بررسي رفتار و طراحي اتصال خمشي با ورق انتهايي هم تراز به روش اجزاء محدود تحت بارگذاري متناوب

مهدي قاسميه*[۱] و وحيد زين الديني ميمند[۲]

[۱]استاديار دانشكده مهندسي عمران - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

[۲]دانش آموخته كارشناسى ارشد دانشكده مهندسي عمران - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۵/۲/۲ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۱۱/۲۱ , تاريخ تصويب ۸۵/۱۲/۱۲)

چكيده

در اين مقاله ابتدا بررسي و تاييد روش اجزاء محدود براي تحليل غيرخطي اتصال با ورق انتهايي هم تراز انجام گرفته است. سپس روابط طراحي اجزاء اتصال ورق پيشاني هم تراز كه بر پايه تئوري خطوط تسليم براي ورق انتهايي و روش ـ كنـدي و همكـارانش بـراي تعيـين نيـروي پيچها مي باشند، ارائه گرديده است. هشت نمونه از اين اتصال تحت بارگذاري متناوب به روش اجزاء محدود تحليل گرديده انـد. بـا اسـتفاده از منحني هاي هيسترزيس لنگر- چرخش بدست آمده از تحليل، ظرفيت خمشي براي هر نمونه تعيين گرديد. در پايان صحت معادلات طراحي كه شامل تعيين ظرفيت خمشي ورق انتهايي و نيروي پيچها براي اين اتصال ميباشند، جهت تحليل‌هـاي لـرزه اي بـه روش اجـزاء محـدود بررسـي گرديدند.

واژه هاي كليدي : اتصالات خمشي - ورق انتهايي هم تراز - بارگذاري متناوب - اجـزاء محـدود غيـر خطـي - رفتـار لرزه‌اي

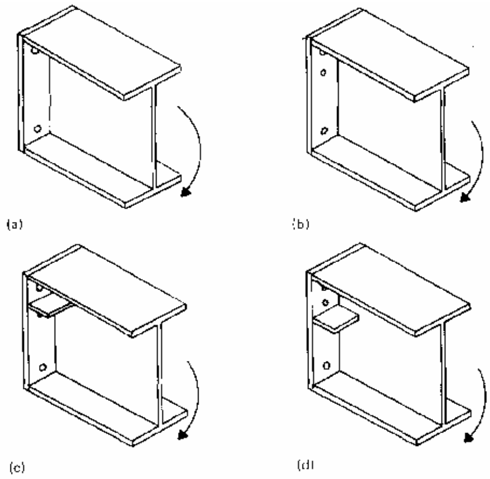
مقدمه

مطالعه و كاربرد اتصالات ورق انتهايي در قابهاي خمشي براي اتصالات تير به تير و يا تير به ستون به ابتداي دهة ۱۹۶۰ برميگردد. اين اتصالات بصورت غير مهندسي و ابتدائي در ساختمانهاي فلزي تا دهة ۱۹۸۰ بكار برده مي‌شدند. استفاده از اين اتصالات از آن زمان به بعد، بدلايل مختلف، بصورت رايج و مهندسي مورد استفاده قرار گرفته است. از مزيتهاي اصلي استفاده از اين اتصال، استفاده از جوش با كيفيت ايده ال در كارخانه در مقايسه با جوش در محل ميباشد. همچنين مصالح ورق انتهايي، مانند مصالح تير و ستون بوده و از اضافه‌هاي ورقهاي بكار برده شده در ساختن تير و ستون مي‌توان براي ورق انتهايي نيز استفاده كرد. بدليل كاملاً پيچي بودن اتصال و عدم نياز به جوش كارگاهي، نصب و برپايي قابهائي كه از اينگونه اتصالات استفاده ميكنند، ساده تر از قابهاي با اتصالات متعارف است. اين امر موجب مي‌گردد كه در شرايط خيلي سرد هم ساخت اسكلت فلزي امكانپذير باشد. با گذشت زمان بدليل پيشرفت در ساخت و روشهاي طراحي دقيقتر، استفاده از اتصال ورق انتهايي براي كاربرد در ساختمانهاي چند طبقه اقتصادي تر شده است.

همچنين به دليل رفتار ضعيف اتصالات گيردار جوشي در مقايسه با رفتار اتصالات پيچي در زلزله ۱۹۹۴ در نورتريج، اتصالات ورق انتهايي بعنوان جايگزين اتصالات جوشي درنواحي زلزله خيز مورد توجه قرارگرفته است.

يك اتصال خمشي با ورق انتهايي، از متصل شدن يك ورق فولادي به انتهاي مقطع تير برش داده شده، تشكيل شده است. اين ورق به وسيله پيچهاي با مقاومت بالا[۱] و پيش كشيده[۲] به عضو كناري وصل مي‌شود. اين نوع اتصالات به دو دسته اتصال با ورق انتهايي هم تراز[۳] و اتصال با ورق انتهايي بلند[۴] تقسيم بندي مي‌شوند. در يك اتصال هم تراز، ورق انتهايي از لبه هاي بالهاي تير فراتر نمي‌رود و تمام پيچها بين دو بال تير قرار مي‌گيرند. اين گروه از اتصالات در قابهاي درمعرض بارهاي جانبي كمتر به كار مي‌روند. چند نمونه از اتصالات با ورق انتهايي هم تراز در شكل (۱) ديده مي‌شوند. خصوصيات سازه اي اين اتصال كه بايد مورد بررسي قرار گيرند، شامل مقاومت خمشي، سختي چرخشي و ظرفيت چرخشي مي باشند.

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۸۶۹ – ۰۲۱ , فاكس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ – ۰۲۱ , Email: mghassem@ut.ac.ir



شكل ۱ : انواع مختلف اتصال ورق انتهايي هم تراز.

آيين نامه Eurocode3 [۱] شامل روشهاي طراحي تعدادي از انواع اتصالات مي باشد كه اتصال تير با ورق انتهايي هم تراز هم از آن جمله است. در دهه هفتاد ميلادي پژوهشگران تحقيقاتي را بر روي اتصال تير با ورق انتهايي انجام دادند كه همگي بر پايه مدل T-Stub بوده، و بعدها Eurocode3 نيز بر پايه همين مدل فرمولبندي شده است. در Eurocode3 سختي چرخشي از برآيند سختي اجزاء اساسي آن بدست مي آيد. ديويسون و همكارانش [۲] يك سري آزمايش های استاتيكي بر روي انواع مختلف اتصالات از جمله اتصال تير با ورق انتهايي هم تراز انجام دادند. هدف از اين آزمايش ها مقايسه سختي چرخشي، شكل پذيري و ظرفيت تحمل خمش انواع مختلف اتصالات بود. در بين اين اتصالات، اتصال تير با ورق انتهايي هم تراز در صورتيكه به بال يا به جان ستون پيچ شده بود، رفتار بسيار متفاوتي از خود نشان داد. ايشان همچنين مشاهده نمودند كه با بكار بردن ستونهاي با مقطع سبكتر، سختي چرخشي اوليه كاهش يافته؛ ليكن شكل پذيري اتصال زيادتر ميگردد. بوز و هيوز [۳] تعدادي آزمايش استاتيكي با بارگذاري يكطرفه[۵] بر روي اتصالات تير با ورق انتهايي از نوع هم تراز و هم از نوع گسترش يافته انجام داد. هدف از آن آزمايش ها بررسي رفتار لنگر-چرخش انواع مختلف اتصال تير با ورق انتهايي با ضخامتهاي مختلف ورق انتهايي و اندازه پيچهاي متفاوت بود. از نتايج اين آزمايش ها، مشاهده سه نوع شكست اتصال، كه عبارت بودند از كمانش جان ستون، شكست پيچ و شكست ورق انتهايي. با استفاده از نتايج اين آزمايش ها، ايشان پيشنهاد نمودند كه اتصال با ظرفيت چرخشي بيش از ۰/۰۳۰ راديان، از نوع اتصال شكل پذير و اتصال با ظرفيت چرخشي كمتر از ۰/۰۲۰ راديان، از نوع شكننده در نظر گرفته شوند. شي و همكارانش [۴] يك مدل T-Stub بر اساس تئوري خطوط تسليم[۶] تير براي مدل كردن رفتار صحيح اتصال تير با ورق انتهايي هم تراز ارائه دادند. در اين تحقيق فرض گرديد كه خصوصيات رفتاري لنگر-چرخش اتصال وابسته به رفتار هر یک از اجزاء T-Stub ها بوده، و همچنين جان ستون در كشش، فشار و برش قرار دارد. ايشان صحت مدل تحليلي خود را با نتايج آزمايشگاهي تائيد نمود. برودريك [۵] تعدادي نمونه آزمايشگاهي با مقياس كامل از اتصال تير با ورق انتهايي هم تراز را تحت بار يكطرفه و متناوب[۷] مورد آزمايش قرار داد و با مدل پيش بيني موجود در Eurocode3 مقايسه نمود. بهاري [۶] مدل اجزاي محدود براي بررسي رفتار اين اتصال را تحت بارگذاري يكطرفه مورد تحليل قرار داد و با نتايج كار آزمايشگاهي مقايسه نمود. نتايج مدل تحليلي وي بخوبي صحت روش اجزاء محدود را براي بررسي رفتار اين اتصال تائيد مي نمود.

از آنجا كه بررسي رفتار اتصالات از طريق انجام آزمايش ميتواند بسيار پر هزينه و زمان بر باشد و با توجه به پيشرفتهاي بسياري كه در زمينه‌هاي نرم افزاري انجام شده، امروزه رفتار اينگونه اتصالات را ميتوان به روش اجزاء محدود با دقت خوبي بررسي نمود. از سوي ديگر تاكنون رفتار لرزه‌اي اتصال با ورق انتهايي هم تراز كمتر مورد توجه قرار گرفته و تنها اخيراً تحقيقات محدودي دراين زمينه صورت گرفته است. دراين تحقيق سعي شده است، ابتدا با تحليل به روش اجزاء محدود و مقايسه با نتايج آزمايش های انجام شده بر روي اين نوع اتصال، صحت كاربرد روش اجزاء محدود براي تحليل غير خطي اتصال بررسي شود. پس از تأييد رفتار مدل اجزاء محدود، با توجه به كمبودهايي كه در زمينه طراحي لرزه اي اتصال ديده ميشود، معادلات طراحي براي اين اتصال ارائه و به كمك اين تحليلها ، صحت معادلات طراحي بررسي گرديدند.

مدل اجزاي محدود

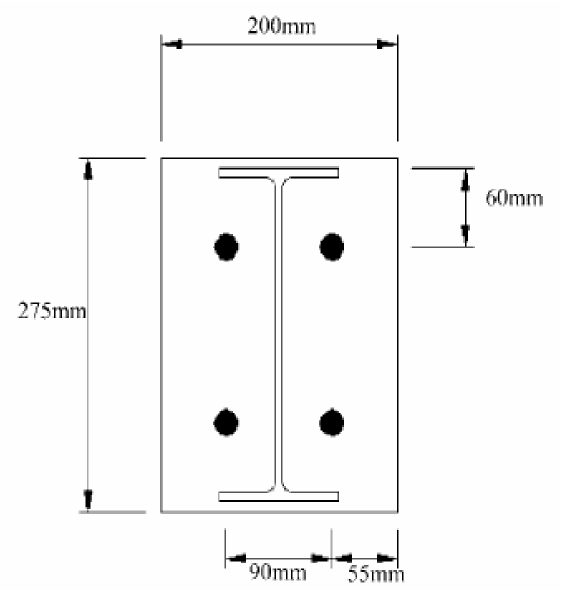
در اين تحقيق از نتايج آزمايش های انجام شده توسط برودريك [۵] براي تأييد مدل تحليلي اين مطالعه استفاده گرديده است. بدين منظور دو نمونه از اتصال ورق

انتهايي هم تراز از نمونه هاي آزمايشگاهي انتخاب شده اند. جدول (۱) مشخصات اين دو نمونه را نشان مي دهد. در شكل (۲) ابعاد ورق انتهايي جهت انجام تحليل ديده مي شود.

جدول ۱ : مشخصات نمونه ها.

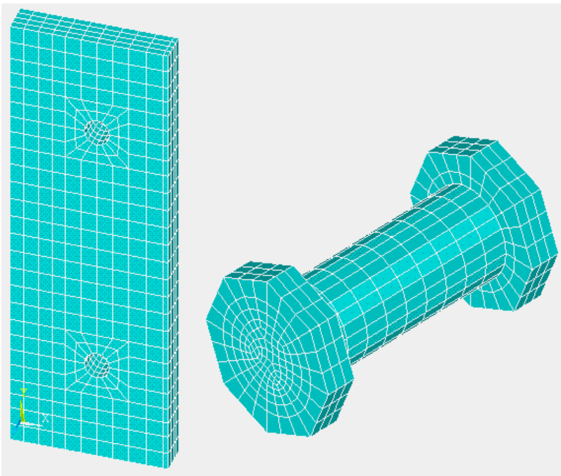
شماره نمونه	تير مقطع	مقطع ستون	ضخامت ورق (mm)	پيچ درجه	پيچ اندازه
EP4	254*146*37 UB	203*203*86 UC	12	grade 8.8	M20
EP7	254*146*37 UB	203*203*86 UC	20	grade 8.8	M16

تحليل و مدلسازي با استفاده از نرم افزار ANSYS 8.1 و المانهاي SOLID45، CONTACT174 و TARGE170 موجود در اين نرم افزار انجام گرديد. مدل اجزاء محدود همانند جزئيات آزمايشگاهي، شامل يك تير طره است كه به ستوني توسط ورق انتهايي وصل شده است. ابعاد تير و ستون مدل دقيقاً مطابق با ابعاد آزمايشگاهي انتخاب مي شوند. مهمترين بخش مدلسازي اتصال، مدل پيچها و نحوه تماس آنها با ورق انتهائي ميباشد. هندسة پيچ شامل سه حجم، بدنه، سر و مهره است كه سر و مهره به ترتيب، جلوي ورق انتهايي و پشت بال ستون قرار داده مي شود.

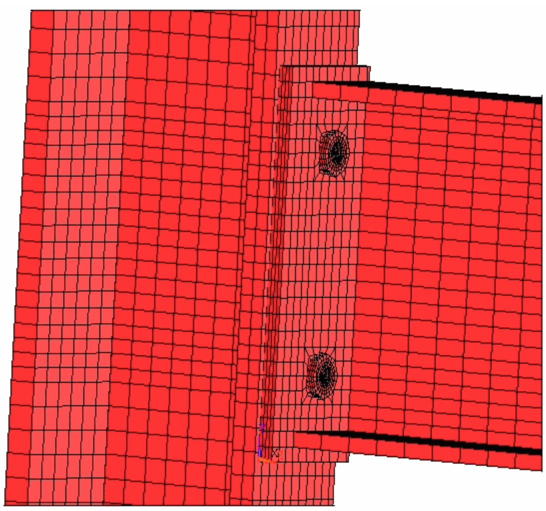


شكل ۲ : ابعاد ورق انتهايي براي نمونه هاي EP4 و EP7 .

بدليل اينكه در عمل ورق انتهايي به تير با جوش نفوذي كامل وصل مي شود، اين دو بخش يعني تير و ورق انتهايي در مدل اجزاء محدود به طور پيوسته با هم مدل مي شوند. شبكه بندي مدل كلا با المان سه بعدي SOLID45 انجام گرديده كه اندازة المانها در بخش چشمه اتصال، پيچها و ورق انتهايي ريزتر از ادامة ستون و تير است. ضخامت ورق انتهايي با چهار رديف المان مدل گرديده است. ضخامت بال ستون با دو رديف و تير با يك رديف المان مدل گرديده اند؛ زيرا كه دقت در رفتار خمشي اين بخشها به اندازة دقت در ورق انتهايي ضروري و مهم نميباشد. ريز كردن شبكه تا جايي انجام گرديده كه تغييرمكانهاي بدست آمده بتدريج همگرايي در نتايج را حاصل نمودند. در شكلهاي (۳) و (۴) شبكه بندي اجزاي اتصال و بخش اصلي اتصال ديده مي شوند.



شكل ۳ : شبكه بندي پيچ و ورق انتهايي.



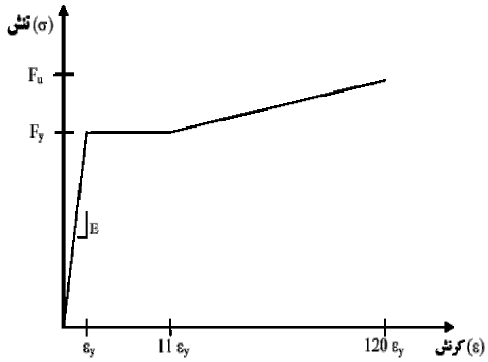
شكل ۴ : شبكه بندي بخش اتصال.

رفتار ورق انتهايي در اين اتصال به علت نصب آن با پيچ به بال ستون ماهيت پيچيده اي دارد. تا وقتيكه

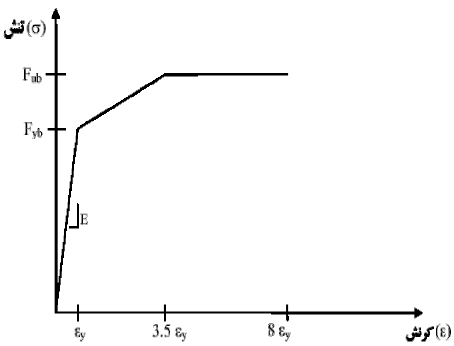
بخشي از ورق به بال ستون چسبيده، آن ورق تحت فشار مي باشد و به بال ستون نيرو وارد مينمايد. بخشي از آن ورق كه در كشش است، به بال ستون نچسبيده و هيچ نيرويي وارد نمي كند. همين بحث در مورد پيچها نيز صادق است. براي مدل سازي چنين رفتاري كه بصورت تماس فشاري و لغزشي است، از المان تماس CONTACT174 استفاده گرديده. سطح تماس قبلاً با المان SOLID45 شبكه بندي شده و بعد از آن المان تماس روي آنها قرار داده مي شود؛ و سطحي به نام سطح هدف نيز براي هر سري المان تماس جداگانه معرفي گرديده است. بعنوان مثال بايد براي مهره پيچ سطح هدف مخصوص به آن را جداگانه از بدنة پيچ معرفي نمود. سطوح هدف و تماس بوسيلة يك سري اعداد ثابت حقيقي مشترك به برنامه معرفي گرديده اند. تغيير دادن هر يک از اين اعداد يا عدم تنظيم دقيق آنها، مي تواند رفتار مدل را تا حدي دچار خطا نموده كه منجر به واگرايي شود. لذا جهت جلوگيري از واگرايي، با سعي و خطاي زياد و با تعدادي تحليل اوليه، مي توان به اعدادي منطقي براي تنظيمات اين المان دست يافت، به گونه اي كه در نهايت علت واگرايي نهايي مدل ناشي از پلاستيك شدن زياد اجزاء يا المانها گردد. تماس در اين المان موقعي حاصل ميشود كه نقاط گوس يا هر نقطة ديگر كه به عنوان محل كشف تماس به برنامه معرفي شده، درون سطوح هدف نفوذ كند. در صورتي كه المان در جهت عمود آن به هدف نزديكتر شود، نيروي آن فشاري در نظر گرفته مي شود و دو سطح به هم نيرو وارد مي كنند. در حالتي كه در جهت عكس اين عمود حركت نمايد، نيرو كششي است و هيچ نيرويي منتقل نم يگردد. در اتصال مورد نظر، محلهايي كه المان تماس به كار رفته عبارتند از بين سر پيچ و ورق انتهايي، بين مهره پيچ و بال ستون، بين بدنه پيچ و سوراخ ورق داخل ورق و بال ستون، و بين ورق انتهايي و بال ستون بصورت كامل.

منحني تنش-كرنش بكار رفته براي تير، ستون و ورق انتهايي در شكل (۵) و براي پيچها در شكل (۶) ارائه شده است. در اين نمودارها تنشهاي تسليم تير، ستون و ورق انتهايي ۲۴۰Mpa و تنش نهايي آنها ۳۶۰Mpa مي باشد. تنش تسليم براي پيچها ۶۴۰Mpa و تنش نهايي آنها ۸۰۰ Mpa است.

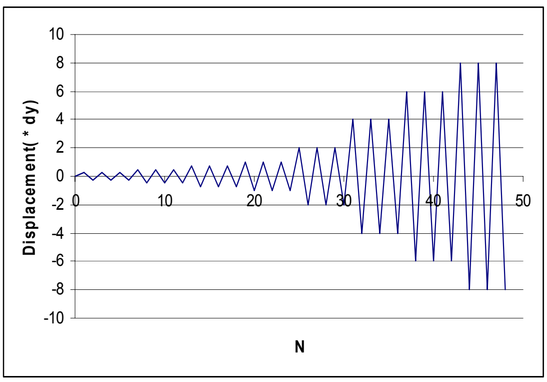
بارگذاري مدل در دو مرحله انجام ميگردد. مرحلة اول شامل پيش كشيده شدن پيچها است كه بدين منظور دماي منفي ثابت روي بدنة اين پيچها اعمال ميشود. ميزان نيروي پيش تنيدگي برابر۷۰% نيروي نهايي آنها مي باشد. سپس در مرحله دوم نمونه تحت بارگذاري متناوب بر اساس پروتكل موجود در ECCS [۷] قرار مي گيرد. شكل (۷) اين پروتكل را نشان مي دهد؛ كه در آن N تعداد گامهاي بارگذاري و dy تغيير مكان متناسب با جاري شدن اتصال را نشان مي دهد.



شكل ۵ : منحني تنش-كرنش تير، ستون و ورق انتهايي.



شكل ۶ : منحني تنش-كرنش پيچ.

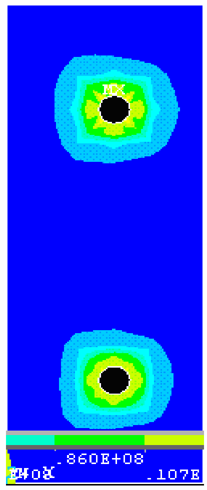


شكل ۷ : پروتكل بارگذاري.

نتايج تحليل و مقايسه با نتايج آزمايشگاهي

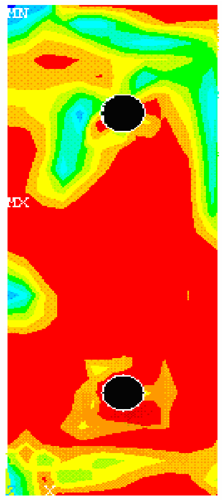
شكل (۸) اثر نيروي پيش كشيده شده بر ورق انتهايي را بصورت سطوح توزيع تنش وان ميسس نشان

مي‌دهد.

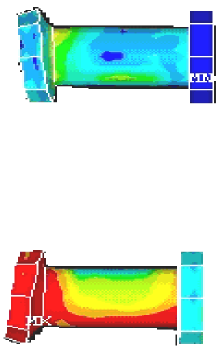


شكل ۸ : اثر پيش تنيدگي پيچ ها بر روي ورق انتهايي.

توزيع تنش وان ميسس براي اين نمونه در ورق انتهايي و پيچها در گام آخر بارگذاري در شكلهاي (۹) و (۱۰) نشان داده شده اند.



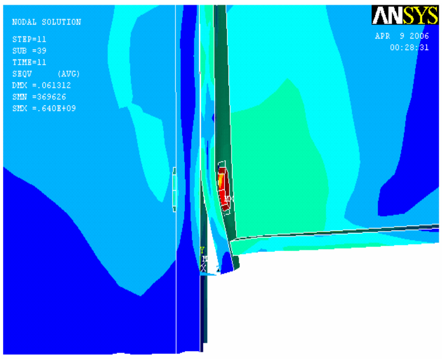
شكل ۹ : تنش وان ميسس در ورق انتهايي در گام آخر.



شكل ۱۰ : توزيع تنش وان ميسس در پيچها در گام آخر.

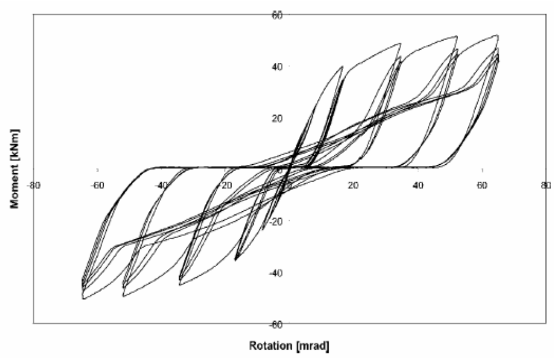
از اين شكلها مشاهده مي‌شود كه علت منهدم شدن اتصال، پلاستيك شدن بيش از حد ورق انتهايي مي‌باشد.

اين مسأله در نمونة آزمايشگاهي برودريک [۵] هم ديده شد. شكل (۱۱) تغيير مكان و توزيع تنش در ورق انتهايي و جداشدگي آن از ستون را نشان مي‌دهد. همانگونه كه مشاهده مي گردد، نفوذي بين المانهاي ورق انتهايي و بال ستون و يا پيچها صورت نگرفته است و اين مسأله بيانگر صحت عملكرد المانهاي تماسي مي باشد.

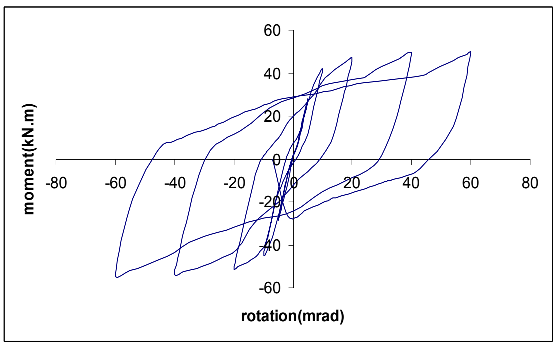


شكل ۱۱ : جداشدگي ورق انتهايي از بال ستون.

در اين قسمت مقايسه منحني هيسترزيس[۸] اجزاء محدود با منحني آزمايشگاهي صورت مي گيرد. در شكلهاي (۱۲) و (۱۳) اين نتايج براي نمونه EP4 مشاهده مي گردند.



شكل ۱۲ : هيسترزيس لنگر-چرخش آزمايشگاهي نمونه EP4 .



شكل ۱۳ : هيسترزيس لنگر-چرخش اجزاء محدود نمونه EP4 .

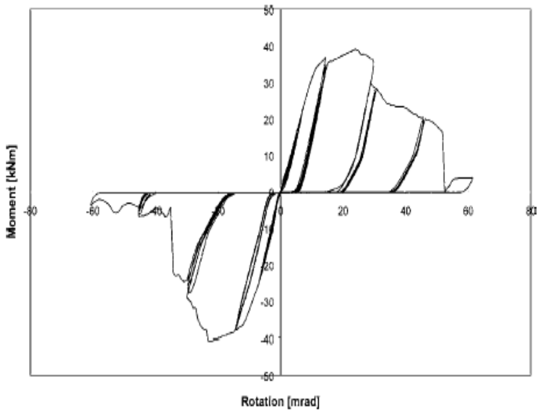
عليرغم تحليل غير خطي و پيچيدگي شرايط تكيه گاهي و تماس اجزا با يكديگر، همانگونه كه با مقايسه منحني‌ها مشاهده مي‌شود، مدل اجزاء محدود داراي دقت بسيار مناسبي بوده است و شكل منحني آن بسيار مشابه با منحني حاصل از آزمايش ها مي‌باشد. در جدول (۲) نتايج كميت هاي شاخص بدست آمده از منحني هاي هيسترزيس آزمايشگاهي و اجزاء محدود براي نمونه EP4 بهمراه درصدهاي خطا هر يک با اوحاد rad. و kN.m ارائه گرديده اند.

جدول ۲ : مقايسه نتايج آزمايش و نتايج تحليل براي نمونه EP4.

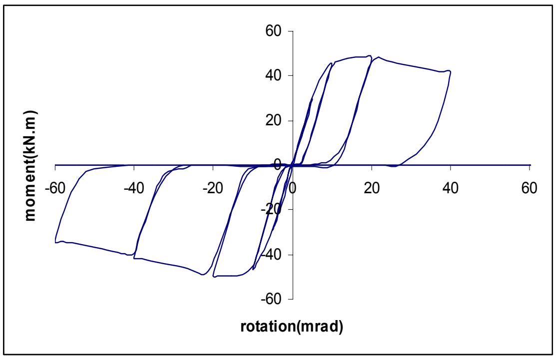
پارامتر		آزمايش	اجزاء محدود	درصد خطا
چرخش تسليم	θ_y	0.0104	0.0100	3.8
لنگر تسليم	M_y	36.81	42.00	14.1
سختي الاستيك	M_y/θ_y	3550	4200	18.3
چرخش نهايي	θ_u	0.0650	0.0600	7.7
لنگر نهايي	M_u	51.86	53.30	2.8
شكل پذيري	θ_u/θ_y	6.30	6.00	4.8
چرخش پلاستيك	θ_p	0.0550	0.0500	9.1

همانگونه كه مشاهده مي گردد، نتايج نزديک به نتايج آزمايشگاهي بوده و خطاي تحليل به روش اجزاء محدود درحد مطلوبي مي باشد. بدليل ساده سازيهاي انجام شده نسبت به شرايط آزمايشگاهي و تحليل شرايط ايده آلي كه با واقعيتها فاصله دارد، نتايج تا حدودي متفاوت با نتايج آزمايشگاهي گرديده است. مي توان به اين نكته نيز اشاره كرد كه رفتار فرض شده براي فولادهاي به كار رفته به طور كامل منعكس كننده رفتار واقعي آنها در عمل نمي باشد. همچنين بدليل استفاده از المانهاي تماس و به جهت غير خطي شدن بيش از حد سازه و همچنين نفوذ اين المانها در سطح هدف، خطاي محسوسي در نتايج ايجاد شده است.

در ادامه به همين ترتيب منحني هاي مربوط به نمونه EP7 ارائه مي گردند (شكلهاي ۱۴و ۱۵). مقايسه شكل كلي اين منحني‌ها نيز بيانگر شباهت آنها و صحت نتايج مدل اجزاء محدود مي باشد.



شكل ۱۴ : هيسترزيس لنگر-چرخش آزمايشگاهي نمونه EP7.



شكل ۱۵ : هيسترزيس لنگر-چرخش اجزاء محدود نمونه EP7.

جدول ۳ : مقايسه نتايج آزمايش و نتايج تحليل براي نمونه EP7 .

پارامتر		آزمايش	اجزاء محدود	درصد خطا
چرخش تسليم	θ_y	0.0110	0.0100	9.1
لنگر تسليم	M_y	35.33	40.70	15.2
سختي الاستيك	M_y/θ_y	3290	4070	23.7
چرخش نهايي	θ_u	0.0238	0.0220	7.6
لنگر نهايي	M_u	39.90	44.80	12.3
شكل پذيري	θ_u/θ_y	2.16	2.20	1.8
چرخش پلاستيك	θ_p	0.0128	0.0120	6.2

در جدول (۳) مقايسه نتايج كميت هاي شاخص

بدست آمده از منحني هاي هيسترزيس آزمايشگاهي و اجزاء محدود براي نمونه EP7، بهمراه درصدهاي خطا ارائه گرديده اند.

همانگونه که درمقايسه نتايج تحليل اين مدل با نتايج آزمايشگاهي نيز مشاهده مي‌گردد، دقت مدل اجزاء محدود قابل قبول مي‌باشد.

روابط طراحي

آخرين روابط طراحي اتصال از نوع ورق انتهائي هم تراز در حال حاضر در Eurocode3 ارائه گرديده است. بر اساس مطالعات تامسون و برودريک [۸] که ظرفيتهاي بدست آمده از روابط طراحي آئين نامه فوق الاشاره را با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نموده اند، مشخص گرديد که روابط طراحي در آن آيين نامه منجر به تخمين بسيار بالا در سختيهاي دوراني اتصال و تخمين پائين در ظرفيتهاي لنگر اتصال مي گردد. با توجه به معضلات معادلات حاکم در طراحي اينگونه اتصالات در Eurocode3 به آئين نامه FEMA350 [۹] رجوع گرديد. از آنجا که در FEMA350 روش طراحي فقط براي اتصال با ورق انتهايي بلند موجود مي باشد و در آن از روابط تئوري خطوط تسليم استفاده گرديده است، لذا مي توان با استفاده از روش مشابه خطوط تسليم، روش طراحي جامعي را براي اين اتصال بشرح ذيل پيشنهاد نمود.

روابط طراحي پيشنهادي اين اتصال شامل دو بخش ميباشند. نخست با استفاده از تئوري خطوط تسليم و نتايج مطالعات سروجي [۱۰]، مقاومت يا ضخامت ورق انتهايي مورد نياز تعيين مي گردند. سپس بر پايه مطالعات_کندي و همکارانش [۱۱]، نيروي پيچها پيش بيني مي گردند؛ که در ادامه اين روابط ارائه مي گردند.

معادله هاي مربوط به ضخامت ورق انتهايي (t_p) مورد نياز براي حداکثر نيروي لنگر (M_u) و يا ظرفيت لنگر ورق (M_{pl}) براي اين اتصال با تنش تسليم ورق انتهايي(F_{py}) در زير ارائه شده‌اند.

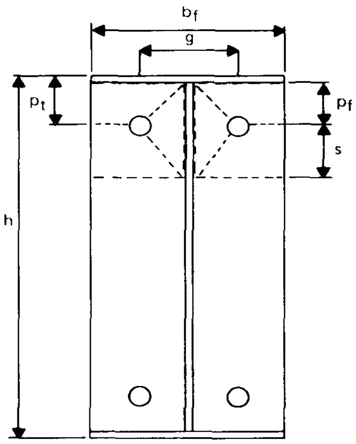
$$t_p = \left[\frac{M_u / F_{py}}{(h-p_t)\left[\left(b_f/2\right)\left(1/p_f + 1/s\right) + \left(p_f + s\right)\left(2/g\right)\right]} \right]^{1/2}$$

(۱)

$$M_{pl} = F_{py} t_p^2 \left\{ (h-p_t)\left[\left(b_f/2\right)\left(1/p_f + 1/s\right) + \left(p_f + s\right)\left(2/g\right)\right] \right\}$$

(۲)

معادلات فوق بر اساس مدل کنترل کننده خطوط تسليم حاکم براي اتصال ورق انتهايي هم تراز با دو پيچ بهمراه فواصل مختلف که در شکل (۱۶) نشان داده، ارائه شده است.



شکل ۱۶ : مدل خطوط تسليم اتصال.

در اين معادلات و شکل ۱۶ فاصله s برابر است با

$$s = \frac{1}{2}\sqrt{b_f \cdot g}$$

(۳)

تئوري خطوط تسليم براي پيش بيني مقاومت ورق بکار مي رود. اما اين تئوري نيرويي که توسط پيچ‌ها تحمل مي شوند را ناديده مي گيرد._کندي و همکارانش [۱۱] روشي را براي پيش بيني نيروي پيچ‌ها که شامل نيروهاي اهرمي[۹] نيز گرديده براي اتصالات ورق انتهايي پيشنهاد نموده اند. فرض اين است که ناحيه کششي اتصال ورق انتهايي خمشي بسيار شبيه ناحيه کششي در اتصال Split-Tee عمل مي کند. بدين صورت که جان تير ناديده گرفته ميشود و فرض ميشود که بال کششي تير به عنوان جان مقطع T شکل رفتار مي کند. روش ذيل براي پيش بيني نيروهاي اهرمي قابل کاربرد است. نيروي پيچ برابر با مجموع قسمتي از نيروي بال و نيروهاي اهرمي است. ميزان نيروي اهرمي به حالت رفتار ورق انتهايي وابسته است، که اين رفتار به سه گونه تقسيم بندي مي شود. اگر رفتار ورق انتهايي به صورت ضخيم باشد، نيروي اهرمي قابل صرفنظر و معادل صفر مي باشد. اگر حالت رفتار ورق انتهايي به صورت نازك باشد، نيروي

اهرمي حداكثر مقدارش مي باشد. اگر رفتارش بصورت متوسط باشد، مقدار نيروي اهرمي بين صفر و حداكثر مقدار آن است. براي پيش بيني نيروي پيچها بهمراه نيروهاي اهرمي در آن، انجام مراحل ذيل بترتيب پيشنهاد مي گردد:

۱- براي لنگر خمشي وارد شده بر ورق انتهائي كه لازم است نيروي پيچ‌ها به ازاي آن تعيين گردد، نيروي كوپل بالها بشرح زير محاسبه مي شود.

$$F_f = M_u/\left(d - t_f\right)$$

(۴)

كه در رابطه فوق M_u حداكثر لنگر خمشي، d عمق تير و t_f ضخامت بال تير مي باشد.

۲- حد ورق ضخيم (t_1) از معادلة تكراري ذيل محاسبه مي شود:

$$t_1 = \sqrt{\frac{4p_f F_f}{b_f\sqrt{\left(F_{py}^2 - 3\left(\frac{F_f}{b_f t_1}\right)^2\right)}}}$$

(۵)

پس از محاسبه حد ورق ضخيم، ضخامت واقعي ورق انتهايي (t_p) با آن مقايسه ميشود. اگر $t_p>t_1$، آنگاه نيروي اهرمي صفر در نظرگرفته مي‌شود؛ و نيروي پيچ (B) در اين حالت معادل نصف نيروي بال تير كه از رابطه (۶) محاسبه مي‌شود.

$$B = \frac{F_f}{2}$$

(۶)

در غير اين صورت گام بعدي انجام ميشود.

۳- حد ورق نازك (t_{11}) از معادلة تكراري زير محاسبه مي شود:

$$t_{11} = \sqrt{\frac{2(F_f p_f - \pi d_b^3 F_{yb}/16)}{\frac{b_f}{2}\sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F_f}{b_f t_{11}}\right)^2} + w'\sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F_f}{2w' t_{11}}\right)^2}}}$$

(۷)

كه درآن F_{yb} تنش تسليم پيچ، d_b قطر پيچ و `w عرض بال تير مي‌باشند. سپس مقدار t_p با t_{11} مقايسه مي‌شود. اگر $t_p>t_{11}$ ، ورق درحالت متوسط مي‌باشد، كه درآنصورت براي تعيـين نيروي اهــرمي (Q) از رابطه (۸) استـــفاده مي شود.

$$Q = \frac{F_f p_f}{2a} - \frac{b_f t_p^2}{8a}\sqrt{F_{py}^2 - 3\left[\frac{F_f}{b_f t_f}\right]^2} - \frac{\pi d_b^3 F_{yb}}{32a}$$

(۸)

كه a بر حسب ميليمتر از معادله (۹) محاسبه مي‌شود.

$$a = \frac{9352}{100}\left(\frac{t_p}{d_b}\right)^3 - \frac{2159}{1000}$$

(۹)

و نيروي پيچ براي اين حالت از رابطه (۱۰) محاسبه مي‌شود.

$$B = \frac{F_f}{2} + Q$$

(۱۰)

۴- اگر $t_{11}>t_p$ ، ورق انتهايي درحالت نازك مي‌باشد و نيروي اهرمي بيشترين مقدار را بشرح ذيل دارد.

$$Q_{max} = \frac{w' t_p^2}{4a}\sqrt{F_{py}^2 - 3\left(\frac{F'}{w' t_p}\right)^2}$$

(۱۱)

كه نيروي F' حداقل دو مقدار زير است.

$$F_{Limit} = \frac{t_p^2 F_{py}(0.85 b_f/2 + 0.8\,w') + \pi d_b^3 F_{yb}/8}{4p_f}$$

(۱۲)

يا

$$F_{max} = \frac{F_f}{2}$$

(۱۳)

نيروي پيچ براي اين اتصال مشابه با معادله (۱۰) بوسيله رابطه زير محاسبه مي‌شود:

$$B = \frac{F_f}{2} + Q_{max}$$

(۱۴)

لازم به توضيح است كه تغييرات زياد در هندسه اتصال ورق انتهايي ممكن است بر مدل كنترل كننده خطوط تسليم تأثير گذار باشد. لذا معادلات ارائه شده محدوديتهايي را در مورد ابعاد و خصوصيات مصالح در بر خواهد داشت.

نتايج تحليل لرزه اي و مقايسه با نتايج روابط طراحي

با استفاده از معادلات ارائه شده، لنگرهاي ظرفيت براي تعدادي از اين نوع اتصال محاسبه مي‌شوند؛ و بعد با نتايج حاصل از تحليل اين نمونه ها تحت بار متناوب به

روش اجزاء محدود مقايسه مي گردند. در نمونه‌هاي بررسي شده، سه پارامتر اصلي يعني ضخامت ورق انتهايي، قطر پيچ و درجة پيچ متفاوت است و ديگر خصوصيات اتصال در تمامي نمونه‌ها يكسان بوده كه در جدول (۴) ارائه گرديده است.

در اين جدول ابعاد بر حسب ميليمتر و تنش بر حسب مگاپاسگال مي باشد.

جدول ۴ : ابعاد و مشخصات كلي اتصال مورد مطالعه.

ارتفاع ورق انتهايي (h)	۲۷۵
عرض ورق انتهايي (b_f)	۲۰۰
فاصله پيچ تا انتهاي تير (p_f)	۶۰
فاصلة افقي پيچ‌ها (g)	۹۰
عرض بال تير (w')	۱۴۶
ضخامت بال تير (t_f)	۱۰/۹
ارتفاع تير (d)	۲۵۴
تنش تسليم ورق انتهايي (F_{py})	۲۴۰

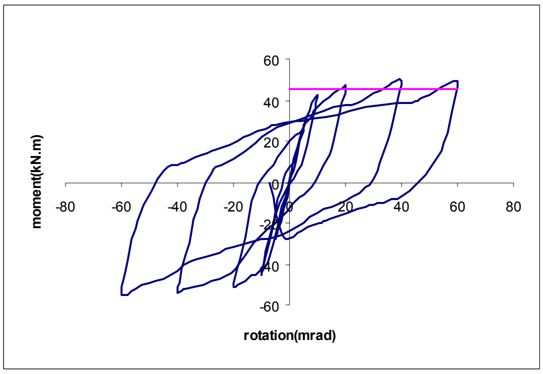
جدول (۵) جزئيات و خصوصيات هر نمونه و نتايج حاصل از كاربرد معادلات پيش بيني بدست آمده از تئوري خطوط تسليم براي ورق نتهايي و روش كندي [۷] براي پيچها كه در قسمت قبلي ارائه شدند را نشان مي دهد.

در اين جدول، محدودة ضخامت ورق براي تعيين نوع رفتار آن، نوع رفتار ورق براي تعيين نيروهاي اهرمي، لنگر ظرفيت براي ورق و حداكثر لنگر قابل تحمل با توجه به نيروي نهايي پيچها را نشان مي دهند. در جدول اشاره شده، ابعاد به ميليمتر و مقادير لنگرها بر حسب كيلونيوتن-متر ارائه شده اند.

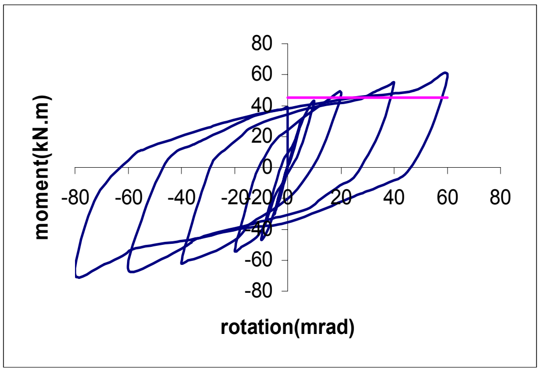
نتايج بدست آمده از معادلات طراحي با نتايج حاصل از تحليل به روش اجزاء محدود، مقايسه گرديده است. شكلهاي (۱۷) الي (۲۴) منحني هاي هيسترزيس بدست آمده از تحليل به روش اجزاء محدود براي بارگذاري مطابق پروتكل (شكل ۷) و خط متناظر با لنگر طراحي را براي EPN1 الي EPN8 نشان مي دهد.

جدول ۵ : نتايج حاصل از كاربرد معادلات طراحي.

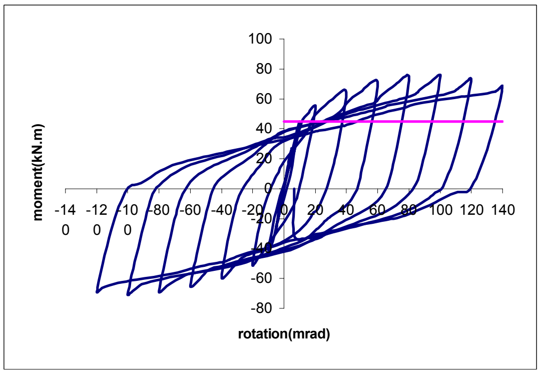
نمونه	ضخامت ورق (t_p)	قطر پيچ (d_b)	تنش تسليم پيچ (F_{yb})	محدوده بالا ضخامت ورق (t_1)	محدوده پائين ضخامت ورق (t_{11})	نوع رفتار ورق	لنگر ظرفيت ورق (M_{pl})	حداكثر لنگر قابل تحمل بر اساس نيروي پيچ (M_{bu})
EPN1	12	20	640	35	26	نازك	45	70
EPN2	12	20	900	39	29	نازك	45	103
EPN3	12	25	640	37	27	نازك	45	78
EPN4	20	16	900	37	28	نازك	126	78
EPN5	20	25	640	46	34	نازك	126	116
EPN6	20	20	640	37	28	نازك	126	79
EPN7	20	20	900	46.5	35	نازك	126	119
EPN8	16	20	640	36	27	نازك	80.7	74



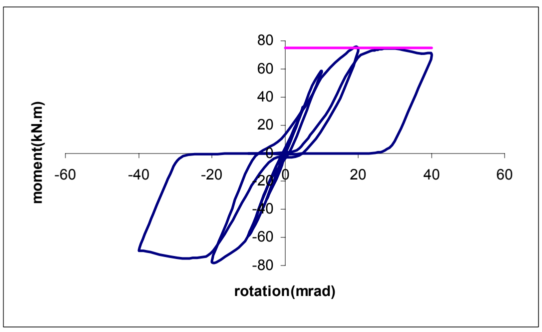
شکل ۱۷ : نمونه EPN1 .



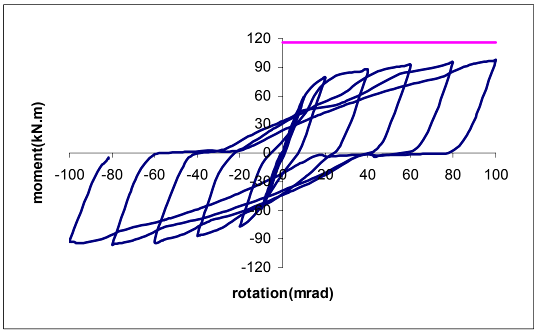
شکل ۱۸ : نمونه EPN2.



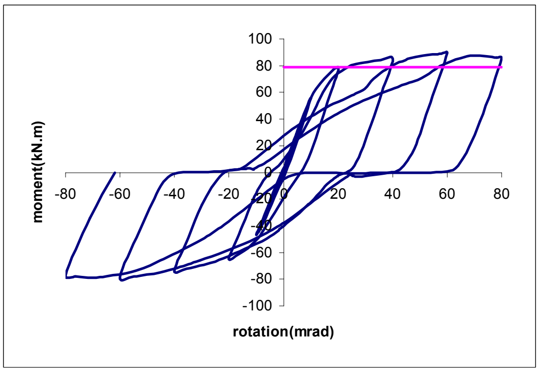
شکل ۱۹ : نمونه EPN3.



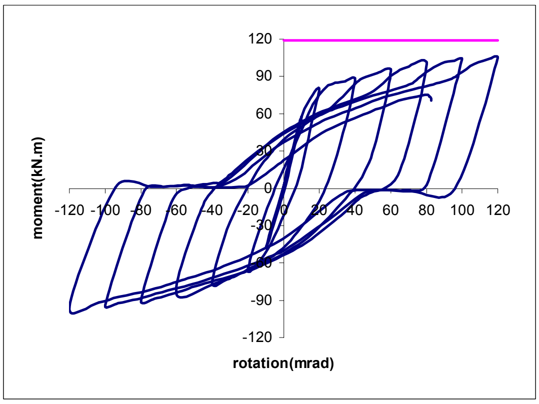
شکل ۲۰ : نمونه EPN4.



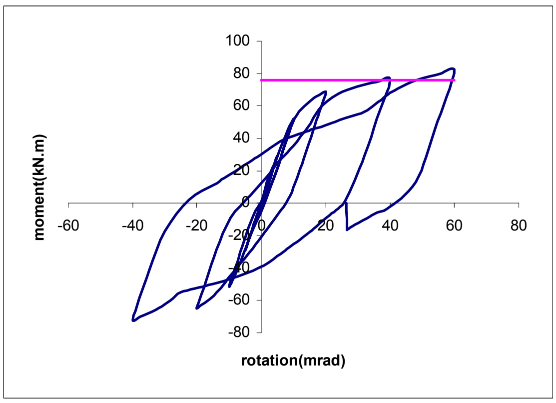
شکل ۲۱ : نمونه EPN5 .



شکل ۲۲ : نمونه EPN6 .



شکل ۲۳ : نمونه EPN7.



شکل ۲۴ : نمونه EPN8 .

در جدول (۶) نتايج تحليل مدل اتصال و مقايسه آنها با نتايج حاصل از كاربرد معادلات طراحي اتصال ارائه شده است. همانگونه كه مشاهده مي‌شود براي نمونه‌هايي كه در آنها پيچ عضو كنترل كننده است (مانند نمونه هاي EPN1، EPN4، EPN6 و EPN8) نسبت لنگر طراحي و لنگر بدست آمده از تحليل اتصال به روش اجزاء محدود كاملا قابل قبول است و اين نشان مي دهد كه روابط موجود براي پيش بيني نيروي پيچ به خوبي در بارگذاري متناوب نيز سازگار هستند. اما در نمونه هايي كه ورق انتهايي عضو كنترل كننده است (مانند EPN2 و EPN3) ميزان لنگر قابل تحمل براي اتصال بر اساس معادلات پيش بيني بسيار محافظه كارانه مي باشند و لنگر ظرفيت واقعي بيش از لنگر پيش بيني شده در روابط مي باشد. براي توجيه اين مساله دو نكته ذيل قابل ذكر است:

جدول ۶ : مقايسه معادلات طراحي با تحليل لرزه اي.

نمونه	اجزاء محدود		معادلات طراحي	طراحي/ اجزاء محدود
	لنگر تسليم (M_y)	لنگر نهايي (M_u)	لنگر نهايي (M_u)	نسبت لنگرهاي نهايي به يكديگر
EPN1	40.5	50	45	**0.90**
EPN2	39	69	45	**0.65**
EPN3	44	75	45	**0.60**
EPN4	49	79	78	**0.99**
EPN5	55	98	116	**1.18**
EPN6	60	82.5	79	**0.96**
EPN7	59	105	119	**1.13**
EPN8	51.5	80.5	74	**0.92**

۱- كلاً روش خطوط تسليم كه براي تعيين مقاومت ورق بكاررفته، روش محافظه كارانه اي مي باشد.

۲- در روابط موجود تنها توانايي ورق تا نقطه تسليم آن در نظر گرفته مي شود؛ حال آنكه همانگونه كه در منحني هاي هيسترزيس هم ديده شد، ورق پس از تسليم شدن نيز قادر به تحمل لنگر تا رسيدن به لنگر نهايي مي باشد.

در مورد نمونه هاي EPN5 و EPN7 كه در آن لنگر پيش بيني شده به ترتيب ۱۱۶ و ۱۱۹ كيلونيوتن- متر مي باشند و لنگر تحمل شده كمتر از اين مقدارها مي باشند، بايد اضافه نمود كه در اين نمونه ها تير با لنگر حدود ۱۰۰ كيلونيوتن- متر شروع به پلاستيك شدن مينمايد و بنابراين عدم توانايي اتصال براي تحمل لنگر پيش بيني شده، مشاركت تير در گسيختگي و شكست اتصال مي باشد.

نتيجه گيري

در اين مقاله مدلسازي اتصال با ورق انتهايي هم تراز و تحليل آن به روش اجزاء محدود ارائه شده است. چندين نمونه از اين اتصال تحليل گرديده و نتايج بدست آمده با نتايج آزمايشگاهي مقايسه گرديد. با توجه به مطالب ارائه شده، مي توان نتيجه گرفت كه روش اجزاء محدود با مدلسازي سه بعدي، ميتواند رفتار اتصال با ورق انتهايي هم تراز را تحت بارهاي متناوب بخوبي پيش بيني كند. با عنايت به پيچيدگي ها و مشكلات زيادي كه در كار آزمايشگاهي ديده ميشود و با توجه به دقت مدل ارائه شده، استفاده از مدل اجزاء محدود اين اتصال ميتواند جهت جايگزيني مدل آزمايشگاهي براي مطالعات و بررسيهاي عميق تر بسيار مفيد و كارگشا باشد.

روابط طراحي ارائه شده براي رفتار ورق انتهايي كه با استفاده از تئوري خطوط تسليم بدست آمده اند، ظرفيت براي ورق انتهايي هم تراز را در بارگذاري متناوب در اغلب نمونه ها به خوبي پيش بيني نموده كه اكثراً بصورت محافظه كارانه اي مي باشد. معادلات پيش بيني نيروي پيچ كه از روش اصلاح شدهٔ كندي و همكارانش بدست آمده‌اند، بخوبي مي تواند رفتار اين عضو را تحت بار گذاري متناوب پيش بيني كند و براي طراحي اين اتصال نيز بكار برده شود.

مراجع

1 - European committee for standardization, (1998). Eurocode 3: part 1.1., Revised Annex J: Joints in building frames, Env 1993-1-1: 1992/A2.

2 - Davison, J. B., Kirby, P. A. and Nethercot, D. A. (1987). "Rotational stiffness characteristics of steel beam to column connections." *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 8, PP. 17-54.

3 - Bose, B. and Hughes, A. F. (1995). "Verifying the performance of standard ductile connections for semi continuous steel frames." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, Vol. 110, PP. 441-457.

4 - Shi, Y. J., Chan, S. L. and Wong, Y. L. (1996). "Modeling for moment-rotation characteristics for end plate connections." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, PP. 1300-1306.

5 - Broderick, B. M. (2002). "The response of flush end-plate joints under earthquake loading." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, PP. 1161-1175.

6 - Bahaari, M. (1998). "Numerical modeling of flush endplate bolted connections." *Journal of Faculty of Engineering , University of Tehran*, Vol. 31, No.2, PP. 9-18.

7 - European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), (1986). Recommendation testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cyclic loading. In: Technical Committee 1: Structural Safety and Loading.

8 - Thomson, A. W. and Broderick, B. M. (2000). "Seismic resistance of flush end-plate connections." *The Structural Engineer*, Vol. 78, No. 17, PP. 28–33.

9 - FEMA (2000). FEMA-350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., U.S.A.

10 - Srouji, R., Kukerti, A. R. and Murray, T. M. (1983). "Yield-Line analysis of end-plate connections with bolt force predictions." *Research Report No. FSEL/MbMA 83-05*, Fears Structural Engineering Laboratory, School of Civil Engineering Laboratory, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, U.S.A.

11 - Kennedy, N. A., Vinnakota, S. and Sherbourne, A. N. (1981). "The split-tee analogy in bolted splices and beam-column connections." *Proceedings of The International Conference on Joints in Structural Steelwork; The Design and Performance of Semi-Rigid and Rigid Joints in Steel and Composite Structures and Their Influence on Structural Behavior*, Teesside Polytechnic, Middleborough, U.K., PP. 2.138-2.157.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - High Strength Bolt
2 - Pre-tension
3 - Flush End-plate
4 - Extended End-plate
5 - Monotonic Loading
6 - Yield Line Theory
7 - Cyclic Loading
8 - Hysteresis
9 - Prying Force