

## بررسی مکانیسم شکست در اتصالات دو طرف فولادی متصل به کامپوزیت به وسیله پیچ و چسب

امیرحسین ذاکری<sup>۱\*</sup>، اصغر وطنی اسکویی<sup>۲</sup>، سعید معدنی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

### چکیده

در این مطالعه رفتار اتصال صفحه کامپوزیتی به پروفیل‌های فولادی به وسیله پیچ (اتصالات پیچی) و رفتار اتصال صفحه کامپوزیتی به پروفیل‌های فولادی به وسیله پیچ و چسب (اتصالات ترکیبی) مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار برای طراحی اتصالات با بست های مکانیکی (پیچ، پرچ و ...)، فاصله بست های مکانیکی از لبه اتصال است (فاصله پایانی پیچ در اتصال). در آیین‌نامه‌ها، استانداردهای فاصله بست های مکانیکی از لبه‌ها و فاصله بست های مکانیکی از هم آورده شده است. منظور از فاصله پایانی پیچ برای اتصالات پیچی و ترکیبی که در بالا گفته شد، فواصل در محدوده استانداردهای تعیین شده برای فاصله پیچ‌ها از لبه‌ها و پیچ‌ها از هم است. در این بخش از مطالعه، اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی با فواصل پایانی متفاوت پیچ‌ها از لبه‌های اتصالات مدل سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، تأثیر اساسی فاصله پایانی پیچ از لبه‌های اتصال بر مقاومت و مکانیسم شکست اتصالات پیچی را نشان داد. در اتصالات ترکیبی، برخلاف اتصالات پیچی، فاصله پایانی پیچ در راستای نیرو و عمود بر راستای نیرو، تأثیر جزئی بر مقاومت و مکانیسم شکست اتصال داشته است. یکی دیگر از موضوعاتی که در این مطالعه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است، تأثیر افزایش طول هم‌پوشانی المان‌های اتصال بر افزایش مقاومت اتصال بوده است. جهت بررسی تأثیر طول هم‌پوشانی بر مقاومت اتصالات، اتصالات ترکیبی با پیکربندی یکسان و طول هم‌پوشانی متفاوت المان‌های اتصال، مدل سازی شده است. نتایج، رابطه مستقیم بین افزایش طول هم‌پوشانی و افزایش مقاومت در اتصال را نشان داد. در نهایت معیار مناسب طراحی اتصالات ترکیبی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: اتصالات پیچی، اتصالات ترکیبی (پیچی و چسبی)، مکانیسم شکست اتصالات، کامپوزیت‌ها، طول هم‌پوشانی المان‌های اتصال.

\*نویسنده مسئول: امیرحسین ذاکری

پست الکترونیکی: amir.zakeri3060@gmail.com

DOI: 10.22065/jsce.2017.44437

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.44437>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶

## ۱- مقدمه

مطالعات عددی و تجربی بر روی اتصالات کامپوزیت باهدف استفاده در سازه‌های هوایی و فضایی آغاز شده است [۱-۲]. مجموعه‌های مکانیکی هوانوردی که از بست‌ها ساخته شده است همواره شامل یک‌لایه چسب یا پرکن مایع بوده است تا از آب‌بندی اطمینان حاصل شده و از پدیده سایش حاصل از لرزش جلوگیری به عمل آید. کارکرد سازه‌های این ماده‌ی واسط به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته و تقریباً هیچ‌وقت هنگام پیش‌بینی استحکام مجموعه مورد توجه قرار نگرفته است. در برخی کاربردها، سازندگان اتصالات متشکل از لایه چسبیده برنامه‌ریزی می‌کنند تا لایه چسبیده را به‌عنوان قطعه‌ای سازه‌ای برای کاهش تعداد بست‌ها یا افزایش کارایی اتصال مکانیکی بکار گیرند. در چنین حالتی، بارگذاری مجموعه هم از طریق بست‌ها و هم ماده چسبی منتقل می‌شود و اتصال به‌عنوان یک اتصال ترکیبی تعریف می‌شود.

نوع اتصال کامپوزیت به پروفیل‌های فولادی به‌طور معمول به‌وسیله چسب، بست‌های مکانیکی و یا ترکیبی از این دو است. معمولاً استفاده از ترکیب چسب و بست‌های مکانیکی جهت کاهش ضعف‌های لایه چسبیده است که ممکن است بعضاً باعث خرابی زودهنگام و یا یک مکانیسم شکست نامناسب در اتصال شود [۳]. در سال ۲۰۱۱ محققان ژاپنی [۴] مطالعات کاملی بر روی رفتار اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی (پیچی و چسبی) و مقایسه مقاومت اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی انجام داده و مشخص شد که اتصالات ترکیبی سختی بیشتری به نسبت اتصالات پیچی داشته‌اند.

مطالعات محدودی در زمینه‌ی استفاده از کامپوزیت در زمینه‌ی زیرساخت‌های مهندسی انجام شده است. مطالعات انجام شده، مؤلفه‌های مختلف کامپوزیت نظیر ساختار، پیدایش، نحوه تولید، لایه‌بندی کامپوزیت‌ها و... را پوشش داده است [۵]. با این حال مطالعات مجدد برای درک کامل خصوصیات اتصالات کامپوزیتی لازم است. در این مطالعه به بررسی رفتار اتصالات دو طرف پوششی فولادی متصل به کامپوزیت به‌وسیله پیچ و چسب پرداخته شده است. دو نوع اتصالات دو طرف پوششی فولادی شامل اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات انجام شده نشان داده است که رفتار اتصالات پیچی و ترکیبی در برابر نیروی کششی به نسبت نیروی فشاری مناسب‌تر بوده است. ۷ مکانیسم شکست برای اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی معرفی شده است که عبارت‌اند از: شکست برشی خارجی، گسیختگی قسمت تحمل‌کننده بار در اتصال، شکست بر اثر گسیختگی کششی، شکست پانچی (منگنه‌ای)، شکست پیچ، شکست کششی خالص مقطع اتصال و یا ترکیب مکانیسم‌های شکست ذکر شده. از شکست اتصال به دلیل گسیختگی قسمت تحمل‌کننده بار به‌عنوان مطلوب‌ترین مکانیسم شکست در اتصالات نام برده شده است. برای جلوگیری از این مکانیسم شکست در اتصالات، استفاده از تعداد پیچ بیشتر با قطر کم به جای پیچ کمتر با قطر بالا، افزایش گشتاور پیچ و واشر با قطر مناسب توصیه شده است [۶]. پارامترهای تأثیرگذار زیادی برای تحلیل و طراحی اتصالات شناخته شده است. قطر پیچ، لقی پیچ، ضخامت المان‌های اتصال، عرض و طول المان‌های اتصال، نسبت فاصله لبه‌های اتصال به قطر پیچ، مقاومت کششی نهایی المان‌های اتصال و مقاومت برشی نهایی المان‌های اتصال به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای تحلیل و طراحی اتصالات معرفی شده است [۷].

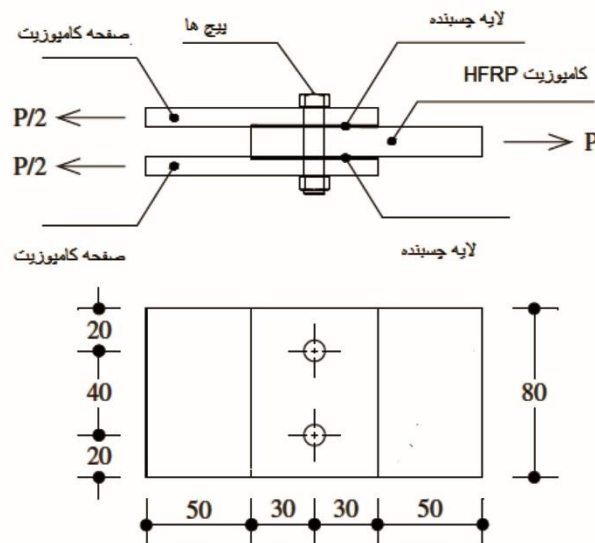
در این مطالعه در خصوص تأثیر فاصله پایانی پیچ‌ها در اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی بر مقاومت اتصال، تأثیر طول هم‌پوشانی در مقاومت اتصال و مکانیسم شکست اتصالات پرداخته شده است و در انتها معیارهای طراحی برای اتصالات ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تحلیل اجزای محدود

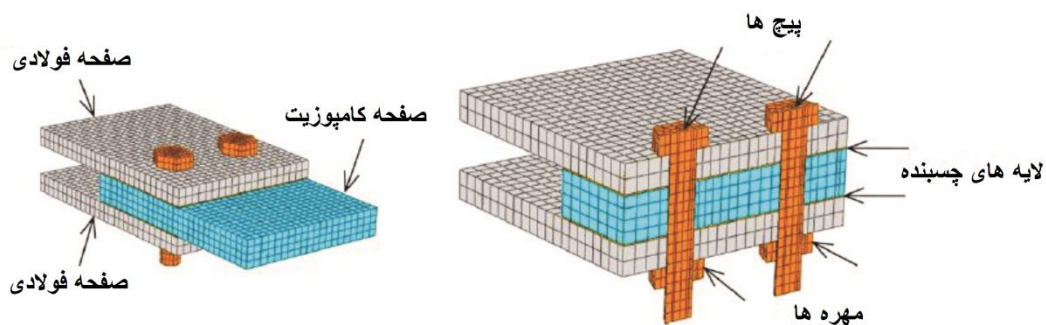
## ۲-۱ هندسه و مش اجزای محدود

جهت بررسی رفتار اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی، دو مدل اتصال شامل اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی مدل‌سازی شده است. اتصالات پیچی متشکل از دو صفحه فولادی، یک صفحه کامپوزیت، دو عدد پیچ و اتصالات ترکیبی متشکل از دو صفحه فولادی، یک صفحه

کامپوزیت، دو عدد پیچ و لایه چسبنده بوده است. تمامی اتصالات (پیچی و ترکیبی) دارای عرض یکسان و برابر با ۸۰ میلی‌متر ( $w = 80mm$ ) بوده است. ضخامت برای صفحه کامپوزیتی ۱۴ میلی‌متر و برای صفحات فولادی ۹ میلی‌متر بوده است. ضخامت لایه چسبنده در اتصالات ترکیبی ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فاصله پیچ از لبه اتصال ۲۰ میلی‌متر ( $s = 20mm$ )، فاصله مرکز پیچ‌ها از هم ۴۰ میلی‌متر ( $g = 40mm$ ) و فاصله پیچ‌ها از لبه در امتداد طولی ۳۰ میلی‌متر ( $e = 30mm$ ) بوده است. همچنین قطر پیچ‌های استفاده شده در اتصالات ۱۰ میلی‌متر ( $d = 10mm$ ) بوده است. در نتیجه نسبت عرض کامپوزیت به قطر پیچ ( $w/d = 8$ )، نسبت فاصله پیچ‌ها از لبه در امتداد عرضی به قطر پیچ ( $d/s = 2$ )، نسبت فاصله پیچ‌ها از هم به قطر پیچ ( $d/g = 4$ ) و نسبت قطر پیچ به ضخامت صفحه فولادی ۱/۱ بوده است (شکل ۱). ابعاد انتخاب شده مشابه با ابعاد اتصالات آزمایشان تجربی نگونین داک‌هایی و همکاران در سال ۲۰۱۱ بوده است [۴]. در تمامی نمونه‌ها، پیچ‌ها بدون لقی با مهره‌ها مدل‌سازی شده است. یک ضریب اصطکاک ۰/۲ مابین پیچ‌ها و مهره‌ها، کامپوزیت‌ها و ورق‌های فولادی، در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: پیکربندی و فواصل المان‌های اتصالات دو پیچی (فواصل برحسب میلی‌متر بوده است).



شکل ۲: نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

در آزمایش‌های عملی انجام شده با ابعاد ذکر شده، مناسب‌ترین گشتاور پیچ‌ها ۲۰ نیوتن متر بوده است و تأثیر واشرها در مقاومت ناچیز در نظر گرفته شده است [۴]. در این مطالعه در تمامی اتصالات گشتاور ۲۰ نیوتن متر برای پیچ‌ها اعمال شده است.

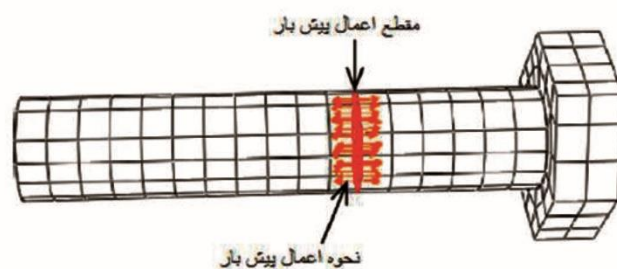
تحلیل تعیین شده نرم‌افزاری در ۲ مرحله متوالی انجام شده است:

۱- پیش بارگذاری اولیه: که این بارگذاری در مرکز پیچ اعمال شده است (شکل ۳). مقدار پیش بارگذاری اولیه با در نظر گرفتن گشتاور ۲۰ نیوتن متر برای پیچ از رابطه (۱) محاسبه شده است:

$$T = F_p (KD) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $T$  گشتاور پیچ ( $T = 20Nm$ )،  $F_p$  پیش بارگذاری اولیه پیچ،  $D$  قطر پیچ ( $D = 10mm$ ) و  $K$  ضریب ثابت مربوط به مهره‌ها است (بر اساس نظریه بیک فرد مقدار  $K$  برابر با  $0.2$  در نظر گرفته شده است [۸]). با استفاده از رابطه ۱ مقدار پیش بار اولیه محاسبه شده است ( $F_p = 10kN$ ).

۲- در این مرحله بارکشی به یک انتهای اتصال که اجازه حرکت در بعد طولی را دارد، وارد شده است و دیگر انتهای اتصال به صورت ثابت در تمامی جهات مدل سازی شده است.



شکل ۳: اعمال پیش بار پیچ در مرکز سطح پیچ [۴].

## ۲-۲ مدل سازی مصالح در اجزای محدود

### ۱-۲-۲ مدل سازی چسب

المان چسب به صورت یک لایه چسبیده با ضخامت در اتصالات ترکیبی در نظر گرفته شده است. خسارت و شکست لایه چسبیده با استفاده از قانون کشش-جدایی مدل سازی شده است. داده‌های ورودی برای مدل سازی لایه چسبیده شامل خواص الاستیک (مدول یانگ، مدول برشی اولیه و مدول برش ثانویه)، شروع خسارت (در جهت معمولی، در جهت برشی اولیه و در جهت برشی ثانویه) و انرژی‌های بحرانی شکست (در جهت معمولی، در جهت برشی اولیه و در جهت برشی ثانویه) مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.  $E$  مدول یانگ،  $G_1$  مدول برشی اولیه و  $G_2$  مدول برشی ثانویه است.  $G_s^c$ ،  $G_n^c$  و  $G_t^c$  انرژی شکست بحرانی لازم برای شکست در جهت برشی نرمال، اولیه و ثانویه است.  $t_s^0$  و  $t_n^0$ ،  $t_t^0$  شروع خسارت برای تغییر شکل در جهت نرمال، برشی اولیه و برشی ثانویه است. خسارت لایه چسبیده اتصالات شبیه سازی شده در این مطالعه با استفاده از معیار تنش ماکسیمم عددی مدل سازی شده است (رابطه (۲)) [۹].

$$Max \left\{ \left( \frac{t_n}{t_n^0} \right), \left( \frac{t_s}{t_s^0} \right), \left( \frac{t_t}{t_t^0} \right) \right\} = 1 \quad (2)$$

چسب مدل سازی شده در این مطالعه از نوع سیکادور-۳۰ بوده است [۱۰].

جدول ۱: داده های ورودی اجزا محدود برای چسب [۱۰]

خواص الاستیک		
$E \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۷۵۰۰	$G_1 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۷۵۰۰	$G_2 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۷۵۰۰
شروع خسارت		
$t_n^0 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۲۰	$t_s^0 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۱۰	$t_t^0 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ۱۰
انرژی شکست بحرانی		
$G_n^c \left( \frac{N}{mm} \right)$ ۰/۰۶۱	$G_s^c \left( \frac{N}{mm} \right)$ ۰/۴۶	$G_t^c \left( \frac{N}{mm} \right)$ ۰/۴۶

## ۲-۲-۲ مدل سازی صفحه های فولادی، صفحه کامپوزیت ترکیبی و پیچ ها

مشخصات مکانیکی پیچ های ضدزنگ، ورق های فولادی و صفحه کامپوزیت ترکیبی مدل سازی شده مطابق جداول (۲-۳-۴) بوده

است.

صفحه های فولادی از جنس فولاد SS 400 و پیچ ها از فولاد SUS 304 بوده است. جهت کاهش پیچیدگی در مدل سازی اتصال، صفحه کامپوزیت ترکیبی به صورت همگن مدل سازی شده است. مقاومت کششی و فشاری کامپوزیت از آزمایش های مواد استخراج شده است [11]. فولادهای SS 400 و SUS 304 بر اساس استاندارد ژاپن می باشند. فولاد مشابه فولاد SS 400 در استاندارد المان، 44S17100-2 و در استاندارد جهانی، A36 و A283D - grade است. همچنین فولاد مشابه فولاد SUS 304 در استاندارد المان، CrNi 1810x 5DIN است.

جدول ۲: داده های ورودی اجزای محدود برای صفحه های فولادی، پیچ و مهره

صفحه فولادی	پیچ و مهره	اسم ماده
SS 400	SUS 304	نوع فولاد
۲۰۶۰۰۰	۱۹۷۰۰۰	مدول یانگ $E (Mpa)$
۰/۳	۰/۳	ضریب پواسون $\nu (-)$

جدول ۳: داده های ورودی اجزای محدود برای صفحه های فولادی، پیچ و مهره

اسم ماده	$\sigma_y (Mpa)$	تنش تسلیم	$\epsilon_p (-)$	کرنش پلاستیک
پیچ و مهره	۲۴۰		۰	
	۴۰۵		۰/۲۱	
صفحه فولادی	۲۰۵		۰	
	۵۲۰		۰/۴	

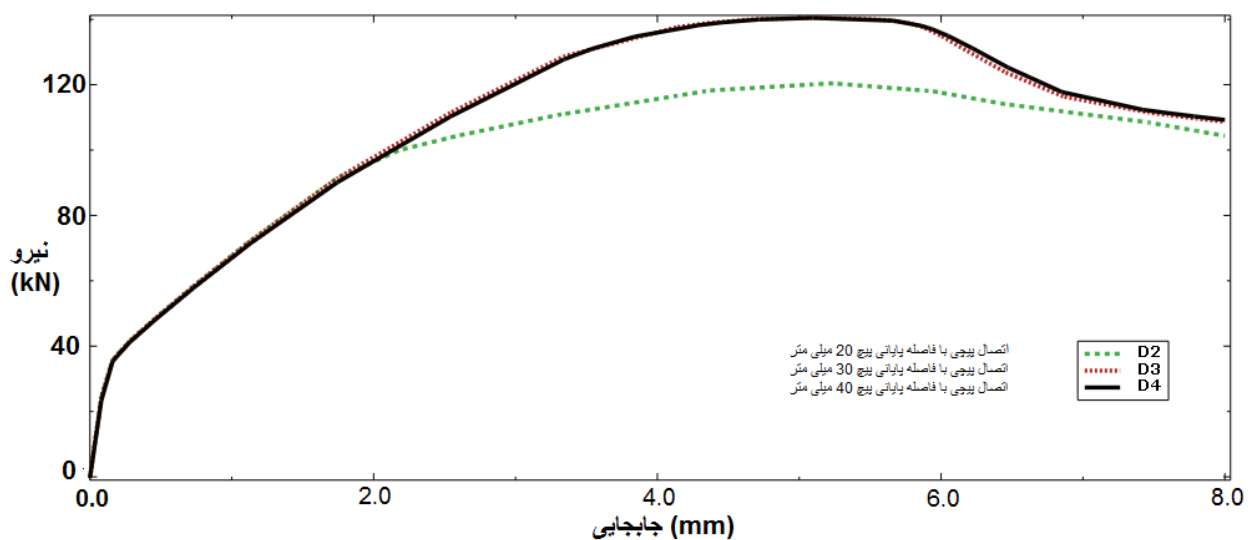
جدول ۴: داده‌های ورودی اجزای محدود برای صفحه کامپوزیت CFRP / GFRP

$E_{11}$ (Gpa)	$E_{22} = E_{33}$ (Gpa)	$G_{12} = G_{23}$ (Gpa)	$G_{13}$ (Gpa)	$\nu_{12} = \nu_{13}$ (-)
494	181	438	307	.23
$\nu_{23}$ (-)	$\sigma_{c11}^c$ (Mpa)	$\sigma_{c22}^d$ (Mpa)	$\sigma_{t11}^e$ (Mpa)	$\sigma_{t22}^g$ (Mpa)
.32	384	196	885	170

## ۳- نتایج مدل سازی

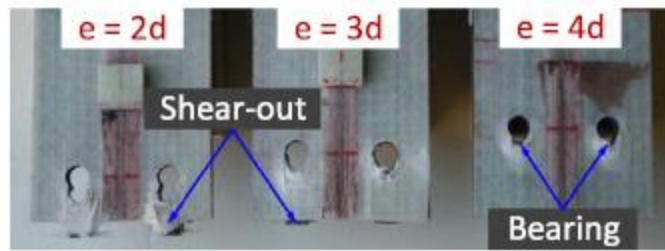
## ۳-۱ تأثیر فاصله پایانی پیچ از لبه‌ها برای اتصالات پیچی

جهت بررسی تأثیر فاصله پیچ پایانی در مقاومت اتصالات پیچی، ۳ نمونه اتصال بافاصله پایانی پیچ ۲۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر مدل‌سازی شده است (  $2d$ ،  $3d$  و  $4d$  که همان قطر پیچ شبیه‌سازی شده در اتصال بوده است). منظور از فاصله پایانی پیچ، فاصله پیچ از کناره صفحات فولادی در اتصال در جهت طولی بوده است (در امتداد نیروی کششی). در شکل ۴ نمودار نیرو - جابجایی برای نمونه اتصالات مدل‌سازی شده مشاهده می‌شود.



شکل ۴: نمودار نیرو-جابجایی برای اتصالات پیچی با فواصل پایانی متفاوت.

همان‌گونه که در نمودار نیرو-جابجایی شکل ۴ مشاهده می‌شود نمونه بافاصله پیچ پایانی ۲۰ میلی‌متر ( $2d$ ) دارای کمترین مقاومت و کم‌ترین بار شکست است و به دلیل شکست برشی در صفحه کامپوزیت، اتصال گسیخته شده است. نمونه‌ها با فواصل پیچ پایانی ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ ) و ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ )، دارای بار شکست مشابه اما مکانیسم شکست متفاوت می‌باشند. مکانیسم شکست در اتصالات بافاصله پیچ پایانی ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ )، شکست برشی در صفحه کامپوزیت و در اتصالات بافاصله پیچ پایانی ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ )، گسیختگی صفحه کامپوزیت در محل سوراخ پیچ‌ها و برش در پیچ‌ها بوده است که مکانیسم شکست مطلوب‌تری است (شکل ۵). در نتیجه با در نظر گرفتن مکانیسم شکست مطلوب نمونه بافاصله پیچ پایانی ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ ) در مقایسه با نمونه‌ها با فواصل پایانی ۲۰ میلی‌متر ( $2d$ ) و ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ )، باوجود اینکه سختی اتصالات پیچی بافاصله پیچ پایانی ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ ) و ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ ) مشابه است، در طراحی اتصالات دو طرف پوششی فولادی متصل به کامپوزیت به‌وسیله پیچ استفاده از فاصله پایانی  $4d$  توصیه می‌شود. ( $d$  قطر اسمی پیچ بوده است).

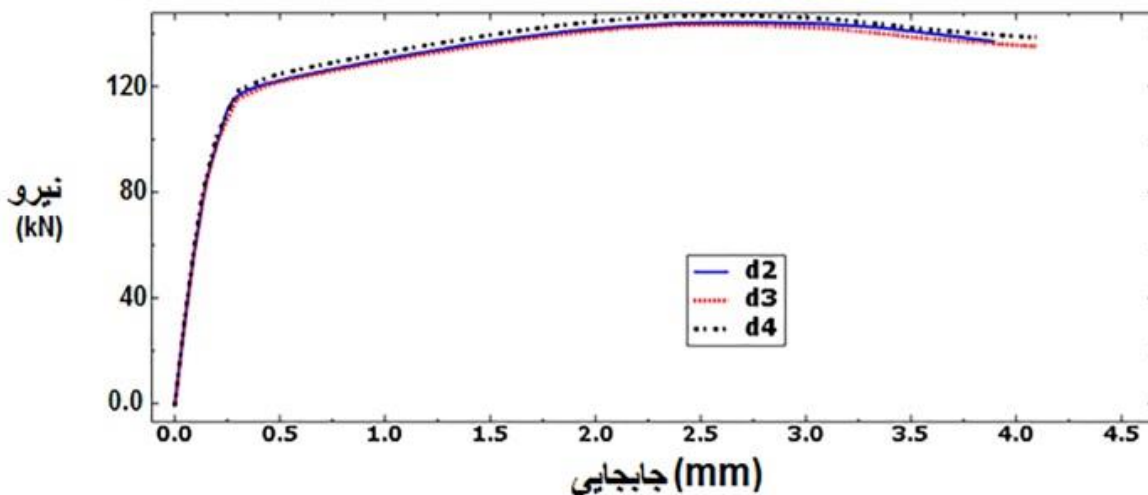


شکل ۵: مکانیسم شکست اتصالات پیچی بافاصله پایانی پیچ  $2d$ ،  $3d$  و  $4d$  در آزمایش‌های تجربی [۴].

همان‌طور که در نمودار نیرو-جابجایی شکل ۴ مشاهده می‌شود هر سه اتصال تا محدوده ۳۸ کیلو نیوتن رفتار خطی داشته‌اند. این رفتار خطی به دلیل پیش بار اولیه پیچ‌ها بوده است که باعث مقاومت اتصال در برابر لغزش اتصال شده است. در ادامه با افزایش بار اعمالی در اتصال، لغزش در اتصال آغاز شده است و رفتار اتصالات پیچی با فواصل پایانی پیچ‌ها غیرخطی شده است و شاهد بیشینه بار اتصالات پیچی با فواصل پایانی پیچ متفاوت بوده‌ایم. اتصال بافاصله پایانی پیچ ۲۰ میلی‌متر ( $2d$ )، دارای کمترین بار نهایی به میزان ۱۱۸ کیلو نیوتن بوده است. اتصالات پیچی بافاصله پایانی پیچ ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ ) و ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ ) دارای بار نهایی مشابه و به میزان ۱۳۰ کیلو نیوتن بوده‌اند. در انتهای نمودار نیرو-جابجایی مقدار بار نهایی شکست برای اتصالات پیچی با فواصل پایانی پیچ متفاوت مشاهده می‌شود. اتصال پیچی بافاصله پایانی پیچ ۲۰ میلی‌متر ( $2d$ )، دارای کمترین بار شکست نهایی و به میزان ۱۰۵ کیلو نیوتن بوده است. اتصالات پیچی بافاصله پیچ پایانی ۳۰ میلی‌متر ( $3d$ ) و ۴۰ میلی‌متر ( $4d$ ) بار نهایی شکست مشابه و به میزان ۱۱۰ کیلو نیوتن داشته‌اند.

### ۳-۲ تأثیر فاصله پایانی پیچ از لبه‌ها برای اتصالات ترکیبی در امتداد نیرو (پیچی و چسبی)

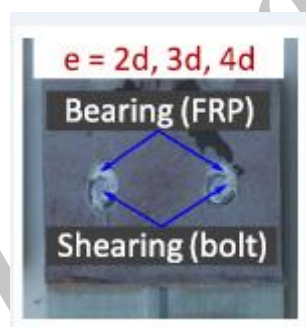
جهت بررسی تأثیر فاصله پایانی پیچ بر مقاومت اتصالات ترکیبی (در راستای نیرو)، همانند اتصالات پیچی، ۳ نمونه بافاصله پیچ پایانی ۲۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر و ۴۰ میلی‌متر مدلسازی شده است ( $2d$ ،  $3d$  و  $4d$  که همان قطر پیچ شبیه‌سازی شده در اتصال است). در شکل ۶ نمودار نیرو - جابجایی برای نمونه‌های مدلسازی شده، مشاهده می‌شود:



شکل ۶: نمودار نیرو - جابجایی برای اتصالات ترکیبی با فواصل پایانی متفاوت در امتداد نیرو برای پیچ‌ها.

همان گونه که در نمودار نیرو-جابجایی شکل ۶ نیز مشخص است، تمامی نمونه‌ها دارای سختی و بار شکست نهایی مشابه می‌باشند. همچنین مکانیسم شکست برای تمام نمونه‌ها مشابه بوده است. مکانیسم شکست در اتصالات ترکیبی، گسیختگی کامپوزیت در محل سوراخ پیچ‌ها بوده است (شکل ۷). دلیل تفاوت مکانیسم شکست اتصالات پیچی و اتصالات ترکیبی وجود لایه چسبنده در اتصالات ترکیبی بوده است. چسب قبل از گسیختگی اصلی لایه چسبنده، بیشترین بار را تحمل می‌کند. بعد از گسیختگی لایه چسبنده بار به پیچ‌ها منتقل می‌شود اما دیگر پیچ دچار شکست برشی، مانند آنچه در اتصالات پیچی اتفاق افتاده، نشده است. این موضوع بیان‌گر این مطلب است که شکست برشی پیچ‌ها به صورت ناگهانی اتفاق نمی‌افتد بلکه رفته‌رفته پیچ‌ها دچار شکست برشی می‌شوند. در نتیجه می‌توان گفت مقاومت اتصال و مکانیسم شکست در اتصالات پیچی به شدت به فاصله پیچ پایانی وابسته بوده است در حالی که در اتصالات ترکیبی فاصله پیچ پایانی به صورت جزئی در مقاومت و مکانیسم شکست اتصال تأثیرگذار بوده است.

سختی، بار نهایی اتصال و بار نهایی شکست اتصالات مدل‌سازی شده برای تعیین بهترین فاصله پایانی پیچ در اتصالات ترکیبی مشابه بوده است. مکانیسم شکست اتصالات ترکیبی با فواصل پایانی متفاوت یکسان بوده است. دلیل این امر وجود لایه چسبنده در اتصال بوده است. در اتصالات ترکیبی، بیشتر بار اعمالی تا محدوده ۱۱۵ کیلو نیوتن به لایه چسبنده وارد شده است (گسیختگی لایه چسبنده در این محدوده بار اتفاق افتاده است). به همین دلیل در اتصالات ترکیبی پیچ‌ها دچار شکست برشی نمی‌شوند و مکانیسم شکست این اتصالات گسیختگی صفحه کامپوزیت در محل سوراخ پیچ‌ها بوده است. همان‌طور که در نمودار نیرو-جابجایی شکل (۶) مشاهده می‌شود گسیختگی نهایی لایه چسبنده و بار نهایی شکست اتصالات ترکیبی با فاصله پایانی پیچ متفاوت مشابه بوده است. در ادامه مدل‌سازی‌های این مطالعه از فاصله پیچ پایانی  $3d$  برای اتصالات ترکیبی استفاده شده است ( $d$  قطر اسمی پیچ بوده است).



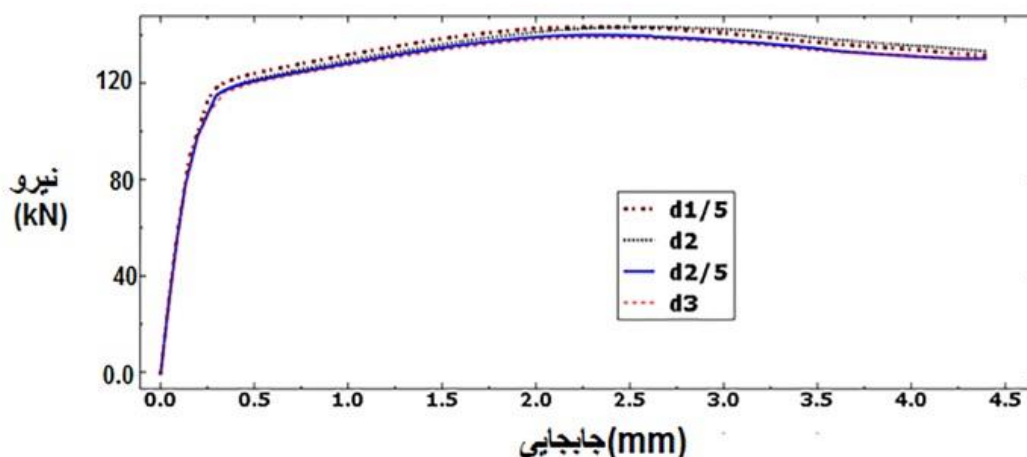
شکل ۷: مکانیسم شکست اتصالات ترکیبی با فاصله پایانی پیچ  $2d$ ،  $3d$  و  $4d$  در آزمایش‌های تجربی [۴].

همان‌طور که در نمودار نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی با فواصل پیچ پایانی متفاوت مشاهده می‌شود (شکل ۶)، لغزش در اتصالات تا قبل از محدوده بار اعمالی ۸۴ کیلو نیوتن رخ نمی‌دهد. پیش از بار اولیه پیچ‌ها و وجود لایه چسبنده در اتصال باعث مقاومت اتصال در برابر لغزش تا این لحظه بوده است. در این مرحله لایه چسبنده به صورت موضعی گسیخته می‌شود. گسیختگی لایه چسبنده از لبه‌های آزاد لایه چسبنده شروع شده و در نهایت کل سطح لایه چسبنده گسیخته شده است. تا قبل از گسیختگی کامل لایه چسبنده بیشتر بار توسط لایه چسبنده تحمل شده است و بعد از گسیختگی لایه چسبنده بار به پیچ‌ها منتقل می‌شود. گسیختگی لایه چسبنده و انتقال بار به پیچ‌ها در محدوده بار ۱۱۵ کیلو نیوتن اتفاق افتاده است. در نهایت بار شکست اتصالات ترکیبی در محدوده بار ۱۳۰ کیلو نیوتن و بار شکست نهایی اتصالات در محدوده بار ۱۲۴ کیلو نیوتن رخ داده است.



## ۳-۳ تأثیر فاصله پایانی پیچ از لبه‌ها در امتداد عمود بر نیرو برای اتصالات ترکیبی (پیچی و چسبی)

جهت بررسی تأثیر فاصله پیچ پایانی در امتداد عمود بر جهت نیروی کششی در افزایش مقاومت اتصالات ترکیبی، ۴ نمونه با فاصله پیچ‌های پایانی ۱۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر مدل‌سازی شده است (  $d/5$ ،  $2d$ ،  $2/5d$  و  $3d$  که  $d$  همان قطر پیچ شبیه‌سازی شده در اتصال است) و نمودار نیرو - جابجایی برای نمونه‌ها مطابق شکل (۸) به دست آمده است (  $d$  همان قطر پیچ است):



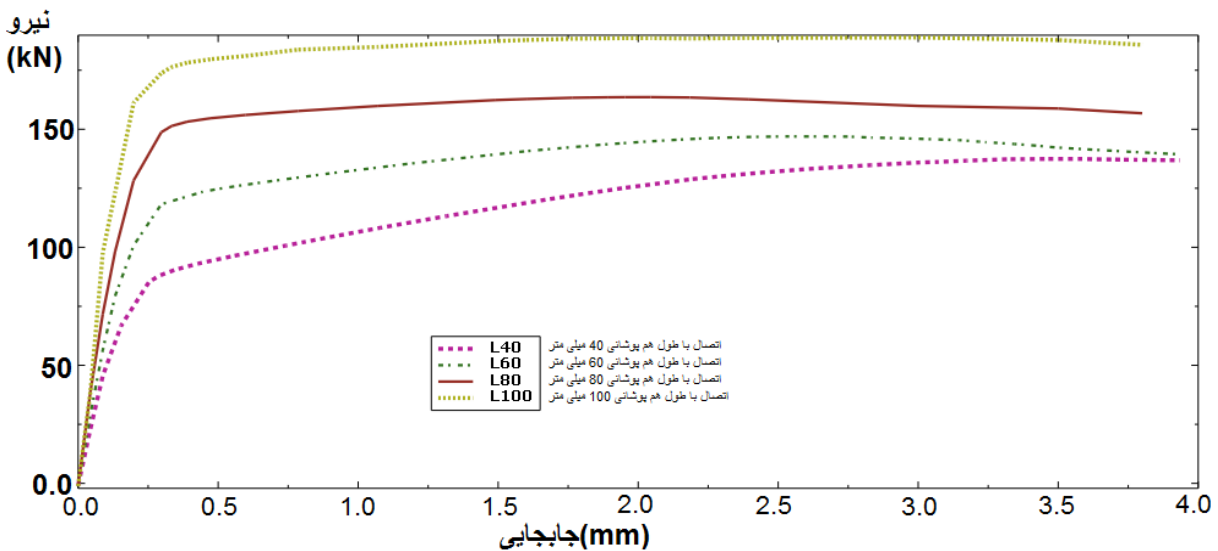
شکل ۸: نمودار نیرو- زمان برای اتصالات با فواصل پایانی متفاوت در امتداد عمود بر نیرو.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه عرض اتصال مدل‌سازی شده ۸۰ میلی‌متر است، فاصله ۳۰ میلی‌متری در جهت عرضی از لبه‌ها بر اساس مبحث دهم آیین‌نامه مجاز نیست [۱۲] و نمونه  $3d$  صرفاً جهت بررسی رفتار اتصالات با فواصل پایانی متفاوت برای پیچ‌ها مدل‌سازی شده است.

همان‌طور که در نمودار نیرو - جابجایی اتصالات با فواصل پایانی در راستای عمود بر جهت نیرو مشاهده می‌شود (شکل ۸)، تمامی نمونه‌ها دارای بار شکست و سختی مشابه بوده است. همچنین مکانیسم شکست در تمامی نمونه‌ها مشابه بوده است. مکانیسم شکست در اتصالات ترکیبی، گسیختگی کامپوزیت در محل سوراخ پیچ‌ها بوده است. در نتیجه می‌توان گفت که فاصله پایانی در امتداد عرضی برای پیچ‌ها، در اتصالات ترکیبی، به صورت جزئی بر مقاومت اتصال تأثیرگذار بوده است. این فاصله را می‌بایست با رعایت استانداردهای مبحث دهم در زمینه‌ی فاصله پیچ‌ها از لبه‌ها و فاصله پیچ‌ها از هم در نظر گرفت. در ادامه، همانند مدل‌های قبلی، از فاصله پایانی ۲۰ میلی‌متر ( $2d$ ) در امتداد عرضی برای پیچ‌ها استفاده خواهد شد ( $d$  قطر اسمی پیچ بوده است).

## ۳-۴ تأثیر افزایش طول هم‌پوشانی المان‌های اتصال بر مقاومت اتصال

جهت بررسی تأثیر طول هم‌پوشانی اعضای اتصال (صفحه کامپوزیت ترکیبی، صفحه‌های فولادی و لایه چسبیده) در مقاومت اتصال، ۴ نمونه با طول هم‌پوشانی‌های متفاوت و پیکربندی یکسان و قرارگیری پیچ‌ها و مهره‌ها در وسط اتصال در هر نمونه، مدل‌سازی شده است. طول هم‌پوشانی نمونه‌ها ۴۰ میلی‌متر، ۶۰ میلی‌متر، ۸۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. (نمونه‌ها  $L60$ ،  $L80$  و  $L100$  نام‌گذاری شد). نمودارهای نیرو- جابجایی برای نمونه‌ها با فواصل هم‌پوشانی متفاوت به صورت زیر از نرم‌افزار آباکوس استخراج شده است (شکل ۹):

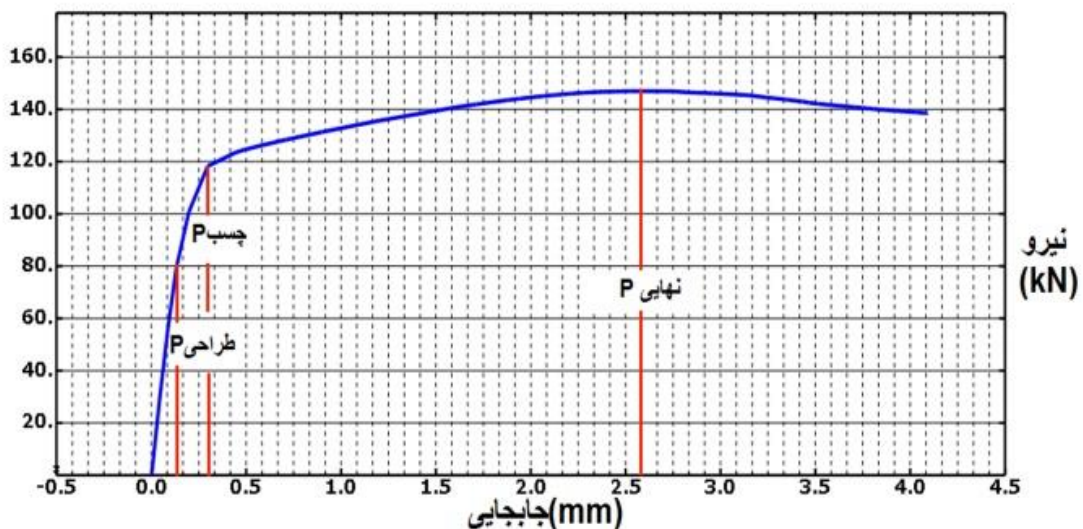


شکل ۹: نمودار نیرو-جابجایی برای اتصالات با طول هم پوشانی های متفاوت برای المان های اتصال.

همان طور که در نمودار نیرو - جابجایی نمونه های مدل سازی شده مشاهده می شود (شکل ۹)، افزایش طول هم پوشانی اعضای اتصال با افزایش سختی اتصال دارای رابطه مستقیم بوده است؛ یعنی هر چه طول هم پوشانی برای اعضای اتصال بیشتر شده است رفتار سخت تری از خود نشان داده است و دارای بار نهایی و بار شکست پایانی بالاتری بوده است. مکانیسم شکست در همه نمونه ها مشابه بوده است و شکست نهایی در تمامی نمونه ها به دلیل شکست برشی در کامپوزیت و در محل سوراخ پیچ ها بوده است.

#### ۴- معیارهای طراحی برای اتصالات ترکیبی

با توجه به مطالعات انجام شده معیارهای طراحی برای اتصالات ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: معیار طراحی برای اتصالات ترکیبی (پیچی و چسبی).

مؤلفه‌های زیادی در طراحی اتصالات ترکیبی مؤثر می‌باشند. جنس چسب، سطح مقطع لایه چسبنده، جنس پیچ، سطح مقطع پیچ و تعداد پیچ‌های اتصال از مؤلفه‌های تأثیرگذار بر لایه چسبنده است. همان‌طور که مشاهده شد فاصله پایانی پیچ در اتصالات ترکیبی در امتداد طولی و عرضی تأثیر ناچیز بر مقاومت اتصال دارد از این‌رو می‌توان گفت که آرایش پیچ‌ها در مقاومت اتصال تأثیر ندارد.

تا قبل از گسیختگی لایه چسبنده بیشتر بار به لایه چسبنده وارد شده است و بعد از گسیختگی لایه چسبنده بار به پیچ‌ها منتقل شده است. این موضوع بیان‌گر این مطلب است که مقاومت پیچ‌ها و تعداد پیچ‌ها، بار نهایی اتصالات ترکیبی را مشخص می‌کند. با این حال، بار طراحی اتصالات در کاربردهای عملی باید در حالت حدی سرویس باشد و در این قسمت فرض شده است که این امر به مقاومت برشی کششی چسب و سطح لایه چسبنده بستگی دارد (رابطه (۳)).

$$P_{Design} = \lambda \times P_{Adhesive} = 2\lambda\tau_{Adhesive}A_{Adhesive} \quad (3)$$

در این رابطه،  $\lambda$  ضریب طراحی،  $P_{Adhesive}$  باری که گسیختگی اصلی لایه چسبنده در آن اتفاق می‌افتد،  $\tau_{Adhesive}$  مقاومت کششی برای لایه چسبنده و  $A_{Adhesive}$  مساحت لایه چسبنده بوده است. ضریب طراحی که در رابطه (۳) مشاهده شده است را می‌بایست از قسمت خطی منحنی بار-جابجایی به دست آورد. لازم به ذکر است که در بعضی موارد، ممکن است باری که در آن گسیختگی اصلی لایه چسبنده اتفاق می‌افتد بالاتر از بار نهایی اتصال ترکیبی باشد؛ بنابراین در رابطه (۴) یک ضریب اطمینان برای اتصالات ترکیبی به‌عنوان نسبت بار بیشینه به بار طراحی معرفی می‌گردد.

$$\gamma = \frac{P_{Max}}{P_{Design}} = \frac{\max(P_{Adhesive}, P_{Ultimate})}{P_{Design}} \quad (4)$$

$$P_{Ultimate} = 2\tau_{Bolts}A_{Bolts}N \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\tau_{Bolts}$  مقاومت برشی نهایی یک پیچ،  $A_{Bolts}$  سطح مقطع یک پیچ و  $N$  تعداد پیچ‌های در یک اتصال است.

## ۵- نتیجه‌گیری

مطالعات عددی بر روی رفتار سازه‌های کامپوزیت متصل به پروفیل‌های فولادی به‌وسیله پیچ و کامپوزیت متصل به پروفیل‌های فولادی به‌وسیله پیچ و چسب انجام گرفت. نتایج اصلی که در زیر به آن اشاره می‌شود از این مطالعات عددی حاصل شده است:

- در اتصالات پیچی، فاصله پایانی از لبه‌ها برای پیچ تأثیر اساسی بر مقاومت و مکانیسم شکست اتصال دارد درحالی‌که در اتصالات ترکیبی، فاصله پایانی از لبه‌ها برای پیچ به‌صورت جزئی بر مقاومت و مکانیسم شکست اتصال تأثیرگذار بوده است. قبل از گسیختگی اصلی لایه چسبنده، مقاومت اتصال توسط چسب تأمین می‌شده است.

- فاصله پایانی پیچ در اتصالات ترکیبی، در هر دو امتداد، تأثیر جزئی بر مقاومت و مکانیسم شکست داشته است. لذا فاصله پایانی پیچ‌ها در اتصالات ترکیبی تأثیر جزئی بر مقاومت و مکانیسم شکست اتصال دارد. البته لازم به ذکر است که فاصله پایانی پیچ‌ها در محدوده استانداردهای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان موردبررسی قرار گرفته‌شده است و فاصله پایانی پیچ‌ها در این محدوده تأثیر جزئی در مقاومت و مکانیسم شکست اتصال دارد.

- افزایش طول هم‌پوشانی المان‌های اتصال با افزایش مقاومت اتصال رابطه مستقیم دارد یعنی هر چه طول هم‌پوشانی در اتصال افزایش یابد، مقاومت اتصال افزایش می‌یابد.

- گسیختگی لایه چسبنده از انتهای آزاد لایه چسبنده آغاز می‌شود و با افزایش بار، گسیختگی لایه چسبنده توسعه و در نهایت لایه چسبنده دچار گسیختگی می‌شود.

## مراجع

- [1] Camanho, P and Natthews, F. (1997). Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP. Composites part A, 28 A,529-47.
- [2]. Hart-Smith, L. (2006). Adhesive bonding of composite structures: progress to date and some remaining challenges. J Compos Technol Res, 24(3),133-53.
- [3] Kelly, G. (2006). Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/ bolted) composite single- lap joints. Compos Struct,2:119-29.
- [4] Nguyen, D H and Hiroshi, M. (2011). Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates. Construction and building Materials,347-359.
- [5] Saaman,M and Mirmian, A and Shahawy, M. (1998). Model of concrete concrete confined by fiber composites. Journal of Structural Engineering, 124-9, 1025-1031.
- [6]Ayman, S Mossalam. (2011). Design Guide for FRP Copposite Conecctions. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 601.
- [7] Noah, M S and Mahesh, J P. (2012). Hybrid (Bonded/Bolted) Composite Single-Lap Joints and its LOAD Transfer Analysis. International Journal of Advanced Engineering Technology, E-ISSN 0976-3945, 213-216.
- [8] Bickford, John H. (2008). Introduction to the design and behavior of bolted joints. 4th edition. Boca raton- London- New york: Taylor and Francis Group, 516.
- [9]Khennane, A. (2013). Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 458.
- [10]Cueto, R V. (2007). Stress Wave Timing, A Simplistic And Cost Efective Method To Evaluate Deteriorated And Repaired Timber Bridge Piles. Lubbock, Texas: Master of Science, 100.
- [11] Krishan, K Chawla. (2012). Composite Materials. 3th Edution. Birmingham: Department Of Materials Science and Engineering, 541.

[۱۲] دفتر مقررات ملی ساختمان. (1395). مبحث دهم طرح و اجرای ساختمان های فولادی، تهران: نشر توسعه ایران، ۳۰۴.