



ارزیابی آزمایشگاهی رفتار اتصالات گیردار جوشی تیر به ستون در سازه‌های متداول

محمد سهیل قبادی^۱، علی مزروعی^۲ و مهدی قاسمیه^۳

چکیده

اهمیت زیاد اتصالات گیردار جوشی در قابهای خمشی، سبب توجه محققین به جزئیات جوشکاری شده است. در این مقاله ۳۲ نمونه راهنما که بیانگر مدل ساده شده اتصال گیردار هستند آزمایش شده است. در این تحقیق آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت اتصالات، مقاومت جوش نفوذ کامل اجرا شده به روشهای مختلف، مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه دو طرفه، مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه یک طرفه، تاثیر میزان شدت جریان (آمپر) بر کیفیت جوش مطالعه گردیده است. همچنین جهت مقاومسازی اتصالات، تاثیر سخت کننده لچکی، تاثیر سخت کننده تی شکل، تاثیر چقرمگی الکتروود در کیفیت جوش ایجاد شده و تاثیر سنگزنی و جوشکاری مجدد مطالعه گردیده است. بیشترین مقاومت از آزمایش جوش نفوذ کامل با ورق پشت بند مشاهده شده است. مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه یک طرفه و دو طرفه بررسی گردیده است. میزان افزایش مقاومت اتصال توسط سخت کننده‌ها ارائه گشته است. در مورد چقرمگی الکتروود، جوشکاری مجدد و شدت جریان (آمپر) توصیه اجرایی ارائه شده است.

کلمات کلیدی:

اتصال گیردار جوشی، جوشه گوشه یک طرفه، جوشه گوشه دو طرفه، جوش نفوذ کامل، الکتروود، چقرمگی، سخت کننده

Experimental Investigation of Welded Beam to Column Moment Connection in Existing Structures

Mohammad Soheil Ghobadi, Ali Mazroi, Mehdi Ghasemiyeh

ABSTRACT

The importance of welded connections on the behavior of steel moment resisting frames was the reason of researchers focus on welding details. In this paper result on 32 pilot tests indicate moment connection behavior are presented. In this experimental research, in order to connection strength evaluation, complete joint penetration (cjp) weld strength with different welding procedure, double side fillet weld out of plane strength, one side fillet weld out of plane strength and amperage intensity effect on welding quality, have been studied. Also in order to connection rehabilitation, rib stiffener effect on connection strength, T-stiffener effect on connection strength, electrode toughness effect on welding quality and grinding and rewelding effect on welding quality have been studied. Maximum strength of cjp weld is observed in welding with backing. Out of plane strength of double side and on side fillet weld have been determined. Connection strength increase amount with stiffener strengthening of connection have been proposed. It has also been proposed constructional recommendations about electrode toughness, rewelding and amperage intensity.

Key words:

Welded Moment Connection, Double Side fillet Weld, One Side Fillet Weld, Complete Joint Penetration Weld, Electrode, Toughness, Stiffener

۱. دکتری عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران msghobad@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی و مدیر بخش سازه، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن amazroi@yahoo.com

۳. استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران mghassem@ut.ac.ir

قابهای خمشی اغلب در ساختمانهای کوتاه مرتبه و میان مرتبه استفاده می‌گردند. این سیستم‌ها به تنهایی و یا به صورت ترکیب با سیستم دیگر وظیفه باربری جانبی را به عهده دارند. بعد از گسیختگی تعداد زیادی از اتصالات گیردار در زلزله نورتریج ۱۹۹۴ آمریکا تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار نامناسب اتصالات انجام گشت و علت رفتار نامناسب و نحوه مقاوم‌سازی آن ارائه گردید [۱]. بر اساس این تحقیقات علت کلی شکست در اتصالات جوشی عبارتند از:

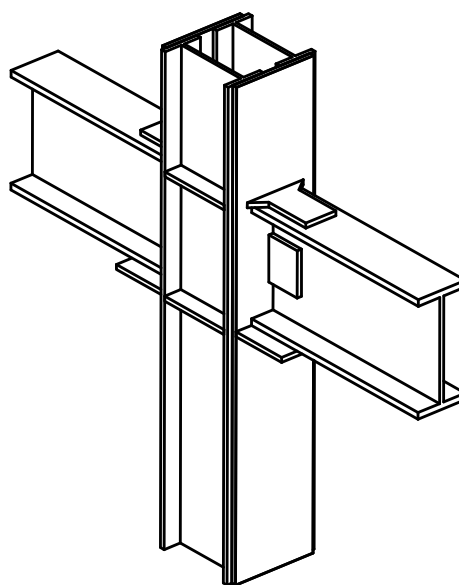
الف - عیبهای بوجود آمده در جوش به علت عدم جوشکاری مناسب (نفوذ ناقص فلز جوش، وجود ترک در ریشه جوش)

ب - جزئیات نامناسب اتصالات (ایجاد تمرکز تنش در ریشه جوش)

ج - الکتروود نامناسب (الکتروود با چقرمگی کم)

د - وارد شدن انرژی لرزه‌ای بیش از حد انتظار به سازه (زلزله‌های میدان نزدیک)

اتصالات گیردار اجرا شده در ایران توسط ورق تقویتی بالاسری و زیرسری انجام می‌گردد و تیر مستقیماً به ستون متصل نمی‌گردد. این ورقها توسط جوش نفوذ کامل به بال ستون متصل می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): نمای سه بعدی اتصالات رایج در ایران

این نوع اتصالات برای اجرا، در اغلب کارگاهها قابل استفاده می‌باشند. براساس آیین نامه اتصالات فولادی [۲] ورق بالاسری و زیرسری باید با جوش شیاری نفوذ کامل به ستون متصل شوند، ولی در بعضی از کارگاهها ورق زیرسری روی زمین توسط جوش گوشه دو طرفه و ورق بالاسری هنگام نصب توسط جوش گوشه یک طرفه به ستون متصل می‌شوند. با توجه به اینکه این جوشها عضو حساس باربری اتصال در هنگام زلزله هستند، بررسی رفتار و مقاومت آنها در سازه‌های موجود الزامی است. تکیه بر مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه در آیین نامه جوشکاری ایران [۳] مجاز نیست و مشخص نشده است و مهندسین برای ارزیابی مقاومت اتصالات در سازه‌های موجود مرجعی ندارند. برای مقاوم سازی این اتصالات معمولاً از سخت‌کننده‌های مثلثی شکل (لچکی) روی ورق بالاسری، یا سخت‌کننده‌های تی شکل در کنار اتصال و بهبود کیفیت جوش استفاده می‌شود [۴ و ۵]. با توجه به عدم کیفیت مناسب بسیاری از این گونه اتصالات در این مقاله سعی می‌شود مقاومت جوشهای مختلف با جوش درزهای گوناگون و روشهای مقاوم سازی اتصالات گیردار رایج مورد مطالعه قرار گیرد. پس از بررسی‌های انجام شده، جهت مرتفع نمودن ضعف‌های اتصالات گیردار رایج، دستورالعمل اجرایی برای آن ارائه می‌شود.

۱-۱- مرور بر ادبیات فنی

Stratan و Dubina [۶] ۵۴ نمونه اتصال تی شکل (T) جهت بررسی رفتار آزمایشگاهی ساختند. در این نمونه‌ها، قسمتی از بال کششی تیر و بال ستون در نظر گرفته شده بود و در حقیقت قسمتی از اتصال گیردار مدلسازی شده بود. پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از: نوع جوش (گوشه، نیم جناغی یک طرفه، نیم جناغی دوطرفه)، نوع فولاد، نرخ کرنش ($\dot{\epsilon} = 0.0001, 0.035, 0.06 \text{ S}^{-1}$) و نوع بارگذاری (یکنواخت و چرخه‌ای). از این مطالعه، آنها نتیجه‌گیری کردند، کیفیت جوشکاری مهمترین پارامتر در اتصالات

جوشی می‌باشد. بهترین رفتار در جوش درز نیم جناغی دوطرفه ملاحظه گردید. گسیختگی در جوش نیم جناغی یکطرفه همیشه با شروع ترک از ریشه جوش آغاز می‌شود و این حالت نامطلوب در گسیختگی محسوب می‌شود. افزایش نرخ کرنش باعث افزایش تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد می‌شود ولی شکل پذیری را کاهش می‌دهد. مشکل جوش گوشه خارج از اندازه بودن بعضی نقاط آن در طول خط جوش است، که کنترل آن نیز مشکل می‌باشد و گسیختگی از همان نقاط آغاز می‌گردد. بارگذاری چرخه‌ای احتمال شکست جوش را افزایش می‌دهد. در این مطالعات جوشهای گوشه به علت خارج از اندازه بودن و جوشهای نفوذی به علت نفوذ ناقص ریشه رفتار ضعیفتری را در بارگذاری چرخه‌ای نسبت به بارگذاری یکنواخت داشتند.

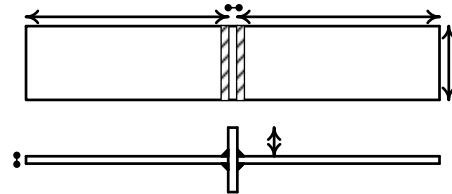
Cheng- chih et al. [۷] شش آزمایش تمام مقیاس روی اتصالات گیردار مستقیم تیر به ستون جعبه‌ای انجام دادند. آنها معتقدند که رفتار ستونهای جعبه‌ای با ستونهای H شکل تفاوت عمده‌ای دارد. به همین خاطر ابتدا یک نمونه اتصال بدون تقویت ساختند و این موضوع را اثبات کردند. سپس با روشهای عددی نقاط ضعف اتصال را تشخیص داده و طرح تقویت برای آن ارائه داده اند و پنج نمونه بعدی را آزمایش کردند. برای تقویت از سخت‌کننده‌های تی شکل در کنار بال تیر استفاده شده بود. نمونه ها T شکل بودند و بارگذاری چرخه‌ای انجام شده بود. پارترهای مورد مطالعه در این تحقیق نوع پشت بند در جوش نفوذ کامل (سرامیک، فولاد، فولادی همراه جوش گوشه) و اندازه سخت‌کننده تقویت کننده اتصال (تغییر در طول و ضخامت و ارتفاع سخت‌کننده) بوده است. آنها از این آزمایشها نتیجه گیری کردند که، در اتصالات گیردار با ستون جعبه‌ای، تمرکز تنش در لبه‌های جوش نفوذ کامل بوجود می‌آید ولی در ستون H شکل در وسط جوش بوجود می‌آید. گسیختگی این اتصالات در قسمت جوشهای نفوذ کامل لبه ها و محل سوراخ دسترسی جوش اتفاق می‌افتد. قرار دادن سخت‌کننده

باعث بهبود چشمگیر رفتار هیستریزس اتصال می‌گردد و مانع از ترک خوردگی ترد جوش اتصال می‌شود. مزروعی و همکاران [۸] هفت نمونه اتصال گیردار با استفاده از ستونهای مرکب دویل I شکل آزمایش کردند. در این نمونه مقطع تیرها دویل IPE و ستونها دویل IPE فاصله‌دار (پاباز) تقویت شده با ورق سراسری بوده است. نمونه‌های آزمایش شده به شکل صلیب و دارای مقیاس واقعی بوده‌اند. در این آزمایشها بارگذاری یکنواخت انجام شده است. بار در انتهای ستون وارد شده و تکیه‌گاهها در انتهای تیرها قرار گرفته بودند. جوشکاری نمونه ها با الکترودهای معمولی و شرایط متعارف کارگاهی انجام گشته بود. این مطالعات اثر ورق پیوستگی، جوش کام ورق پوشش ستون به بال نیمرخهای IPE و اثر ورق سخت‌کننده مثلثی شکل جهت تقویت اتصال بررسی شده است. آنها نتیجه گیری کردند، درصد گیرداری اتصال معمولی ۵۰٪ (نیمه‌گیردار) می باشد و در صورت اتصال ورق پوشش سراسری به نیمرخهای IPE توسط جوش کام و استفاده از ورق پیوستگی در محازات بال تیر، اتصال به گیرداری کامل می‌رسد.

۲- برنامه آزمایش

برای اینکه بتوان اکثر مشکلاتی که در هنگام اجرای اتصالات گیردار رایج پیش می‌آید بررسی شود، می‌بایست تعداد نمونه ها به اندازه کافی باشد. بدین منظور ۳۲ آزمایش راهنما، که نمایانگر رفتار اتصالات تمام مقیاس در بال کششی تیر است طراحی گردید. در این نمونه ها (شکل ۲) ورق سمت راست به عنوان بال کششی تیر، ورق عمودی مدل بال ستون و ورق سمت چپ به عنوان مدل ورق پیوستگی تلقی می‌گردد. در نمونه‌های مختلف روش جوشکاری ورق‌های سمت چپ و راست تفاوت نموده، لیکن هندسه کلی نمونه ها مطابق شکل مذکور می‌باشد. با مشاهده رفتار این نمونه‌ها می‌توان رفتار انواع جوشها را به طور دقیق بررسی کرد. سطح نمونه ها با آهک پوشانده شده تا جاری شدن نقاط مختلف در حین

آزمایش مشخص شود. این نمونه ها داخل فک های دستگاه آزمایش کششی قرار می گیرند. نیرو از نوع کششی است و با سرعت کم و یکنواخت استاتیکی اعمال می شود.



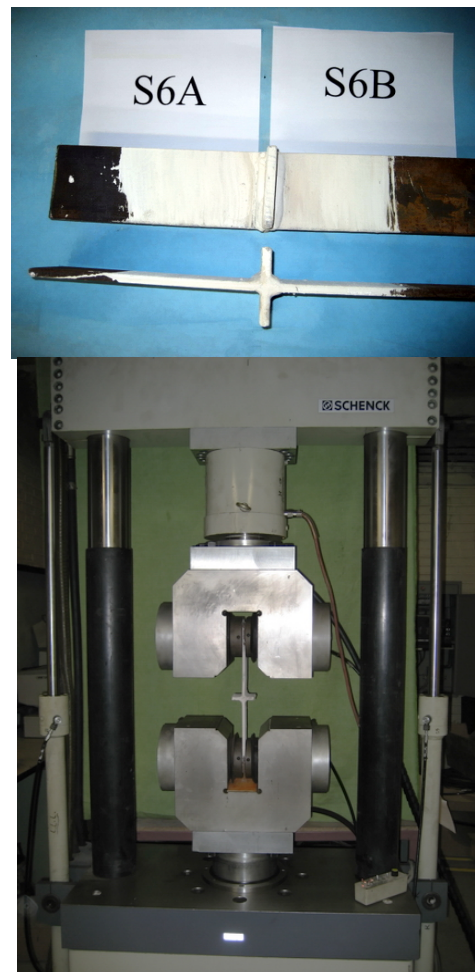
ندیده باشد. فولاد مورد استفاده از نوع ST37-2 بوده و براساس آزمایش کوپان، تنش تسلیم آن 323 MPa و تنش نهایی آن 464 MPa بوده است. برای بریدن ورقها از برش پلاسما استفاده شده تا اثر حرارت باعث ترد شدن لبه ورقها نگردد. قرار گرفتن قطعات تقویت تی شکل و مثلثی (لچکی) هندسه نمونه های سری S4 و S5 را کمی متفاوت از شکل (۱) نموده (شکل ۳). این قطعات برای انتقال تمام نیروی کششی طراحی گشته اند و اضلاع آنها بر حسب طول جوش مورد نیاز و یا طول ورق مورد نیاز بدست آمده اند [۹].



شکل (۳): نمای نمونه های سری S4 و S5

۲-۲- جزئیات ساخت نمونه ها و جوشکاری آنها

در ساختن نمونه ها سعی شده است از الکترودهای قطر ۴ استفاده گردد که در کارگاه ها رایج است. ماشین جوشکاری رکتیفایر بوده است. روش جوشکاری، قوسی دستی با الکترود روکش دار^۱ می باشد. تمام جوشکاری ها



شکل (۲): نمای کلی نمونه ها (اعداد بر حسب Cm) و نحوه انجام آزمایش

۲-۱- معرفی نمونه ها ، هدف از آزمایش آنها

مطابق جدول (۱) نمونه ها و هدف از ساخته شدن آنها ذکر گردیده است. ورق های تهیه شده به صورت تسمه اصلی تهیه شده، تا لبه های آن توسط برشکاری آسیب

1. Shielded Metal Arc Welding

با جریان یکسو (الکترو د قطب مثبت) صورت گرفته است. دو نوع الکترو د برای جوشکاری انتخاب گردیده است. E6013 به عنوان الکترو د معمولی و E7018 به عنوان الکترو د کم هیدروژن و با چقرمگی بالا استفاده گردیده است. الکترو د های کم هیدروژن قبل از مصرف، به مدت

۲ ساعت داخل خشک کن با دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته اند، تا رطوبت خود را از دست دهند [۳]. در تمام آزمایشها میزان شدت جریان (آمپر) ثبت شده [۹] تا بتوان در مورد آن نتیجه گیری نمود.

جدول (۱): نمونه ها و هدف از ساخته شدن آنها

نمونه		جوش		هدف آزمایش، مشاهده:
		چپ	راست	
				
1,2	S1A, S1B	CJP	DFW	مقاومت جوش نفوذی کامل با الکترو د معمولی
3,4	S1C, S1D	CJP	DFW	مقاومت جوش نفوذی کامل با الکترو د معمولی و ورق پشت بند
5,6	S1E, S1F	CJP	DFW	مقاومت جوش نفوذی کامل با الکترو د کم هیدروژن و ورق پشت بند
7,8	S1G, S1H	CJP	DFW	سنگزنی جوش گوشه و جوشکاری مجدد نفوذی کامل با الکترو د معمولی و ورق پشت بند
9,10	S1I, S1J	CJP	DFW	سنگزنی جوش گوشه و جوشکاری مجدد نفوذی کامل با الکترو د کم هیدروژن و ورق پشت بند
11,12,13	S2A, S2B, S2E	DFW	DFW	مقاومت جوش گوشه دوطرفه با الکترو د معمولی
14,15,16	S2C, S2D, S2F	DFW	DFW	مقاومت جوش گوشه دوطرفه با الکترو د کم هیدروژن
17,18	S3A, S3B	CJP	SFW	مقاومت جوش گوشه یک طرفه با الکترو د معمولی
19,20,21,22	S4A, S4B, S4C, S4D	CJP	SFW+RIB Plate	مقاومت جوش گوشه یک طرفه با الکترو د معمولی و تقویت شده با ورق سخت کننده مثلثی (RIB Plate)
23,24	S5A, S5B	T-Stiffener	T-Stiffener	مقاومت قطعه تقویت سخت کننده تی شکل با الکترو د معمولی
25,26	S5C, S5D	T-Stiffener	T-Stiffener	مقاومت قطعه تقویت سخت کننده تی شکل با الکترو د کم هیدروژن
27,28	S6A, S6B	DFW	SFW	مقاومت جوش گوشه یک طرفه با الکترو د کم هیدروژن
29,30	S6C, S6D	DFW	SFW	مقاومت جوش گوشه یک طرفه (بعد جوش حداقل) با الکترو د معمولی
31,32	S6E, S6F	DFW	SFW	مقاومت جوش گوشه یک طرفه (بعد جوش حداقل) با الکترو د کم هیدروژن
CJP = Complete Joint Penetration Weld (جوش شیار نفوذ کامل)				
DFW = Double Fillet Weld (جوش گوشه دوطرفه)				
SFW = Single Fillet Weld (جوش گوشه یک طرفه)				

پیخ زدن نمونه ها برای ایجاد شیار جوش نفوذ کامل، با دستگاه فرز انجام گشته است. منظور از مقاومت عمود بر

صفحه جوش گوشه یک طرفه و دو طرفه در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$F_W = 0.6F_{EXX} (1 + 0.5 \sin^{1.5} \theta) \quad (۱)$$

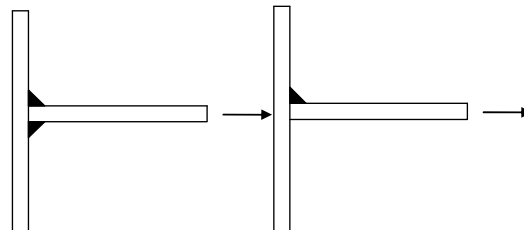
F_{EXX} : تنش کششی نهایی الکترو

θ : زاویه بار وارده نسبت به طول خط جوش

با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲ و حذف ضریب زاویه بارگذاری، به میزان مقاومت آیین نامه جوش ایران [۳] می‌رسیم. آیین‌نامه جوش آمریکا مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه را ۱/۵ برابر مقاومت برشی آن می‌داند، ولی این مقاومت به شرطی در نظر گرفته می‌شود که چند خط جوش زاویه‌دار با هم به کار رفته باشند. به عبارت دیگر برای یک خط جوش گوشه مقاومت عمود بر صفحه مجاز نمی‌داند و علت این مسئله را ظرفیت اعوجاج کم یک خط جوش گوشه تنها می‌داند. البته معادله (۱) به عنوان معیار مقاومت جوش گوشه در سازه‌های موجود می‌تواند استفاده گردد. براساس مطالب مذکور مقاومت واقعی ورق و جوش‌های مختلف محاسبه گشته و در جدول (۲) ارائه گشته است.

۳- مشاهده رفتار نمونه ها و نتایج آزمایشها

برای بررسی و مشاهده نتایج آزمایشها در ابتدا نیاز به مشخص شدن مقاومت ورق، مقاومت جوش نفوذی کامل، مقاومت جوش گوشه یک طرفه و مقاومت جوش گوشه دوطرفه می‌باشد.



شکل (۴): مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه یک

طرفه (راست) و دوطرفه (چپ)

برای محاسبه میزان نیرو، مقاومت‌های واقعی ورق و جوش در نظر گرفته می‌شود. میزان مقاومت ورق و جوش نفوذ کامل از حاصل ضرب سطح مقطع ورق در تنش تسلیم و نهایی مربوطه بدست می‌آید. مقاومت جوش گوشه براساس آیین نامه فولاد و جوش آمریکا [۱۱ و ۱۰] بدون ضریب اطمینان برابر است با:

جدول (۲): مقاومت ورق، جوش گوشه دوطرفه و جوش گوشه یک طرفه در حالت تسلیم و نهایی

Load(KN)		Plate	CJP Weld		Double Fillet Weld (D=7mm)		Single Fillet Weld (D=7mm)		Single Fillet Weld (D=5mm)	
			E6013	E7018	E6013	E7018	E6013	E7018	E6013	E7018
Strength	Yielding	207	230	269	256	299	128	149	92	106
	Ultimate	297	<288	<320	<320	<356	<160	<178	<114	<127

۳-۱- نمونه‌های سری S1

گسیخته شدند.

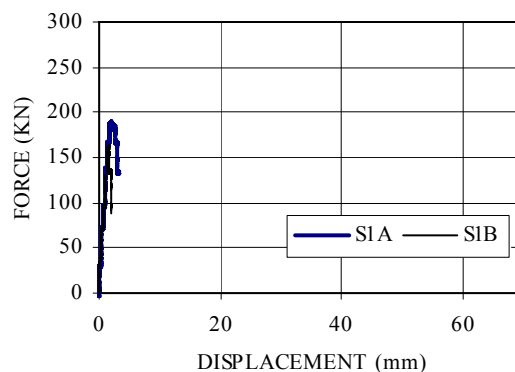
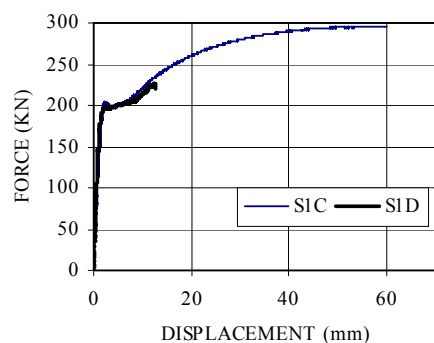


شکل (۵): نفوذ ناقص در جوش نفوذ کامل بدون پشت‌بند

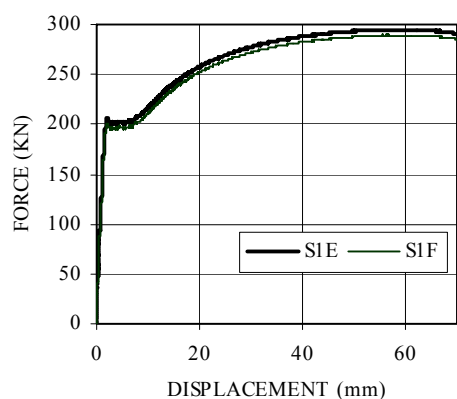
هنگام آزمایش، هر دو نمونه S1A و S1B قبل از جاری شدن ورق در بارهای ارتجاعی از محل جوش نفوذ کامل گسیخته شدند. عدم نفوذ فلز جوش در جوش درز هنگام گسیختگی مشهود می‌باشد (شکل ۵).

ظرفیت باربری جوش نفوذ کامل E6013 برابر 288KN می‌باشد ولی نمونه‌ها در 160~180KN گسیخته شدند (شکل ۶).

در آزمایش نمونه‌های S1C و S1D ورق به صورت گسترده جاری گردید و وارد مرحله سخت شدگی شد. با افزایش مقاومت ورق، جوشها در 295KN و 225KN



شکل (۶): منحنی رفتاری نمونه‌های S1A و S1B



شکل (۷): منحنی رفتاری نمونه‌های S1C ، S1D ، S1E و S1F (بالا) ، گسیختگی شکل پذیر S1E (پایین)

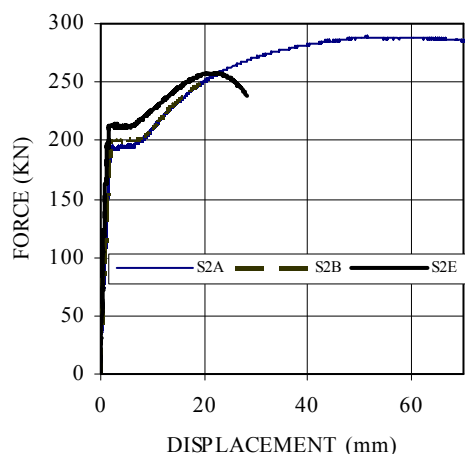
ساختار فولاد حرارت دیده به شکل درشت دانه می‌باشد و در هنگام سنگزنی باید این قسمت برداشته شود (شکل ۹). با توجه به این شکل می‌توان درک نمود که هر میزان حرارت جوشکاری کمتر باشد تغییر ساختار شکل پذیر فولاد کمتر می‌گردد. ساختار درشت دانه فولاد در دماهای ۱۱۰۰ درجه به بالا تشکیل می‌شود [۸]. بنابراین استفاده از دماهای بالا در هنگام جوشکاری سبب تغییر ساختار اساسی فولاد نرمه گشته و شکل پذیری سیستم سازه‌ای را تحت تاثیر جدی قرار می‌دهد.

وجود ورق پشت بند باعث نفوذ کافی فلز جوش در جوش درز شده و سبب افزایش مقاومت اتصال می‌شود. در نمونه S1C جوش به ظرفیت نهایی خود رسیده و گسیخته شده است. ولی در نمونه S1D جوش دارای عیب بوده و قبل از ظرفیت باربری نهایی خود حدوداً ۸۰٪ مقاومت و ۲۰٪ نرمی گسیخته شده است. در آزمایش نمونه‌های S1E و S1F ورق به طور گسترده جاری شده و سپس به تنشهای نهایی خود رسیده و گسیختگی شکل پذیر داشته است (شکل ۷).

در دو نمونه آخر استفاده از الکتروود کم هیدروژن رفتار مناسبی نشان داده است. در هر دو نمونه S1G و S1H جوش نفوذ کامل پس از جاری شدن گسترده ورق در حدود 245KN گسیخته شد. گسیختگی در فلز جوش رخ داده است و حاکی از شکل پذیری کم و وجود ترکهای ریز در بدنه جوش می‌باشد. در نمونه‌های S1I و S1J ورق به صورت گسترده پلاستیک شده و بعد از تغییر مکان‌های قابل توجه و شکل پذیری مناسب گسیختگی در ورق رخ داده است. یعنی هر دو نمونه از نظر جوش نقصی نداشته اند ولی در نمونه S1I به علت سنگ نزدن صحیح جوشکار، قسمت ترد جوش شده قبلی در ورق عمودی باقی مانده و سبب گسیختگی ترد گردیده است. هر دو نمونه بار حدود 295KN را تحمل کرده‌اند (شکل ۸). با توجه به رفتار این نمونه ها ایجاد جوش نفوذ کامل مجدد توسط الکتروود کم هیدروژن روی محل جوش گوشه امکان پذیر است به شرطی که محل ترد شده سنگ زنی شده باشد.

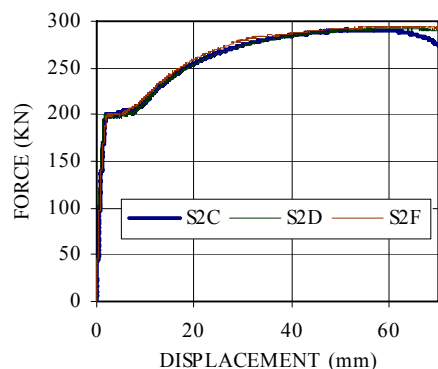


شکل (۹): ساختار درشت دانه فولاد حرارت دیده

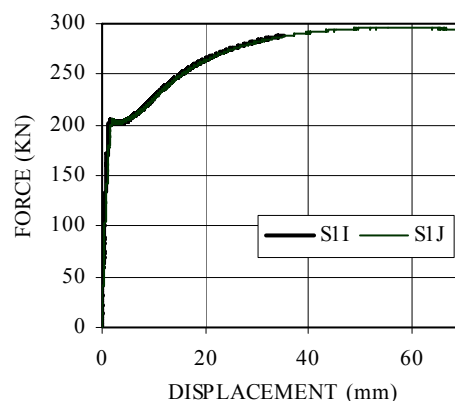
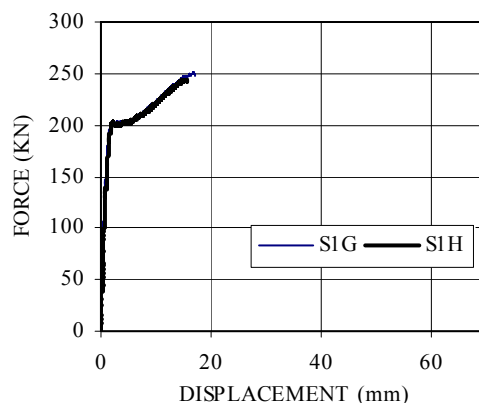


شکل (۱۰): منحنی رفتاری نمونه‌های S2A ، S2B و S2E

در آزمایش هر سه نمونه S2C و S2D و S2F ورق جاری شده و با شکل پذیری زیادی گسیخته گردید. استفاده از الکتروده کم هیدروژن سبب رفتار مطمئن و مناسب در این آزمایشها می‌باشد (شکل ۱۱). الکترودهای کم هیدروژن تاب زیادی در باربری دارند و برای اتصال اعضا یک سیستم شکل پذیر مناسب می‌باشند. کم بودن ترک‌های ریز در بدنه فلز جوش علت این چقرمگی است.



شکل (۱۱): منحنی رفتاری نمونه‌های S2C ، S2D و S2F



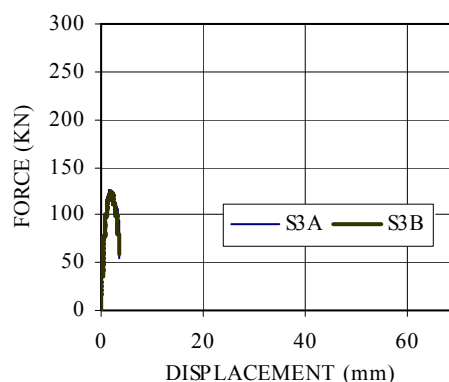
شکل (۸): منحنی رفتاری نمونه‌های S1G ، S1H ، S1I و S1J

۳-۲- نمونه‌های سری S2

پس از انجام آزمایش نمونه‌های S2A و S2B و S2E ، تنها S2A رفتار شکل پذیر داشته و گسیختگی شکل پذیر ورق در آن اتفاق افتاده است. در دو نمونه دیگر ابتدا ورق جاری شده ولی به حد نهایی مقاومت خود نرسیده و جوشهای گوشه دو طرفه در بار 250kN~ دچار گسیختگی گردیده‌اند (شکل ۱۰). کم بودن چقرمگی الکترودهای معمولی و وجود ترک‌های ریز در بدنه فلز آنها سبب گسیختگی این جوشها در کشش می‌شود.

۳-۳- نمونه‌های سری S3

در نمونه‌های S3A و S3B هنگام آزمایش ابتدا ورق عمودی چرخیده و سپس جوش در بارهای $\sim 123\text{KN}$ گسیخته شده است. بعد از چرخیدن ورق، مقاومت جوش گوشه یک‌طرفه همراه با شکل پذیری ناچیزی سریع به صفر می‌رسد (شکل ۱۲). گسیختگی سریع بدون شکل پذیری به علت ایجاد تمرکز تنش در ریشه جوش می‌باشد.



شکل (۱۲): اعوجاج ورق در جوش گوشه یک طرفه (بالا) و منحنی رفتاری آن (پایین)

در جوش گوشه یک طرفه اتفاق افتاده است. میزان باربری 170KN نشان دهنده اثر تقویت سخت‌کننده است که سبب افزایش باربری ۴۰٪ شده است. مقاومت جوش گوشه یک طرفه مطابق جدول (۲) 160KN است. در واقع این هندسه حداکثر به اندازه مقاومت جوش گوشه یک طرفه بدون اعوجاج ظرفیت باربری دارد و با شروع چرخش جوش گوشه، در ابتدای جوش سخت‌کننده به ورق عمودی، تمرکز تنش بوجود می‌آید و گسیختگی به سرعت اتفاق می‌افتد (شکل ۱۳). به عبارت دیگر در صورت تقویت اتصالات گیردار جوش شده با جوش یک طرفه گوشه، استفاده از سخت‌کننده‌های مثلی (لچکی) مقاومت را به حد مقاومت جوش گوشه یک طرفه می‌رساند و سبب گیرداری کامل نمی‌گردد.



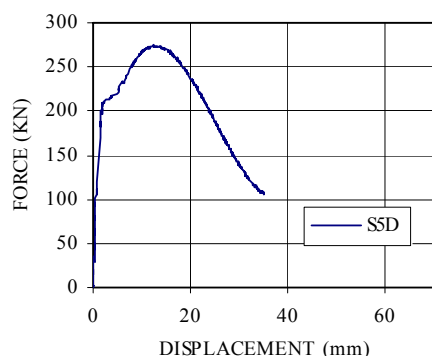
شکل (۱۳): مکانیزم گسیختگی ورق تقویت شده توسط سخت‌کننده مثلی (لچکی) و محل تمرکز تنش

۳-۵- نمونه‌های سری S5

در آزمایش نمونه‌های S5A و S5B رفتار مناسبی مشاهده نگردید و گسیختگی زود هنگام قبل از جاری شدن ورق در جوش نفوذ کامل افقی سخت‌کننده به ورق اتفاق افتاد (شکل ۱۴). در این نمونه‌ها سخت‌کننده‌های افقی تنها برای برش طراحی گردیده بودند و تمرکز تنش در ابتدای جوش نفوذ کامل افقی باربری قطعه را به $\sim 140\text{KN}$ محدود کرد. همچنین الکترودهای با چقرمگی کم نیز مزید بر علت گسیختگی بودند.

۳-۴- نمونه‌های سری S4

در آزمایش نمونه‌های S4A و S4B قطعه تقویت کننده باعث افزایش مقاومت جوش گوشه یک طرفه گردیده است، ولی به حدی نبوده که به حد جاری شدن ورق برسد. به علت وجود نقص در جوشهای نفوذی کامل در ابتدا آنها گسیخته شده‌اند. گسیختگی در بارهای حدود $\sim 125\text{KN}$ اتفاق افتاده است. در نمونه‌های S4C و S4D نقص جوشهای نفوذی کامل برطرف گردیده و گسیختگی



شکل (۱۵): حرکت خارج از صفحه قسمتهای از نمونه و شروع پارگی ورق در سمت راست (بالا)، منحنی رفتاری نمونه (پایین)

۳-۶- نمونه‌های سری S6

هر شش نمونه سری S6 برای محاسبه مقاومت عمود بر صفحه جوش گوشه طراحی شده اند و در تمام آنها قبل از جاری شدن ورق جوش گوشه یک طرفه گسیخته می‌شود. برای بدست آوردن داده‌های بیشتر و متنوع‌تر، بعد جوش ۵ و ۷ میلی متر، و دو الکتروود E6013 و E7018 به کار برده شد. در مجموع در تمام نمونه‌ها ابتدا ورق عمودی چرخش کرده و جوش گوشه یک طرفه گسیخته گردیده است (شکل ۱۶).



شکل (۱۶): مکانیزم گسیختگی جوش گوشه یک طرفه

با توجه به این که جوشکاری با جوش گوشه یک طرفه در ایران رواج زیادی دارد با بدست آوردن میزان مقاومت این نوع جوشها می‌توان به ارزیابی اتصالات موجود ایرانی پرداخته و در مقاوم سازی این سازه‌ها درصد اندکی مقاومت برای سازه موجود در نظر گرفت. نتایج باربری



شکل (۱۴): تمرکز تنش در ابتدای جوش سخت‌کننده به ورق و گسیختگی در این نقطه

در نمونه‌های S5C و SSD سخت‌کننده افقی برای ترکیب تنشهای صفحه‌ای طراحی گشته [۹] و برای جوشکاری از الکتروودهای کم هیدروژن استفاده شده است. نمونه S5C به علت نقص در جوش نفوذ کامل عمودی دچار گسیختگی زودهنگام در بار 213 KN گردید و آزمایش متوقف گردید. این جوش در وضعیت عمودی انجام شده بود و کیفیت مناسبی نداشت. رفتار نمونه S5D در آزمایش مناسب بود. در این نمونه ابتدا جاری شدن به صورت گسترده‌ای در ورق اتفاق افتاد و سپس قسمتهایی از نمونه حرکت خارج از صفحه کرده و پارگی در ورق شروع گشت. خارج شدن ورق از صفحه باربری به علت وجود نداشتن ورق عمودی (مشابه جان نیمرخ IPE) سبب زوال مقاومت گردیده است. در این مرحله آزمایش عمداً متوقف شده، زیرا ادامه آزمایش اطلاعات بیشتری را در بر نمی‌داشت (شکل ۱۵). در این نمونه هیچ کدام از قطعات تقویت کننده دچار آسیب نشدند. در واقع بدون اتصال ورق مدل بال تیر، قطعات تقویتی تی شکل می‌توانند نیرو را منتقل کنند. این روش تقویت برای اتصالات گیردار در ستونهای جعبه‌ای مناسب و موثر است.



این نمونه ها در جدول (۳) ارائه می گردد. همچنین نتایج نمونه های S3A و S3B نیز برای جمع بندی ارائه شده است. در این جدول ضریب مقاومت جوش گوشه یک طرفه بر اساس رابطه (۱) با اعمال زاویه θ برابر ۹۰ مقدار 0.9 بدست می آید (ستون آخر). نیروهای بدست

آمده از آزمایش نیز بر تنش نهایی الکتروود و سطح مقطع نمونه تقسیم گشته تا ضریب باربری بدست آید (ستون ماقبل آخر). با توجه به این نتایج به علت اعوجاج و چرخش جوش، مقاومت کمتری نسبت به مقاومت تئوری آن بدست می آید.

جدول (۳): مقاومت جوش گوشه یک طرفه و ضریب باربری آن بر اساس آزمایشها

Number	Specimen	Electrode Type	Fillet Weld Size , D(mm)	Maximum Carried Load(KN)	Ratio of Strength	Nominal Ratio of Strength
1	S3A	E6013	7	125	0.701	0.9
2	S3B	E6013	7	123	0.690	0.9
3	S6C	E6013	5	96	0.754	0.9
4	S6D	E6013	5	106	0.832	0.9
5	S6A	E7018	7	154	0.778	0.9
6	S6B	E7018	7	165	0.834	0.9
7	S6E	E7018	5	123	0.870	0.9
8	S6F	E7018	5	120	0.848	0.9

جدول (۴): نتایج باربری نمونه ها در هنگام گسیختگی

نمونه		تغییر مکان (mm)	نیرو (KN)
			
1	S1A	2.85	189
2	S1B	2	161
3	S1C	60	295
4	S1D	12.5	225
5	S1E	72	295
6	S1F	72	289
7	S1G	17	249
8	S1H	15	243
9	S1I	35	289
10	S1J	75	297
11	S2A	70	288
12	S2B	19	247
13	S2C	71	290
14	S2D	78	292
15	S2E	28	258
16	S2F	85	294
17	S3A	3.4	125
18	S3B	3.3	123
19	S4A	2.2	126
20	S4B	2.2	123
21	S4C	2.7	171
22	S4D	3.2	183
23	S5A	3.5	149
24	S5B	4.4	136
25	S5C	2	213
26	S5D	35	273
27	S6A	4	154
28	S6B	4.1	165
29	S6C	1.6	96
30	S6D	2.1	106
31	S6E	3.6	123
32	S6F	3.5	120

لیکن این ضریب همیشه بیشتر از 0.6 بوده است و می توان بر این مقاومت تکیه نمود. با احتساب ضریب اطمینان ۲ در آیین نامه های فولادی به مقاومت 0.3 تنش نهایی فلز جوش می رسیم که در آیین نامه جوش ایران [۳] نیز وجود دارد. در این حالت نیز عملکرد بهتر الکترودهای با چقرمگی بالا مشهود است.

۴- جمع بندی

جهت ارزیابی وضعیت موجود اتصالات گیردار جوشی متداول در ایران ۳۲ آزمایش بیانگر رفتار اتصال به صورت آزمایشگاهی مطالعه گردید. تاثیر باربری جوش های مختلف از نظر مقاومت و شکل پذیری و روشهای مقاوم سازی توسط سخت کننده های مثلثی و تی شکل مشاهده گردید و نتایج آزمایشها در جدول (۴) ارائه گردیده است.

۵- نتیجه گیری و توصیه ها

نتایجی که از این تحقیق بدست آمده، عبارت است از: انتخاب الکتروود مناسب برای نقاط بحرانی باربری مانند جوش اتصال تیر به ستون، از نوع الکتروود کم هیدروژن و چقرمگی بالا توصیه می گردد. با توجه به این که تنش تسلیم واقعی فولاد اغلب بیشتر از 240 MPa می باشد الکتروودهای رده E70 از این نظر هم برای جوشکاری مناسب تر هستند. بر اساس آیین نامه جوش [۳] در صورتی تنش تسلیم فولاد از 300 MPa بیشتر باشد الکتروودهای رده E60 برای جوشکاری سازگار با فلز مادر نیست.

با در نظر گرفتن جوشکاری در کارگاه استفاده از ورق پشت بند در جوش شیاری نفوذ کامل ضروری است و بدون آن ایجاد جوش نفوذی تنها با سنگ زنی از پشت در اتصالات مقدور نیست.

در تمام آزمایشها مشخص گردید جوش گوشه دوطرفه دارای مقاومت مناسب در کشش است. هیچ کدام از نمونه های الکتروودهای کم هیدروژن با این جوش دچار گسیختگی نشدند و الکتروودهای معمولی نیز رفتار قابل قبول داشتند.

برای ارزیابی جوش گوشه یک طرفه در سازه های موجود می توان مقاومت حداقل آیین نامه جوش ایران را در نظر گرفت. اگر این نوع اتصال به کمک سخت کننده مثالی تقویت گردد می توان از تمام ظرفیت جوش گوشه یک طرفه استفاده نمود.

سخت کننده های T شکل برای مقاوم سازی اتصالات گیردار با ستونهای جعبه ای در سازه های موجود مناسب هستند و سبب بهبود رفتار اتصال می گردند.

جوشکاری مجدد عمل نامطلوبی می باشد و به طور قطع سنگ زنی و جوش مجدد باعث تردشدگی فولاد می گردد. البته در مورد اصلاح جوش گوشه اتصال و سنگ زدن آن نکته ای وجود دارد. بعد از سنگ زدن جوش گوشه نیاز به سنگ زدن ورق و ایجاد ۶ میلیمتر فاصله به عنوان ریشه جوش، قسمت ترد شده ورق بالاسری را حذف می کند و

قسمت ترد ورق سنگ گرفته می شود. از طرف دیگر محلی که روی ستون حرارت دیده دوباره جوش نمی شود و کمی پایین تر جوشکاری می گردد. استفاده از الکتروودهای کم هیدروژن برای این کار مفید است و نباید از الکتروودهای معمولی استفاده گردد.

با مشاهده رفتار جوش در آزمایشهای انجام شده موارد ذیل توصیه می گردد:

هر چقدر شدت جریان (آمپر) زیاد می شود نفوذ فلز جوش بیشتر می گردد و اتصال مناسب تری فراهم می کند، از طرف دیگر گل زدن آن سخت می شود و حرارت دیدگی قطعه را افزایش می دهد. استفاده از متوسط بازه شدت جریان (آمپر) کاتالوگ با در نظر گرفتن وضعیت جوشکاری همیشه مناسب ترین آمپر محسوب می شود و گل زدن جوشکاری نیز ساده تر می گردد. بنابراین برای جوشهای گوشه شدت جریان (آمپر) متوسط و برای جوشهای نفوذی در پاس اول شدت جریان (آمپر) کمی بیشتر از متوسط و در پاسهای بعدی شدت متوسط توصیه می شود.

جوشکاری در وضعیت تخت و افقی نسبت به وضعیت عمودی و سربالا اتصالات مناسبتری را ایجاد می کند و توصیه می شود با در نظر گرفتن مهارت متوسط جوشکاران، مهندسین طراح از جوش درزهای با وضعیت تخت و افقی استفاده کنند.

۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری صمیمانه پرسنل آزمایشگاه سازه در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تقدیر و تشکر می گردد.



1- FEMA 2000, recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings. Report No. FEMA-350, Federal Emergency Management Agency.

۲- آیین‌نامه اتصالات در سازه‌های فولادی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۲۶۴، ۱۳۸۴.

۳- آیین‌نامه جوشکاری ساختمانی ایران. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۲۲۸، ۱۳۸۰.

4- FEMA. *State of the Art Report on Connection Performance*, FEMA-355D, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.

5- FEMA. *State of the Art Report on Welding and Inspection*, FEMA-355B, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.

6-D.Dubina, A.Stratan. Behaviour of welded connections of moment resisting frames beam-to-column joints. *Engineering Structures* 24 , 1431–1440, 2000.

7- Cheng- chih , chon- chou lin , chia- liang tsai. *Evaluation of reinforced connections between steel beams and box columns*. *Engineering Structures* 26 , 1889–1904 , 2004.

۸- مزروعی، علی ؛ سیمونیان، واهاک ؛ نیکخواه عشقی ، مجید. «بررسی تجربی درصد گیرداری اتصالات صلب جوشی متداول در ایران» گزارش تحقیقاتی شماره گ- ۳۰۵ ، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.

۹- مزروعی، علی ؛ قاسمیه ، مهدی و قبادی ، محمد سهیل. «بررسی رفتار چرخه‌ای اتصالات صلب تقویت شده با ورق و ارائه دستورالعمل مقاوم‌سازی این اتصالات» گزارش تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۵.

10- AISC, AISC/ANSI 360-05. *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL, 2005.

11- AWS D1.1/D1.1M. *Structural Welding Code – Steel*, American Welding Society, 2002.