیل بارافزون مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت اول، ضخامت ورق‌ها عیناً مقادیر به دست آمده از روابط طراحی لحاظ گردیده و در دو حالت دیگر، انتخاب ضخامت ورق از میان ورق‌های موجود در بازار و بر اساس نزدیکترین ضخامت بزرگتر و کوچکتر به ضخامت تئوری انجام شده است. در بخش دوم مطالعات این مقاله، روش پیشنهاد شده در دستورالعمل Steel Design Guide 20 [۸] مبنی بر بازبینی طراحی ورق و اعضای مرزی سازه دیوار برشی فولادی بر اساس نتایج مربوط به سهم ورق و قاب از برش طبقه بررسی شده و در بخش سوم تغییر ضخامت ورق در زمان اجرای سازه مورد مطالعه قرار گرفته است.

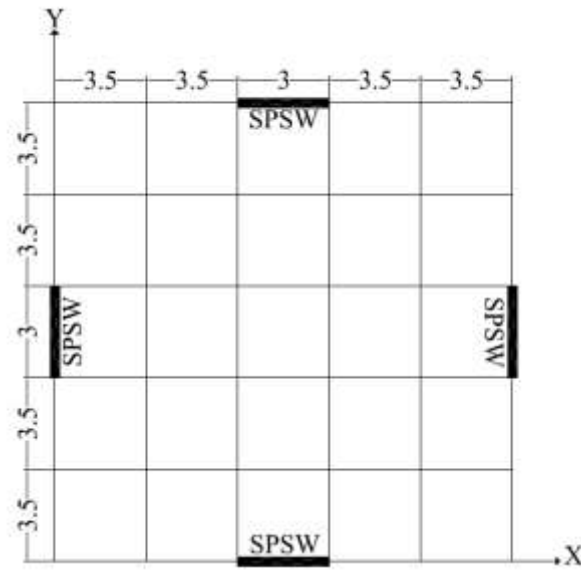
۲- روش مطالعه

- مشخصات هندسی مدلها

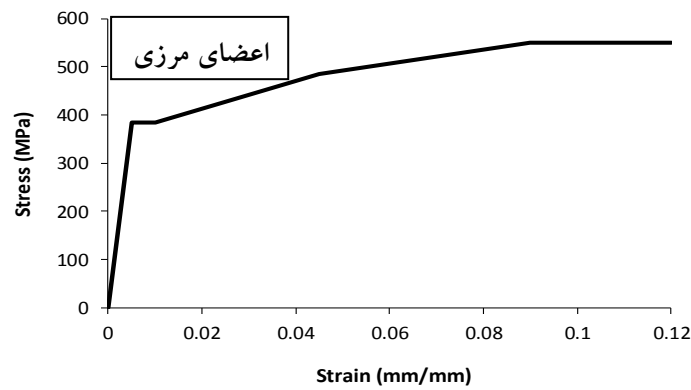
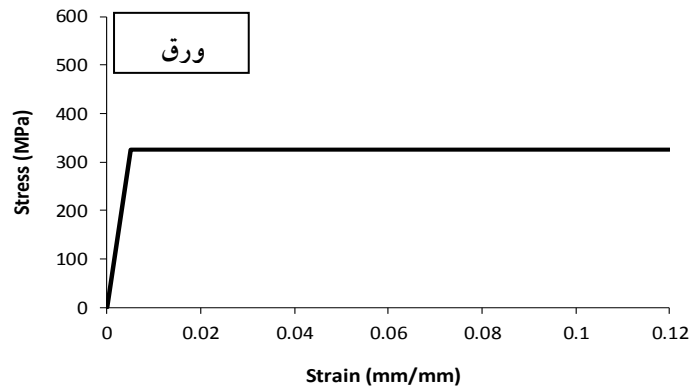
در این مقاله، سازه‌های دیوار برشی فولادی ۴، ۱۰ و ۱۳ طبقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پلان استفاده شده در محاسبه وزن طبقات و بارگذاری زلزله در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر طول دهانه بر حسب متر می‌باشد. اتصال تیر به ستون جز در دهانه دیوار برشی فولادی که بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC-341 [۹] می‌بایست اتصال خمشی باشد، در سایر دهانه‌ها از نوع اتصال برشی است. بدین ترتیب بار جانبی ساختمان در هر راستا توسط دو دیوار برشی فولادی تحمل می‌شود. ارتفاع طبقات ۳٫۶ متر در نظر گرفته شده است.

- خواص مصالح

برای ورق‌ها و اعضای مرزی به ترتیب از فولاد ASTM-A36 و ASTM-A572 استفاده شده است. مشخصات تنش- کرنش مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است. علت استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین‌تر برای ورق فولادی، کاهش نیروهای وارد از طرف ورق به اعضای مرزی و طراحی سبک‌تر این اعضا می‌باشد.



شکل ۱: پلان استفاده شده در محاسبات باگذاری سازه‌ها



شکل ۲: مشخصات تنش - کرنش مصالح فولاد

- روش طراحی

محاسبه بار مرده و زنده وارد بر سازه بر اساس آئین‌نامه ASCE 7-10 [۱۰] انجام گرفته است. بارگذاری زلزله نیز مطابق با روش استاتیکی معادل ارائه شده در این آئین‌نامه محاسبه شده است. طراحی تیرها و ستون‌ها بر اساس اصول روش "طراحی بر اساس ظرفیت" ارائه شده در آئین‌نامه AISC-341 [۹] و مطابق با ضوابط آئین‌نامه AISC-360 [۱۱] انجام گرفته است. به دلیل بزرگ بودن نیروهای طراحی اعضای مرزی به خصوص در طبقات پایینی سازه ۱۳ طبقه، امکان استفاده از نیمرخ‌های متداول در ایران نظیر نیمرخ IPE و حتی نیمرخ IPB نمی‌باشد. به همین جهت برای تیرها از مقاطع آمریکایی (W) و برای ستون‌ها از مقاطع قوطی استفاده گردیده است.

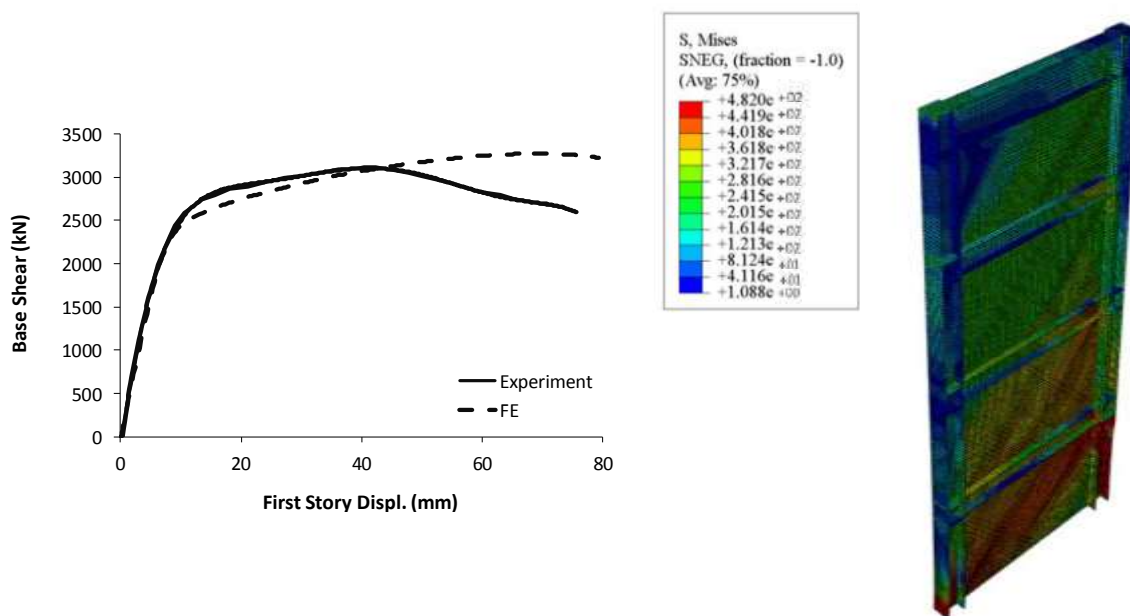
- صحت‌سنجی روش مدل‌سازی

مدلسازی و تحلیل سازه‌ها در نرم‌افزار ABAQUS [۱۲] انجام گرفت. به منظور شبیه‌سازی سازه‌ها از روش المان shell استفاده شده و کلیه اعضای سازه، شامل تیرها، ستون‌ها و ورق‌ها توسط المان S4R مدل‌سازی شدند. المان S4R یک المان چهار گره‌ای با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش یافته بوده که در هر گره دارای شش درجه آزادی شامل سه درجه آزادی دورانی و سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد. المان S4R قابلیت مدل‌سازی پوسته‌های نازک تا ضخیم را دارا بوده و می‌تواند کرنش‌ها و تغییر مکان‌های بزرگ را به خوبی مدل‌سازی نماید. نتایج ارائه شده در مراجع [۵ و ۱۳] بیانگر دقت مطلوب این روش برای مدل‌سازی دیوار برشی فولادی می‌باشد.

در نخستین گام لازم است مدل‌سازی و عملکرد مدل‌های تحلیلی صحت‌سنجی شود. بدین منظور، نمونه سازه ۴ طبقه آزمایش شده توسط Driver [۱۴] با استفاده از روش المان shell، شبیه‌سازی شده و تحت بارگذاری بارافزون تحلیل شد. منحنی بارافزون به دست آمده از تحلیل به همراه منحنی متناظر حاصل از آزمایش در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی در هر دو ناحیه رفتار الاستیک و غیر الاستیک انطباق قابل‌قبولی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در شکل ۳، همچنین کانتور توزیع تنش فون میسز در بار نهایی نیز نشان داده شده است. مقادیر تنش ارائه شده بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تسلیم و گسترش میدان کششی در ورق طبقه اول و به مقدار کمتری در ورق طبقه دوم اتفاق افتاده است. از طرفی نقاط متعدد تسلیم در ستون‌های طبقه اول ملاحظه می‌شود. این موارد در نمونه آزمایشگاهی نیز گزارش شده است.

۳- طراحی سازه بر اساس ضخامت ورق‌های موجود در بازار

در روش متداول طراحی دیوار برشی فولادی، طراحی ضخامت ورق برای تحمل کل برش طبقه انجام می‌گیرد. ضخامت به دست آمده از روابط طراحی لزوماً در بازار موجود نبوده و نیاز به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب ضخامت بزرگتر یا کوچکتر از ضخامت طراحی است. در این بخش، طراحی سازه‌های ۴، ۱۰ و ۱۳ طبقه دیوار برشی فولادی در سه حالت، ۱) ضخامت ورق‌های تئوری به دست آمده از روابط طراحی، ۲) ضخامت ورق‌های کوچکتر موجود و ۳) ضخامت ورق‌های بزرگتر موجود انجام و رفتار آن‌ها تحت تحلیل بارافزون مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۳: صحت‌سنجی روش مدل‌سازی

بر اساس جستجوی انجام شده و اطلاعات به دست آمده، ضخامت ورق‌های موجود در بازار کشور برای فولاد ASTM-A36 عبارتند از: ۱، ۱،۵، ۲، ۲،۵، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ... میلی‌متر. نتایج طراحی سازه‌های ۴، ۱۰ و ۱۳ طبقه، به ترتیب در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از رفتار سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه، طراحی سازه ۱۳ طبقه صرفاً برای حالت ضخامت ورق‌های کوچکتر از مقادیر طراحی انجام گرفته است. در نامگذاری مدل‌ها، زمانیکه ضخامت ورق‌ها کوچکتر از مقادیر تئوری انتخاب گردیده، مدل با نام RD (Rounded Down) و در حالتیکه ضخامت ورق‌ها بزرگتر از مقادیر تئوری انتخاب شده است، مدل با نام RU (Rounded Up) نامیده می‌شود. از طرفی سازه‌های طراحی شده بر اساس ضخامت ورق به دست آمده از روابط طراحی، Theoretical نامیده می‌شوند. لازم به ذکر است که انتخاب ضخامت ورق از میان ضخامت ورق‌های موجود بر اساس نزدیکترین ضخامت بزرگتر و کوچکتر به ضخامت تئوری انجام شده است. از طرفی با تغییر ضخامت ورق در هر حالت، طراحی اعضای مرزی نیز مجدداً به منظور ارضای ضوابط "طراحی بر اساس ظرفیت" انجام گرفته است.

جدول ۱: ضخامت ورق و مقاطع اعضای مرزی - سازه ۴ طبقه

Level	Plate Thickness (mm)			HBE			VBE		
	Theoretical	RD	RU	Theoretical	RD	RU	Theoretical	RD	RU
4	1.18	1.00	1.50	W8×58	W8×58	W8×67	BOX 300×20	Box 250×25	Box 300×25
3	2.10	2.00	2.50	W8×58	W8×58	W8×58	BOX 300×30	Box 300×25	Box 350×25
2	2.75	2.50	3.00	W8×58	W8×58	W8×58	BOX 350×25	Box 350×25	Box 350×25
1	3.10	3.00	4.00	W8×58	W8×58	W10×88	BOX 350×25	Box 350×25	Box 350×35

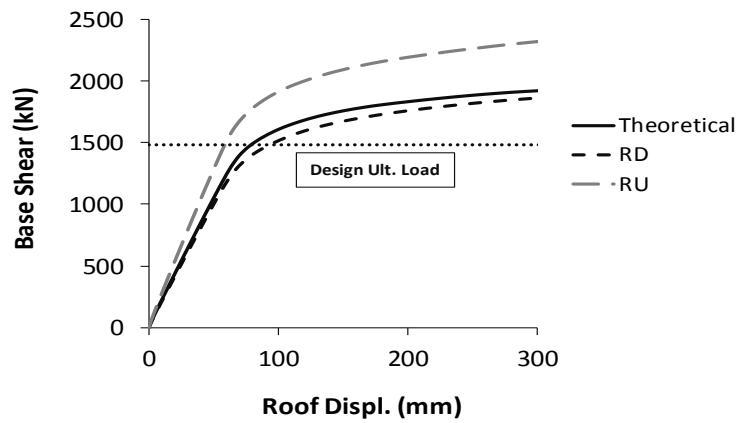
جدول ۲: ضخامت ورق و مقاطع اعضای مرزی - سازه ۱۰ طبقه

Level	Plate Thickness (mm)			HBE			VBE		
	Theoretical	RD	RU	Theoretical	RD	RU	Theoretical	RD	RU
10	1.43	1.00	1.50	W8×67	W8×48	W8×67	BOX 350×25	Box 350×25	Box 350×30
9	2.80	2.50	3.00	W10×88	W10×68	W10×68	BOX 450×35	Box 450×35	Box 500×40
9	4.15	4.00	5.00	W10×88	W10×88	W10×112	BOX 550×45	Box 500×50	Box 550×55
7	5.40	5.00	6.00	W10×112	W10×88	W10×112	BOX 650×45	Box 600×50	Box 650×60
6	6.40	6.00	8.00	W10×112	W10×112	W12×190	BOX 650×65	Box 650×55	Box 700×60
5	7.40	6.00	8.00	W12×152	W10×112	W12×136	BOX 750×55	Box 700×60	Box 750×65
4	8.00	8.00	8.00	W12×152	W12×190	W12×136	BOX 750×60	Box 700×65	Box 750×75
3	8.50	8.00	10.00	W12×170	W12×136	W12×230	BOX 750×65	Box 700×70	Box 750×75
2	8.80	8.00	10.00	W12×170	W12×136	W12×230	BOX 750×65	Box 700×70	Box 800×70
1	9.10	8.00	10.00	W12×190	W12×170	W12×230	BOX 750×65	Box 700×70	Box 800×70

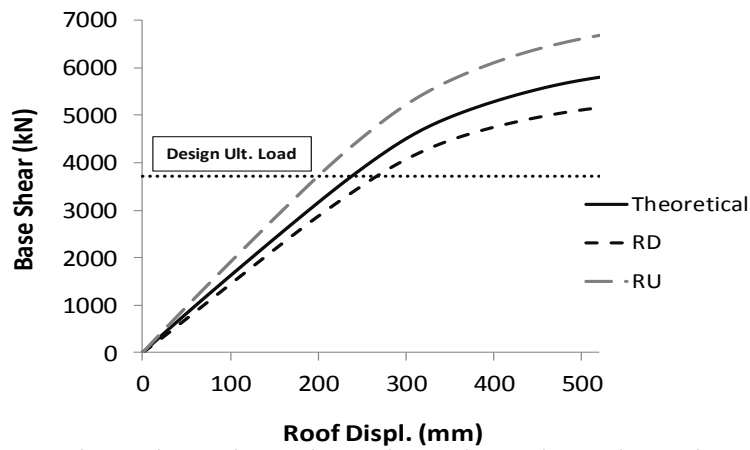
جدول ۳: ضخامت ورق و مقاطع اعضای مرزی - سازه ۱۳ طبقه

Level	Plate Thickness (mm)		HBE		VBE	
	Theoretical	RD	Theoretical	RD	Theoretical	RD
13	1.53	1.50	W8×67	W8×67	BOX 400×30	Box 350×35
12	3.15	3.00	W10×100	W10×77	BOX 550×40	Box 500×45
11	4.80	4.00	W10×100	W10×77	BOX 700×45	Box 600×60
10	6.40	6.00	W10×112	W12×152	BOX 800×55	Box 700×60
9	7.90	6.00	W10×112	W10×77	BOX 900×60	Box 850×60
8	9.00	8.00	W12×170	W12×190	BOX 900×75	Box 850×75
7	10.40	10.00	W12×170	W12×190	BOX 1000×70	Box 950×70
6	11.20	10.00	W12×170	W12×120	BOX 1000×75	Box 950×75
5	12.50	12.00	W12×190	W12×190	BOX 1100×75	Box 1050×70
4	13.10	12.00	W12×190	W12×170	BOX 1100×80	Box 1050×80
3	13.40	12.00	W12×190	W12×170	BOX 1100×80	Box 1050×80
2	13.60	12.00	W12×190	W12×170	BOX 1100×80	Box 1050×80
1	14.00	12.00	W12×252	W12×190	BOX 1100×80	Box 1050×80

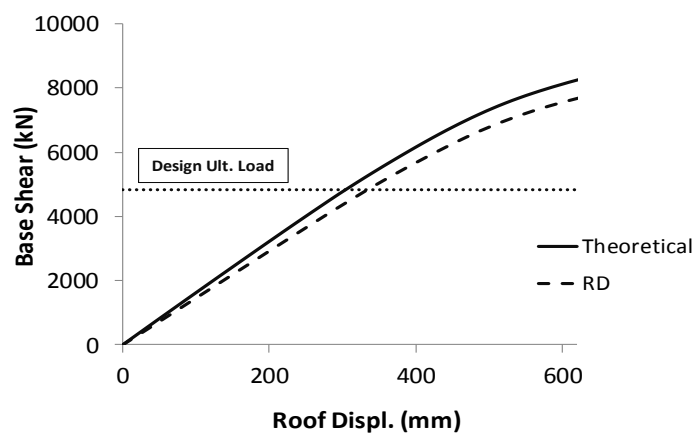
برای سازه‌های مورد مطالعه، منحنی‌های بارافزون به دست آمده از تحلیل مدل‌های RD و RU به همراه منحنی متناظر به دست آمده در حالت طراحی تئوری، در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. به منظور درک بهتر رفتار سازه در هر یک از حالت‌های طراحی، ظرفیت نهایی مورد انتظار از سازه که برابر حاصلضرب برش پایه طراحی در اضافه مقاومت ارائه شده در آئین‌نامه ($\Omega_0 = 2$) می‌باشد ($DesignUltimateLoad = 2 \cdot DesignBaseShear$) با نقطه‌چین نشان داده شده است. در خصوص ظرفیت باربری نهایی سازه نیز با توجه به غالب بودن معیار دررفت ۲،۵٪، منحنی‌های بارافزون صرفاً تا مقدار جابجایی بام متناظر با وقوع دررفت ۲،۵٪ در سازه ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت RD علیرغم کوچکتر بودن ضخامت طراحی ورق نسبت به مقدار تئوری و به تبع آن کوچکتر بودن مقاطع اعضای مرزی، همچنان ظرفیت سازه بالاتر از حد نهایی تعیین شده توسط آئین‌نامه می‌باشد. در خصوص رفتار سازه‌ها، با توجه به طراحی اعضای مرزی مطابق با اصول "طراحی بر اساس ظرفیت" در هر حالت طراحی، توالی تسلیم به صورت مطلوب می‌باشد، بگونه‌ای که شروع تسلیم از ورق‌ها بوده و در ادامه پس از تسلیم بخش قابل توجهی از ورق‌ها، ابتدا تسلیم در انتهای تیر طبقات و پس از آن در پای ستون‌ها اتفاق می‌افتد.



شکل ۴: منحنی‌های بارافزون - سازه ۴ طبقه



شکل ۵: منحنی‌های بارافزون - سازه ۱۰ طبقه



شکل ۶: منحنی‌های بارافزون - سازه ۱۳ طبقه

به منظور مقایسه بهتر رفتار سازه‌ها در حالت‌های مختلف طراحی، مقادیر اضافه مقاومت سازه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: ضرایب اضافه مقاومت سازه‌ها در حالت‌های مختلف طراحی

Model	Theoretical	RD	RU
4-story	2.56	2.51	3.10
10-story	2.93	2.45	3.22
13-story	3.04	2.93	-

عامل اصلی رفتار مشاهده شده مربوط به روش طراحی سیستم می‌باشد. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد در روش معمول طراحی سیستم دیوار برشی فولادی، در تعیین ضخامت ورق از مقاومت برشی قاب صرف‌نظر شده و ضخامت ورق برای تحمل کل برش طبقه طراحی می‌شود. این در حالی است که با طراحی اعضای مرزی برای ظرفیت کامل پلاستیک ورق، مقاطع بزرگی برای اعضای قاب نتیجه شده و لذا ظرفیت برشی قاب و به دنبال آن اضافه مقاومت سازه قابل توجه می‌باشد.

اختلاف وزن سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در حالت طراحی RU با RD در جدول ۵ ارائه شده است. با افزایش تعداد طبقات سازه، میزان اختلاف وزن سازه در دو حالت طراحی قابل توجه می‌باشد.

جدول ۵: اختلاف وزن سازه در دو حالت طراحی RU و RD

Model	Weight Difference (ton)
4-story	1.56
10-story	15.36

با توجه به نتایج به دست آمده و توضیحات ارائه شده، در تعیین ضخامت طراحی ورق در سیستم دیوار برشی فولادی بر خلاف روند طراحی معمول تیر و ستون که مقطع طراحی بزرگتر از حد نیاز انتخاب می‌گردد، انتخاب ضخامت ورق کوچکتر از مقادیر تئوری به دست آمده از روابط، مطلوب می‌باشد. کوچک شدن ضخامت ورق از طرفی سبب کوچکتر شدن مقاطع اعضای مرزی، سبک‌تر شدن سازه، صرفه‌جویی در مصرف فولاد و اقتصادی شدن طرح می‌گردد.

۴- بازبینی طراحی سازه بر اساس سهم ورق و قاب از برش طبقه

در دستورالعمل [۸] Steel Design Guide 20 توصیه شده است که بعد از طراحی اولیه، تحلیلی به منظور محاسبه سهم ورق و قاب از برش طبقه انجام شده و طراحی ورق بر اساس مقدار برش به دست آمده بازنگری گردد. طراحی اعضای مرزی نیز بر اساس اصول "طراحی بر اساس ظرفیت" برای ضخامت جدید بازبینی می‌شود. به منظور بررسی کفایت روش پیشنهاد شده، طراحی سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه بر اساس این روش مورد بازبینی قرار گرفت. در نخستین گام، سهم ورق و قاب از برش طبقه در هر یک از طبقات سازه محاسبه گردید. مطابق با توضیحات ارائه شده در مرجع [۸]، تعیین سهم ورق و قاب در برش پایه طراحی انجام گرفت. پس از تعیین سهم ورق، ضخامت طراحی ورق بر اساس مقدار برش جدید بازبینی شد. در ادامه طراحی اعضای مرزی نیز بر اساس ضخامت جدید ورق بازبینی گردید. در طراحی ستون‌ها همچنین لازم بود کنترل مربوط به بزرگتر بودن ظرفیت برشی این اعضا در مقایسه با سهم آنها از برش طبقه انجام گیرد. با توجه به اینکه ضخامت ورق بازبینی شده تئوری بوده و ضخامت به دست آمده لزوماً مطابق با موجودی بازار نمی‌باشد، طراحی سازه‌ها همانند بخش ۳ در دو حالت ضخامت ورق‌های کوچکتر و بزرگتر از مقادیر تئوری انجام گرفت. نامگذاری مدل‌ها نیز در حالت ضخامت ورق کوچکتر به صورت DG-RD و در حالت ضخامت ورق بزرگتر به صورت DG-RU انجام شده است. DG اشاره به مرجع روش استفاده شده (Steel Design Guide 20) دارد. نتایج طراحی انجام شده در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

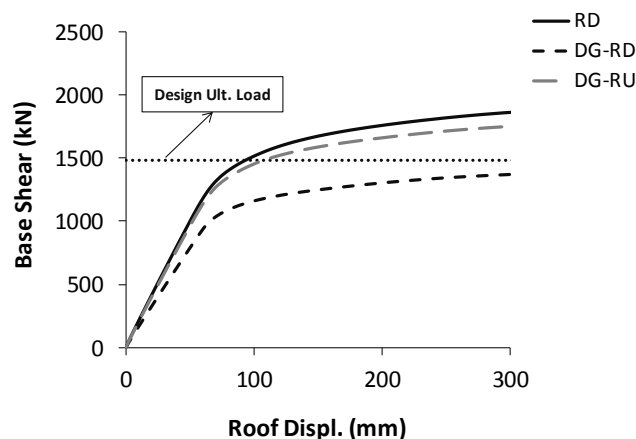
جدول ۶: ضخامت ورق و مقاطع اعضای مرزی - سازه ۴ طبقه

Level	Plate		HBE		VBE	
	Thickness (mm)		DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU
	DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU
4	1.00	1.00	W8×48	W8×48	Box 250×25	Box 250×25
3	1.50	2.00	W8×40	W8×48	Box 300×20	Box 300×25
2	2.00	2.50	W8×40	W8×48	Box 300×25	Box 350×25
1	2.00	2.50	W8×40	W8×48	Box 300×25	Box 350×25

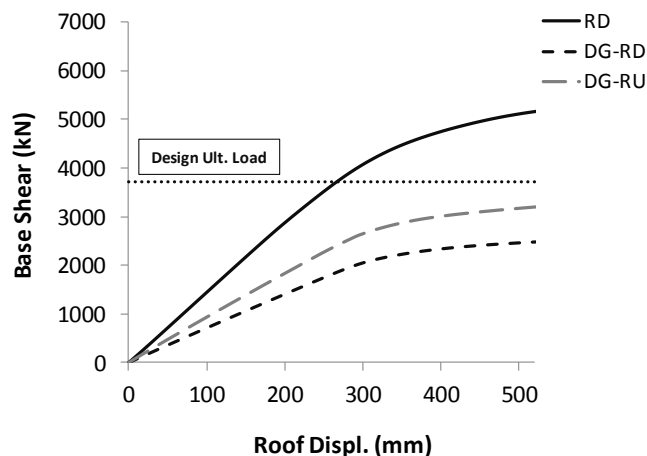
جدول ۷: ضخامت ورق و مقاطع اعضای مرزی - سازه ۱۰ طبقه

Level	Plate		HBE		VBE	
	Thickness (mm)		DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU
	DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU	DG-RD	DG-RU
10	1.00	1.50	W8×48	W8×67	Box 300×20	Box 300×30
9	1.50	2.00	W8×40	W8×48	Box 350×30	Box 400×35
9	2.00	2.50	W8×40	W8×48	Box 400×35	Box 450×40
7	2.50	3.00	W8×48	W8×48	Box 450×35	Box 500×40
6	3.00	4.00	W8×67	W10×77	Box 450×45	Box 500×50
5	3.00	4.00	W8×67	W8×67	Box 550×35	Box 550×50
4	4.00	5.00	W10×77	W10×88	Box 550×40	Box 550×55
3	4.00	5.00	W8×67	W10×77	Box 550×45	Box 600×50
2	4.00	5.00	W8×67	W10×77	Box 550×45	Box 600×50
1	4.00	5.00	W8×67	W10×88	Box 550×45	Box 600×50

منحنی‌های بارافزون به دست آمده از تحلیل سازه‌های جدید به همراه منحنی بارافزون متناظر مربوط به حالت RD در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. برای سازه ۴ طبقه، طراحی DG-RD سبب افت ظرفیت باربری سازه به مقداری کمتر از مقدار مطلوب تعیین شده بر اساس آیین‌نامه شده است. لیکن در طراحی DG-RU، سازه ظرفیت باربری مناسبی داشته و مقدار اضافه مقاومت سازه در این حالت طراحی برابر با ۲,۳۳ و بزرگتر از مقدار آیین‌نامه‌ای ($\Omega_0 = 2$) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این حالت طراحی، ضخامت ورق طبقات دوم تا چهارم و مقطع ستون در کلیه طبقات مشابه حالت RD بوده و لذا تامین ظرفیت باربری مطلوب توسط سازه دور از انتظار نمی‌باشد. با افزایش تعداد طبقات سازه، میزان افت ظرفیت باربری افزایش می‌یابد، بگونه‌ایکه مقدار اضافه مقاومت سازه ۱۰ طبقه در حالت طراحی DG-RU برابر با ۱,۷۳ می‌باشد.



شکل ۷: منحنی‌های بارافزون - سازه ۴ طبقه



شکل ۸: منحنی‌های بارافزون- سازه ۱۰ طبقه

در مثال طراحی ارائه شده در مرجع [۸]، طراحی اولیه ستون‌ها صرفاً بر اساس معیار سختی انجام گرفته است. این معیار تنها در طبقات بالایی کنترل کننده بوده و با افزایش تعداد طبقات سازه، به خصوص در طبقات پایینی مقدار نیازهای طراحی بر اساس معیار مقاومت فاصله بیشتری با معیار سختی پیدا می‌کند. لذا طراحی ستون‌ها بر اساس معیار سختی، مقاطع به مراتب کوچکتری در مقایسه با معیار مقاومت نتیجه می‌دهد. کوچکتر بودن مقاطع ستون به معنای جذب برش کمتر توسط قاب و افزایش سهم برش ورق می‌باشد. در نتیجه در مرحله بازبینی طراحی، ضخامت بزرگتری برای ورق تعیین شده و به تبع آن مقاطع بزرگتری نیز برای اعضای مرزی نتیجه می‌شود. در حالیکه مطابق روش این مقاله، طراحی اعضای مرزی با کنترل هر دو معیار سختی و مقاومت انجام گیرد، به دلیل بزرگ بودن مقاطع ستون‌ها، بخش قابل توجهی از برش طبقه توسط ستون‌ها جذب شده و با کاهش سهم برشی ورق، ضخامت به مراتب کوچکتری از ضخامت اولیه برای ورق‌ها و به تبع آن مقاطع کوچکتری برای اعضای مرزی نتیجه می‌شود. به این دلیل افت ظرفیت باربری سازه در مقایسه با طراحی اولیه قابل توجه می‌باشد. از طرف دیگر مطابق توضیحات ارائه شده در مثال مذکور در مرجع [۸]، پس از بازبینی طراحی سازه لازم است سیستم مجدداً به منظور محاسبه سهم باربری ورق و اعضای مرزی تحلیل شده و در صورت اختلاف قابل توجه با مقادیر سهم برش اولیه، طراحی سازه بر اساس مقادیر جدید بازبینی شود. این فرایند تا حصول همگرایی تکرار خواهد شد.

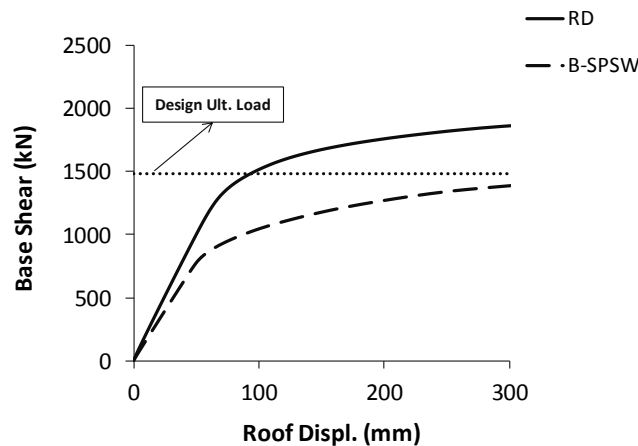
با توجه به نتایج به دست آمده و توضیحات فوق، روش ارائه شده در مرجع [۸] یک روش کاملاً تقریبی، وقت گیر و غیرکاربردی به خصوص در طراحی سازه‌های بلند بوده و نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد.

۵- تغییر ضخامت ورق در زمان اجرای سازه

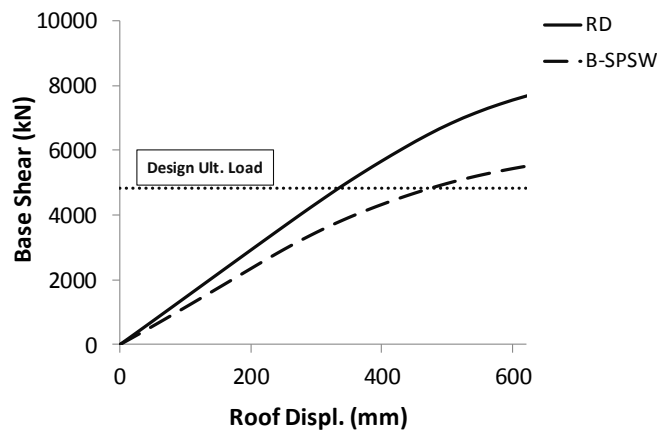
مشابه شرایط زمان طراحی سازه، ممکن است در زمان اجرای سازه نیز ضخامت ورق طراحی شده در بازار موجود نباشد. در این وضعیت مجدداً نیاز به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب ضخامت بزرگتر یا کوچکتر از ضخامت طراحی است. در زمان اجرا، به دلیل عدم امکان تغییر اعضای مرزی، استفاده از ضخامت ورق بزرگتر با توجه به الزامات "طراحی بر اساس ظرفیت" مجاز نمی‌باشد. نتایج بررسی‌های انجام شده در مرجع [۱۵] نشان می‌دهد که در صورت استفاده از ضخامت ورق بزرگتر بدون تغییر اعضای مرزی به خصوص در سازه‌های کوتاه مرتبه، امکان تشکیل زودرس مفصل پلاستیک در پای ستون‌ها پیش از تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها وجود داشته و لذا مکانیزم خرابی سازه به

صورت نامطلوب می‌گردد. این مسئله از طرفی سبب کاهش شکل‌پذیری و جذب انرژی سازه خواهد شد. البته با افزایش ارتفاع سازه، به دلیل وجود ظرفیت مقاومتی بالاتر در اعضای مرزی، امکان تشکیل مکانیزم خرابی نامطلوب در سازه کاهش می‌یابد. به منظور مطالعه رفتار سازه در حالت استفاده از ضخامت ورق‌های کوچکتر از مقادیر طراحی، در سازه‌های ۴ و ۱۳ طبقه طراحی شده در حالت RD، با حفظ اعضای مرزی، ضخامت ورق طبقات تقلیل داده شد. ضخامت ورق در طبقات اول و دوم سازه ۴ طبقه، ۱٫۵ میلی‌متر و در طبقات سوم و چهارم، ۱ میلی‌متر لحاظ گردید. در سازه ۱۳ طبقه، برای طبقات اول تا ششم، ضخامت ورق ۵ میلی‌متر، طبقات هفتم و هشتم، ضخامت ورق ۴ میلی‌متر و در طبقات نهم تا سیزدهم، ضخامت ورق به ترتیب برابر ۳، ۲٫۵، ۲، ۱٫۵، و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. منحنی‌های بارافزون به دست آمده از تحلیل سازه‌های جدید که به صورت B-SPSW نامیده می‌شوند به همراه منحنی‌های متناظر در حالت RD، در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای سازه ۴ طبقه و سازه ۱۳ طبقه، نشان داده شده است. برای سازه ۴ طبقه، کاهش ضخامت ورق سبب افت ظرفیت باربری به مقداری کمتر از حد تعیین شده توسط آئین‌نامه می‌شود. با افزایش ارتفاع سازه و به دلیل وجود ظرفیت مقاومتی بالاتر در اعضای مرزی، کاهش ضخامت ورق اثر کمتری بر ظرفیت باربری داشته و سازه ۱۳ طبقه همچنان قادر به تامین مقاومت مورد نظر آئین‌نامه می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، کاهش ضخامت ورق در سازه‌های کوتاه‌مرتبه می‌بایست به کمترین مقدار ممکن انجام گیرد. لیکن با افزایش ارتفاع سازه، امکان کاهش بیشتر ضخامت ورق‌ها وجود داشته و اثر نامطلوبی بر ظرفیت باربری سازه نخواهد داشت.



شکل ۹: منحنی‌های بارافزون - سازه ۴ طبقه



شکل ۱۰: منحنی‌های بارافزون- سازه ۱۳ طبقه

۶- نتیجه‌گیری

- در طراحی ورق سیستم دیوار برشی فولادی، بر خلاف روند طراحی معمول تیر و ستون که مقطع طراحی بزرگتر از حد نیاز انتخاب می‌گردد، انتخاب ضخامت ورق کوچکتر از مقادیر تئوری مطلوب بوده و در عین حفظ رفتار مطلوب سازه، سبب کاهش مقاطع اعضای مرزی، سبک‌تر شدن سازه، صرفه‌جویی در مصرف فولاد و اقتصادی شدن طرح می‌گردد.
- روش ارائه شده در دستورالعمل *Steel Design Guide 20* مبنی بر بازبینی طراحی سازه دیوار برشی فولادی بر اساس سهم محاسبه شده برای ورق و قاب از برش طبقه، روشی کاملاً تقریبی و وقت‌گیر بوده و نتایج قابل قبولی خصوصاً برای طراحی سازه‌های بلند ارائه نمی‌دهد، لذا استفاده از آن جز در سازه‌های کوتاه مرتبه پیشنهاد نمی‌شود.
- با فرض ثابت ماندن مقاطع اعضای مرزی، اثر کاهش ضخامت ورق در سازه‌های کوتاه مرتبه قابل توجه بوده و لذا در مرحله اجرای سازه دیوار برشی فولادی، در صورت موجود نبودن ضخامت ورق طراحی، کاهش ضخامت ورق در سازه‌های کوتاه مرتبه می‌بایست به کمترین مقدار ممکن انجام گیرد. با افزایش ارتفاع سازه، امکان کاهش بیشتر ضخامت ورق‌ها وجود داشته و اثر نامطلوبی بر ظرفیت باربری سازه ایجاد نمی‌شود.

مراجع

- [1] Driver, R.G., Kulak, G.L., Laurie Kennedy, D.J. and Elwi, A.E., "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls", *Structural Engineering Report No. 215*, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, 1997.
- [2] Lubell, A.S., Prion, H.G.L. and Ventura, C.E., "Unstiffened Steel Plate Shear Wall Performance under Cyclic Loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, 2000, PP 453-460.
- [3] Astaneh-Asl, A., "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", *Steel Tips*, *Structural Steel Educational Council*, Technical Information and Product Service, 2001.
- [4] Kulak, G.L., Laurie Kennedy, D. J., Driver, R.G. and Medhekar, M., "Behavior and Design of Steel Plate Shear Walls", *American Institute of Steel Construction*, 2003.
- [5] Behbahanifard, M.R., Grondin, G.Y. and Elwi, A.E., "Experimental and Numerical Investigation of Steel Plate Shear Wall", *Structural Engineering Report No. 254*, 2003.

- [6] Park, H.G., Kwack, J.H., Jeon, S.W., Kim, W.K. and Choi, I.R., "Framed Steel Plate Wall Behavior under Cyclic Lateral Loading", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 3, 2007, PP 378-388.
- [7] Choi, I.R., Park, H.G., "Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear-Dominated Steel Plate Walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 134, No. 9, 2008, PP 1495-1507.
- [8] American Institute of Steel Construction, Steel Design Guide 20, AISC-820, 2007.
- [9] American Institute of Steel Construction, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC-341, 2010.
- [10] American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE-7, 2010.
- [11] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, AISC-360, 2010.
- [12] ABAQUS theory manual, Version 6.10-1, Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc., (HKS).
- [13] Habashi, H.R., Alinia, M.M., "Characteristics of the Wall-Frame Interaction in Steel Plate Shear Walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, 2010, PP 150-158.
- [14] Driver, R.G., Kulak, G.L., Laurie Kennedy, D.J. and Elwi, A.E., "Cyclic Test of Four-Story Steel Plate Shear Wall", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 2, 1998, PP 112-120.

[۱۵] بدوحي، ب.، "طراحی دیوار برشی فولادی با توجه به سهم باربری ستون‌ها از برش طبقه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.