



مطالعه پارامترهای موثر بر منحنی لنگر- دوران و تعیین میزان صلبیت اتصالات با مقطع کاهش یافته تیر (RBS)

مر ترضی نقی پور^۱، حمید محمدی^۲

۱ و ۲- دانشکده عمران، دانشگاه مازندران

M-naghi@nit.ac.ir

خلاصه

اتصالات تیر با مقطع کاهش یافته، یکی از جدیدترین اتصالات خمشی بعد از زلزله نرتریج می باشد، که در آن قسمتی از بال تیر بریده می شود. مدل سازی رفتار واقعی اتصالات خمشی، به رفتار دورانی اتصالات تحت بارهای وارده وابسته است، به این منظور در این مقاله اثر پارامترهایی نظیر ضخامت بال و جان تیر و ستون، نرخ کاهش بال، فاصله ناحیه کاهش یافته بال تیر از بر ستون، طول ناحیه کاهش یافته بال تیر و سخت کننده های جان ستون بر روی منحنی لنگر- دوران مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: اتصال RBS، منحنی لنگر- دوران، روش اجزاء محدود، قاب خمشی

مقدمه

در دهه ۱۹۶۰ مهندسی سازه بر این باور بودند که سیستم قاب‌های مقاوم خمشی فولادی با اتصالات جوشی، (Steel Moment Resisting Frame) در رده یکی از شکل پذیرترین سیستم‌های سازه‌ای قرار دارند و در مقابل زلزله‌ها حساس نمی‌باشند و فروریزی در آنها رخ نمی‌دهد و اگر خسارت سازه‌ای رخ دهد، محدود به جاری شدن اعضای قاب بوده و اتصالات آن به صورت الاستیک باقی می‌مانند. با وقوع زلزله نرتریج در ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ بسیاری از ساختمانها که سیستم سازه ای آنها از قاب مقاوم خمشی فولادی بود، دچار شکست ترد در ناحیه اتصال تیر به ستون شدند. ساختمانهای مذکور ارتفاعی بین ۱ تا ۲۶ طبقه و عمری حداکثر تا ۳۰ سال داشتند. حتی ساختمانهایی که در زمان زلزله در حال احداث بودند نیز دچار اینگونه خسارات شده بودند [۱]. بعد از زلزله نرتریج، در سپتامبر ۱۹۹۴ گروه ویژه ای به نام SAC و FEMA وظیفه بررسی علل خسارت و پیشنهاد راه‌حلی برای بهبود رفتار اتصالات را برعهده گرفتند. یکی از نتایج بررسی ها، پیشنهاد اتصال تیر با مقطع کاهش یافته (Reduced Beam Section) می باشد. در این اتصال با کاهش سطح مقطع بال تیر در نزدیکی اتصال تیر به ستون، مقطع بحرانی از مجاورت ستون به محل مقطع کاهش یافته منتقل می شود که در نتیجه این کاهش مقطع، میزان تنشها و کرنشهای بر ستون کاسته می‌شود و کاهش سطح مقطع به صورت یک فیوز محافظ عمل می کند.

آسیبهای ایجاد شده در اتصالات گیردار زلزله نرتریج و علل آن

آسیب‌های وارده به المانهای قاب‌های خمشی فولادی بصورت آسیب‌های مربوط به تیر، ستون، جوش، ورق اتصال و چشمه اتصال طبقه بندی می‌شوند، که مشاهده وسیع اینگونه آسیب‌ها در اتصالات علیرغم آسیب‌های جدی در اجزای غیر سازه‌ای هشدار دهنده بود، که چند مورد از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

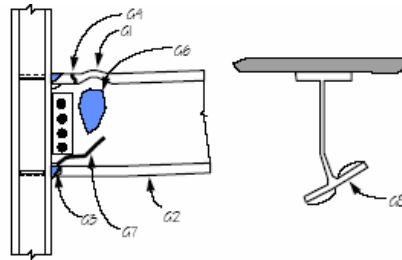
^۱ دانشیار

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد



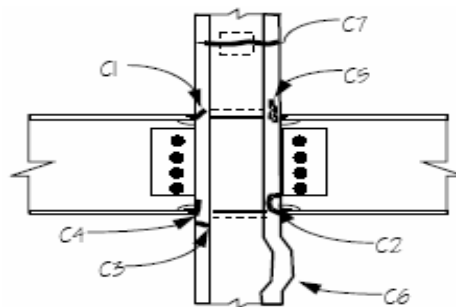
• آسیبهای تیر و ستون

آسیب‌دیدگی تیر ممکن است شامل کمانش بال (G1)، تسلیم بال (G2)، شکست بال در ناحیه (HAZ) Heat Affected zone و یا خارج از آن (G3, G4)، شکست بال (G5)، تسلیم یا کمانش جان (G6)، شکست جان (G7) و یا کمانش جانبی مقطع تیر (G8) باشد، که موارد فوق در (شکل ۱) دیده می‌شوند [۲]. با وجود اینکه تعدادی از آسیب‌های مربوط به تیر در بال فوقانی گزارش شده‌اند، ولی اغلب آسیب‌های تیر در زلزله نرتریج در ریشه جوش شیاری بال تحتانی تیر به ستون اتفاق افتاده و در مسیرهای متفاوتی انتشار یافتند [۳].



شکل ۱- انواع آسیبهای تیر

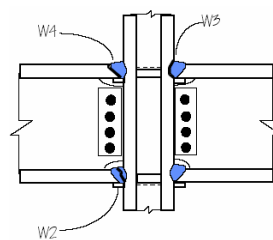
آسیب‌های گزارش شده در ستون علاوه بر اینکه مقاومت سازه را در برابر بارهای ثقلی کاهش می‌دهد، سازه را در تحمل بارهای جانبی ضعیف می‌کند. آسیب‌های ستون شامل ترک بال (C1)، قلوه‌کن شدن بال (C2)، ترک در داخل یا خارج از ناحیه HAZ (C3, C4)، پارگی لایه‌ای بال (C5)، کمانش بال (C6) و زوال وصله ستون (C7) در (شکل ۲) نشان داده شده است [۲].



شکل ۲- انواع آسیبهای ستون

• آسیب‌های مربوط به جوش شیاری و چشمه اتصال

آسیب‌های جوش شامل قطع شدگی و نقص در ریشه جوش (W1)، ترک در ریشه جوش (W2)، شکست در وجه ستون (W3)، شکست در وجه تیر (W4) و علائم قابل پیش‌بینی با آزمایش اولتراسونیک (UT) می‌باشند، که در (شکل ۳) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مراحل مختلف جوشکاری در فرآیند جوش بسیار مؤثر می‌باشند. در اغلب حالات شروع شکست ترد، در ناحیه جوش نفوذی کامل، که بال پایین تیر را به بال ستون متصل می‌کرد، اتفاق افتاده بود و بعد از تشکیل ترک در این ناحیه، با توجه به شرایط اتصال، در چند جهت پیشرفت می‌کرد.



شکل ۳- انواع آسیبهای جوش



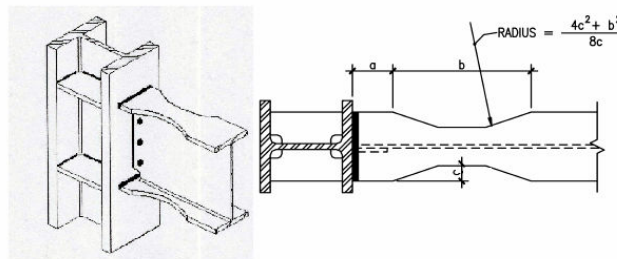
آسیب‌های مربوط به چشمه اتصال عبارتند از: شکست، کماتش یا تسلیم ورق پیوستگی، شکست جوش ورق پیوستگی، تسلیم جان، شکست جوش ورق تقویتی جان، شکست جزیی عمقی ورق تقویتی جان، شکست جزیی عمقی جان، شکست کامل یا نزدیک به کامل جان یا ورق تقویتی جان، کماتش جان ستون در ناحیه چشمه اتصال و انفصال ستون.

● **علل وقوع شکست در اتصالات خمشی رایج، قبل از زلزله نرتیج**

- (۱) هندسه و ترکیب اتصال خود عاملی در جهت تولید اشکالاتی در ریشه جوش نفوذی بال بود. از جمله آنها می‌توان به وجود تسمه پشت‌بند اشاره کرد، که بعد از جوشکاری در محل باقی می‌ماند و بررسی چشمی ریشه جوش نفوذی را غیر ممکن می‌ساخت.
- (۲) وجود تمرکز تنش در ناحیه مجاور جوش شیاری اتصال
- (۳) محدود شدن شدید تغییر شکل‌ها در اتصال بعلت جوش شیاری بال تیر به ستون منجر به ایجاد تنش‌های کششی سه محوری در اتصال می‌گردد که از رفتار شکل‌پذیر اتصال جلوگیری می‌نماید.
- (۴) رعایت نکردن ضابطه تیر ضعیف- ستون قوی
- (۵) ضعیف بودن چشمه اتصال ستون.

اتصال تیر با مقطع کاهش یافته RBS

در این اتصال قسمتی از بالهای تیر در فاصله‌ای مشخص از بر ستون، به اشکال مختلف بریده می‌شوند (شکل ۴). با کاهش در سطح مقطع تیر، ظرفیت خمشی تیر در محل سطح مقطع کاهش یافته تقلیل می‌یابد، و وقتی قاب خمشی تحت بارهای لرزه‌ای شدید قرار می‌گیرد، مفصل پلاستیک در محل سطح مقطع کاهش یافته تشکیل میشود.



شکل ۴- اتصال مقاوم خمشی با برش دایره ای

شکل، اندازه و برش RBS، می‌تواند در رفتار و کارایی اتصال تاثیر بگذارد. بر اساس FEMA350 داریم:

$$a = (0.5 \text{ to } 0.75) b_{fb} \tag{1}$$

$$b = (0.65 \text{ to } 0.85) d_b \tag{2}$$

$$c \leq 0.25 b_{fb} \tag{3}$$

که در آن b_f عرض بال تیر و d_b عمق ستون می‌باشد. طراحی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته در مرجع [۱] ذکر شده است. به منظور شناخت اتصال تیر با مقطع کاهش یافته محوریت هدف این تحقیق در راستای شناخت رفتار دورانی این اتصال قرار گرفته است. کلیه عوامل و پارامترهایی را که می‌توانند مؤثر باشند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. این پارامترها شامل ضخامت بال و جان تیر، ضخامت بال و جان ستون، نرخ کاهش بال، فاصله ناحیه کاهش یافته بال تیر از بر ستون، طول ناحیه کاهش یافته بال تیر و سخت کننده های جان ستون می‌باشد.

مدلسازی

● **مشخصات اتصالات مورد مطالعه**

مدل مینا که به عنوان مدل یک در نظر گرفته می‌شود، اتصال تیر به ستون با مقطع کاهش یافته است که مقطع ستون آن 21×122 W و مقطع تیر آن 24×94 W می‌باشد. و رفتار دورانی سایر مدل‌ها، با این مدل مقایسه می‌شود. طول تیر برابر ۲ متر و طول ستون برابر ۳ متر در نظر گرفته شده است. مدل

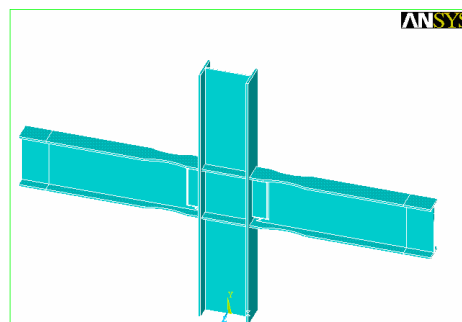


نهایی اتصال به همراه سخت کننده جان ستون در (شکل ۵) دیده می شود. در این مقاله ۱۵ اتصال مورد بررسی قرار می گیرد، که مشخصات آن در (جدول ۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

مدل	تغییر نسبت به مدل مبنا (DB01)
DB02	کاهش ۲۵ درصدی ضخامت بال های تیر
DB03	کاهش ۲۵ درصدی ضخامت جان تیر
DB04	کاهش ۲۵ درصدی ضخامت بال و جان تیر
DB05	افزایش ۲۵ درصدی ضخامت بال تیر
DB06	افزایش ۲۵ درصدی ضخامت جان تیر
DB07	افزایش ۲۵ درصدی ضخامت بال و جان تیر
DB08	کاهش ۲۵ درصدی ضخامت بال های ستون
DB09	کاهش ۲۵ درصدی ضخامت جان ستون
DB10	افزایش ۲۵ درصدی ضخامت بال ستون
DB11	افزایش ۲۵ درصدی ضخامت جان ستون
DB12	استفاده از سخت کننده های جان ستون
DB13	استفاده از تیر بدون مقطع کاهش یافته با سخت کننده
DB14	استفاده از حد اکثر طول ناحیه کاهش یافته بال تیر
DB15	استفاده از حد اقل طول ناحیه کاهش یافته بال تیر

برای مدل‌سازی نمونه ها از نرم افزار ANSYS 5.4 استفاده گردیده است. رفتار نمونه ها با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی مادی و هندسی تحلیل شده است. رفتار غیر خطی مادی سبب کرنشهای پلاستیک می شود. برای مدل‌سازی سه بعدی، المان SOLID 45 انتخاب گردیده است. این المان آجری شکل داری ۸ گره و سه درجه آزادی جابجایی در هر گره می باشد. و همچنین دارای قابلیت مدل‌سازی رفتار پلاستیک گره می باشد. فولاد پروفیل ها ST52 و فلز جوش از الکترودهای رده E70 در نظر گرفته شده است. رفتار فولاد الاستوپلاستیک همراه با سخت شوندگی کرنش می باشد و سطح تسلیم فون میسز برای آن در نظر گرفته شده است. شیب قسمت الاستیک $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و شیب قسمت پلاستیک $E_T = 0.01E$ در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم فولاد $F_y = 3960 \text{ kg/cm}^2$ می باشد. رفتار فلز جوش الاستیک و کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده است. و تنش نهایی آن $F_u = 4900 \text{ kg/cm}^2$ می باشد.



شکل ۵- مدل DB01 به همراه سخت کننده جان ستون

● مشخصات قابهای خمشی مورد مطالعه

از آنجایی که اتصالات RBS سبب کاهش سختی جانبی قابهای فولادی می گردد، پس می تواند تغییر مکانهای های نسبی طبقات را افزایش دهد. لذا مقایسه چهار قاب خمشی ویژه ۳، ۵، ۸ و ۱۲ طبقه با اتصال RBS و اتصالات خمشی رایج، انجام شد. این قابها دارای ۴ دهانه و ارتفاع هر طبقه ۳ متر و عرض دهانه



برابر ۵ متر می باشد. قابهای خمشی مذکور به گونه ای طراحی شده اند، که با وجود اتصالات RBS در قابها، تغییر مکان و دررفت قابها با فرض ضریب رفتار ۱۰ از مقدار مجاز آیین نامه ۲۸۰۰ ایران تجاوز نکند. مشخصات ناحیه کاهش یافته اتصالات RBS به صورت زیر می باشد.

$$a = 0.625b_f, b = 0.75d_b, c = 0.25b_f$$

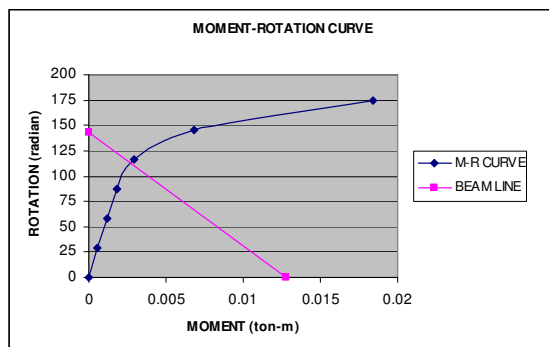
که در آن b_f عرض بال تیر و d_b عمق ستون می باشد.

بررسی رفتار اتصالات و قابهای مدل شده

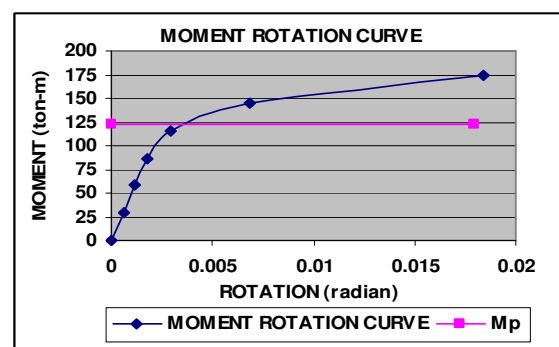
بر اساس میزان انحراف تیر نسبت به ستون که همان تغییر شکل دورانی اتصال است و در اثر لنگر خمشی بوجود می آید، منحنی های لنگر- دوران اتصالات مدل شده در نرم افزار ANSYS، رسم شده اند. شکلهای ۶ و ۷، منحنی های لنگر- دوران را برای اتصال مدل ۱ نشان می دهد و نیز شکل ۸ بعنوان نمونه توزیع تنش های معادل فون میسر را در محل اتصال و اطراف آن در آخرین گام بارگذاری، در مدل مبنا نشان می دهند. در (جدول ۲) مقادیر لنگر گیرداری کامل M_e ، لنگر در نقطه تقاطع خط تیر با منحنی لنگر- دوران M_i و درصد گیرداری R هر یک از مدل ها آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر درصد گیرداری

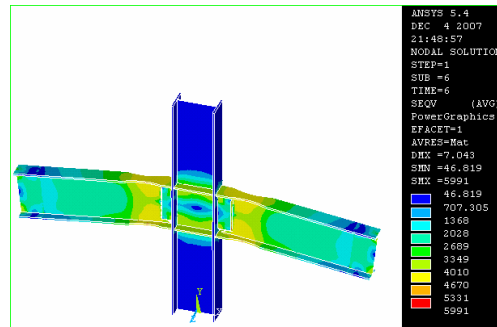
مدل	M_e (ton-m)	M_i (ton-m)	R
DB01	142.5	113	79.3
DB02	113.9	94	82.5
DB03	136.33	109.75	80.5
DB04	107.55	89.8	83.5
DB05	171.32	127.2	74.24
DB06	148.89	116.5	78.25
DB07	177.54	128.8	72.54
DB08	142.5	110	77.19
DB09	142.5	110	77.19
DB10	142.5	116.2	81.54
DB11	142.5	119	83.5
DB12	142.5	130	91.22
DB13	142.5	131	91.93
DB14	142.5	114	80
DB15	142.5	112	78.6



شکل ۷- منحنی لنگر- دوران و خط تیر مدل مبنا



شکل ۶- منحنی لنگر- دوران و لنگر پلاستیک مدل مبنا



شکل ۸- توزیع تنش های معادل فون میسز مدل DB01 به همراه سخت کننده جان ستون

همچنین قابهای معرفی شده تحت بار جانبی زلزله قرار گرفتند. و در جداول ۳ و ۴ مقایسه قاب های با اتصال RBS و بدون اتصال RBS را برای قاب ۵ و ۸ طبقه می توان دید.

جدول ۳- تغییر مکان و دررفت قابهای ۵ طبقه (cm)

		STORY5	STORY4	STORY3	STORY2	STORY1
5MRF	Disp	0.046608	0.039386	0.029952	0.018916	0.007329
	Drift	0.002407	0.003145	0.003678	0.003863	0.002443
5RBS	Disp	0.049042	0.041275	0.031277	0.019675	0.007576
	Drift	0.002589	0.003333	0.003867	0.004033	0.002525
Difference	Disp	5.222279	4.796120	4.423745	4.012476	3.370173
	Drift	7.561280	5.977742	5.138662	4.400725	3.356529

جدول ۴- تغییر مکان و دررفت قابهای ۸ طبقه (cm)

		STORY8	STORY7	STORY6	STORY5	STORY4	STORY3	STORY2	STORY1
8MRF	Disp	0.070721	0.067901	0.063075	0.055323	0.044662	0.032028	0.018668	0.006534
	Drift	0.000940	0.001609	0.002584	0.003553	0.004211	0.004454	0.004045	0.002178
8RBS	Disp	0.074741	0.071627	0.066403	0.058124	0.046833	0.033511	0.019477	0.006787
	Drift	0.001038	0.001741	0.002760	0.003764	0.004441	0.004678	0.004230	0.002262
Difference	Disp	5.684309	5.487401	5.276258	5.062994	4.860956	4.630323	4.333619	3.872054
	Drift	10.42553	8.203853	6.811146	5.938643	5.461886	5.029187	4.573548	3.856749

نتایج

بررسی توزیع تنش های فون میسز نشان می دهد، که وجود کاهش در بال تیر در اتصالات RBS می تواند محل مفصل پلاستیک را از بر ستون به درون مقطع تیر انتقال دهد. همچنین با توجه به (شکل ۶) زمانی که تیر به لنگر پلاستیک رسیده است، منحنی لنگر- دوران در ناحیه خطی می ماند. بررسی منحنی های لنگر- دوران نشان دادند، که تغییر ضخامت بال تیر و سخت کننده جان ستون در صلبیت اتصال RBS موثرتر از عوامل دیگر می باشد. همچنین فاصله ناحیه کاهش یافته بال تیر از بر ستون و طول ناحیه کاهش یافته بال تیر تاثیر ناچیزی بر روی صلبیت اتصال دارد.

بررسی قاب های خمشی با اتصال RBS نشان می دهد که با افزایش ارتفاع قابها، برکاهش سختی جانبی افزوده می شود. همچنین اگر سطح مقطع بال تیر به میزان ۵۰ درصد کاهش پیدا کند، میانگین دررفت های طبقات ۶/۲۵ درصد افزایش می یابد.



مراجع

- [1] Federal Emergency Management Agency (FEMA)., “Recommended seismic design criteria for new steel moment- frame buildings”, Reports FEMA 350, Washington, D.C. June, 2000.
- [2] Federal Emergency Management Agency (FEMA)., “Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment- frame buildings”, Reports FEMA 351, Washington, D.C. June, 2000.
- [3] Bertero, V.V, “Performance- based seismic engineering: a critical review of proposed guidelines”, In: Fajfar, P, Krawinkler, H, Seismic design methodologies for the next generation of codes, Rotterdam: AA Balkema, PP 1-31, 1997.