

سورة الاحقاف



دانشکده مهندسی عمران
رشته مهندسی عمران گرایش سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی اثر شکل سطح مقطع بر روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف پیچیده

نگارنده:

پوریا بخشی قالیباف طوسی

استاد راهنما:

دکتر فرشید جندقی علائی

استاد مشاور:

دکتر پویان برومند

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۲۷/۱
تاریخ: ۲۷/۶/۱۳۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای پوریا بخشی قالیباف طوسی با شماره دانشجویی ۹۲۳۴۴۴۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان بررسی اثر شکل سطح مقطع بر روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف پیچیده که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز درجه)	<input checked="" type="checkbox"/> مردود
نوع تحقیق: نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/>	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر فرشید جندقی علانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر یویان برومند	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر عبدالاحد چوپانی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر جلیل شفائی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید مهدی توکلی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم

به حسرت روزهای دگمنگی ام،

به روح مهربان، مستی ام،

به مقدس ترین واژه در لغت نامه دلم،

مادرم

برخود لازم و واجب می دانم تا از اساتید راهبهای ارجمندم، جناب آقای دکتر فرید جدتی علانی و جناب آقای دکتر پویان برومند به

دلیل زحمت و حمایت های پیوسته، آموزش ها و، نمودهای ارزشمند، تشویق ها و دگرگونی هایشان در طول مدت انجام این پژوهش تشکر و

قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر جلیل شغانی و جناب آقای دکتر سید مهدی توکلی که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را به عهده گرفتند،

صمیمانه تشکر می کنم.

همچنین از تمامی اساتید و دوستان کرامی و عزیزم که در انجام این پژوهش با نظرهای ارزشمندشان من را یاری نمودند قدردانی می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب پوریا بخشی قالیباف طوسی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی اثر شکل سطح مقطع بر روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف پیچیده تحت راهنمایی آقای دکتر فرشید جدقی علائی و آقای دکتر پویان برومند متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به‌دست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

آزمایش بیرون کشیدن الیاف از ماتریس سیمانی، رفتار بعد از ترک خوردگی بتن الیافی را برای یک رشته الیاف بررسی می‌کند. در این پژوهش اثر خصوصیات هندسی الیاف تابیده‌ی فولادی شامل قطر معادل الیاف، گام تابیدگی الیاف، شکل سطح مقطع الیاف و طول مدفون الیاف بر روی رفتار بیرون کشیدن از ماتریس سیمانی توسط نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی الیاف فولادی و ماتریس سیمانی به ترتیب از مدل سخت‌شدگی همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی و مدل خرابی پلاستیک بتن استفاده شد. همچنین از رابطه‌ی تنش- کرنش پیشنهاد شده توسط تورنفلد، توماسویچ و یانسن برای رفتار فشاری تک‌محوره‌ی مصالح سیمانی استفاده شد. رفتار کششی تک‌محوره‌ی مصالح سیمانی به صورت دوخطی در نظر گرفته شد. از قانون اصطکاک کولمب همسانگرد و مدل پایه‌ی اصطکاک کولمب موجود در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی رفتار اصطکاکی بین الیاف و ناحیه‌ی انتقال بین سطوح (ITZ) استفاده شد. بررسی‌های انجام شده بر روی منحنی‌های نیروی بیرون کشیدن- لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی نشان داد، هنگامی که شکل سطح مقطع الیاف تابیده‌ی فولادی از سه‌ضلعی منتظم به هشت‌ضلعی منتظم تغییر می‌کند، رفتار سخت‌شدگی لغزش بهبود می‌یابد. همچنین در الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع چندضلعی گون که در واقع مقاطعی با اضلاع مقعر می‌باشند، با تغییر شکل سطح مقطع الیاف از سه‌ضلعی گون به هشت‌ضلعی گون، رفتار سخت‌شدگی لغزش بازیابی می‌شود. در الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون ناقص و چهارضلعی گون ناقص که تفاوت آن‌ها با مقاطع چندضلعی گون، حذف گوشه‌های تیز می‌باشد، هنگامی که درصد ناقص بودن از ۶۰ درصد به ۸۰ درصد تغییر می‌کند، رفتار بیرون کشیدن از نرم‌شدگی لغزش به سخت‌شدگی لغزش ارتقاء می‌یابد. از دیگر عواملی که منجر به بهبود رفتار سخت‌شدگی لغزش می‌شود، می‌توان به افزایش گام تابیدگی و

قطر معادل الیاف اشاره نمود. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت و از دقت کافی برخوردار بود.

کلمات کلیدی: رفتار بیرون کشیدن الیاف، الیاف تابیده‌ی فولادی، رفتار سخت‌شدگی لغزش، مدل خرابی پلاستیک بتن.

مقالات مستخرج از پایان نامه:

[۱] بخشی قالیباف طوسی پ.، جندقی علائی ف. و برومند پ. (۱۳۹۵)، "بررسی اثر شکل سطح

مقطع الیاف تابیده بر روی رفتار بیرون کشیدن"، چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.

[۲] بخشی قالیباف طوسی پ.، جندقی علائی ف. و برومند پ. (۱۳۹۶)، "بررسی اثر قطر معادل

الیاف تابیده بر روی رفتار بیرون کشیدن"، هفتمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان.

۱	فصل اول: مقدمه
۱-۱	مقدمه
۱-۱-۱	ضرورت انجام پژوهش
۱-۱-۲	هدف از انجام پژوهش
۱۳	فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی پیشین
۲۱	فصل سوم: رفتار مکانیکی و اصطکاکی مصالح
۱-۳	رفتار مکانیکی مصالح
۱-۳-۱	فولاد
۱-۳-۱-۱	سطوح تسلیم
۱-۳-۱-۲	قانون جاری شدن
۱-۳-۱-۳	سخت‌شدگی
۱-۳-۲	بتن
۱-۳-۲-۱	رفتار کششی و فشاری تک‌محوره
۱-۳-۲-۱-۱	پلاستیسیتهی بتن
۱-۳-۲-۱-۲	نامتغیرهای تنش مؤثر
۱-۳-۲-۱-۳	جریان پلاستیک

۳۳	..... تابع تسلیم ۳-۲-۲-۱-۳
۳۶	..... رفتار اصطکاکی ۲-۳
۳۹	فصل چهارم: مدل سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی منفرد
۴۰	..... ۱-۴ مقدمه
۴۰	..... ۲-۴ خصوصیات هندسی
۴۳	..... ۳-۴ خصوصیات رفتار مکانیکی مصالح
۴۳	..... ۱-۳-۴ الیاف فولادی
۴۴	..... ۲-۳-۴ ماتریس سیمانی
۴۴	..... ۱-۲-۳-۴ رابطه‌ی تنش- کرنش فشاری تک‌محوره‌ی ماتریس سیمانی
۴۶	..... ۲-۲-۳-۴ رابطه‌ی تنش- کرنش کششی تک‌محوره‌ی ماتریس سیمانی
۴۶	..... ۳-۲-۳-۴ متغیرهای خرابی فشاری و کششی
۴۷	..... ۳-۳-۴ ناحیه انتقال بین دو سطح الیاف و ماتریس سیمانی (ITZ)
۵۰	..... ۴-۴ خصوصیات سطح تماس بین الیاف و ITZ
۵۱	..... ۵-۴ خصوصیات شرایط مرزی
۵۲	..... ۶-۴ خصوصیات بارگذاری
۵۳	..... ۷-۴ خصوصیات مش بندی
۵۷	..... ۸-۴ خصوصیات تحلیل

فصل پنجم: نتایج و بحث	۶۱
۱-۵- مقدمه	۶۲
۲-۵- کالیبراسیون و صحت سنجی مدل	۶۲
۳-۵- آنالیز حساسیت	۷۶
۱-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی سرعت بیرون کشیدن الیاف	۷۶
۲-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی مش بندی	۷۹
۳-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی ضریب اصطکاک سطح تماس الیاف و ITZ	۸۲
۴-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی زاویه‌ی اتساع	۸۳
۵-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی نسبت دومین نامتغیر تنش روی نصف‌النهار کششی به فشاری	
(K)	۸۵
۶-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی نسبت تنش تسلیم فشاری دومحوره به تک‌محوره	۸۶
۷-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی خروج از مرکزیت	۸۷
۴-۵- بررسی اثر شکل سطح مقطع	۸۸
۱-۴-۵- الیاف با مقطع چندضلعی منتظم	۸۸
۲-۴-۵- الیاف با مقطع چندضلعی گون	۹۶
۳-۴-۵- الیاف با مقطع سه‌ضلعی و چهارضلعی‌گون ناقص	۱۰۰
۵-۵- بررسی اثر قطر معادل	۱۰۵

۱۰۹	.....	۵-۶- بررسی اثر گام تابیدگی
۱۱۳	.....	۵-۷- بررسی اثر طول مدفون
۱۱۷	.....	۵-۸- بررسی اثر طول آزاد
۱۱۹	.....	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۵	.....	پیوست
۱۳۵	.....	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: دسته‌بندی الیاف..... ۴
- شکل ۲-۱: نمونه‌های مختلفی از جنس و شکل هندسی الیاف [۴]..... ۴
- شکل ۳-۱: شکل‌های مختلف الیاف فولادی [۴]..... ۵
- شکل ۴-۱: نمودار نمادین نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی [۹]..... ۹
- شکل ۱-۳: مدل سخت‌شدگی کینماتیکی با سه پیش تنش [۲۲]..... ۲۵
- شکل ۲-۳: نمایش یک‌بعدی سخت‌شدگی مدل همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی [۲۲]..... ۲۶
- شکل ۳-۳: نمایش سه‌بعدی سخت‌شدگی مدل همسانگرد کینماتیکی غیرخطی [۲۲]..... ۲۷
- شکل ۴-۳: نمودار تنش-کرنش تک‌محوره‌ی کششی [۲۲]..... ۳۱
- شکل ۵-۳: نمودار تنش-کرنش تک‌محوره‌ی فشاری [۲۲]..... ۳۱
- شکل ۶-۳: سطوح تسلیم در صفحه‌ی انحرافی با مقادیر مختلف K_c [۲۲]..... ۳۵
- شکل ۷-۳: سطح تسلیم در فضای تنش دو محوره [۲۲]..... ۳۵
- شکل ۸-۳: ناحیه‌های لغزش مدل پایه‌ی اصطکاک کولمب [۲۲]..... ۳۸
- شکل ۱-۴: شکل سطح مقطع الیاف. الف) سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم؛ ب) سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی گون و ج) سه‌ضلعی و چهارضلعی گون ناقص ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد..... ۴۱
- شکل ۲-۴: خصوصیات هندسی الیاف..... ۴۱
- شکل ۳-۴: خصوصیات هندسی ITZ..... ۴۲

- شکل ۴-۴: خصوصیات هندسی ماتریس سیمانی..... ۴۲
- شکل ۴-۵: نمودار تنش- کرنش کالیبره الیاف فولادی..... ۴۴
- شکل ۴-۶: نمودار تنش- کرنش فشاری تک محوره‌ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ..... ۴۹
- شکل ۴-۷: نمودار تنش- کرنش کششی تک محوره‌ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ..... ۴۹
- شکل ۴-۸: شرایط مرزی انتهای ماتریس..... ۵۱
- شکل ۴-۹: شرایط مرزی نوک الیاف..... ۵۲
- شکل ۴-۱۰: شرایط بارگذاری در نوک الیاف..... ۵۳
- شکل ۴-۱۱: مش بندی ماتریس سیمانی..... ۵۵
- شکل ۴-۱۲: مش بندی ITZ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۳: مش بندی الیاف..... ۵۷
- شکل ۵-۱: مقایسه‌ی نمودار کالیبره شده با نمودار آزمایشگاهی..... ۶۴
- شکل ۵-۲: کاهش سختی المان‌های ماتریس سیمانی در لغزش‌های الف (۲/۵، ب) ۵، پ) ۷/۵، ت) ۹،
ث) ۱۰ و ج) ۱۲/۷ میلی‌متر..... ۶۶
- شکل ۵-۳: کانتور تنش فون-میسز در طول بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی در لغزش‌های
الف) ۲/۵، ب) ۵، پ) ۷/۵، ت) ۹، ث) ۱۰ و ج) ۱۲/۷ میلی‌متر..... ۶۹
- شکل ۵-۴: کانتور تنش فون-میسز در طول بیرون کشیدن الیاف تابیده..... ۷۰
- شکل ۵-۵: کرنش پلاستیک معادل در لغزش‌های مختلف..... ۷۲
- شکل ۵-۶: نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی داخلی..... ۷۲

- شکل ۵-۷: رابطه‌ی تنش- کرنش فشاری ماتریس سیمانی و ITZ..... ۷۴
- شکل ۵-۸: رابطه‌ی تنش- کرنش کششی ماتریس سیمانی و ITZ..... ۷۴
- شکل ۵-۹: کالیبراسیون رفتار کششی الیاف فولادی..... ۷۵
- شکل ۵-۱۰: مقایسه‌ی نمودار صحت سنجی شده با نمودار آزمایشگاهی..... ۷۵
- شکل ۵-۱۱: نمونه‌ای از آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی [۹]..... ۷۶
- شکل ۵-۱۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با سرعت‌های مختلف..... ۷۷
- شکل ۵-۱۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با سرعت الف) ۱۵۰ mm/s، ب) ۳۰۰ mm/s، پ) ۷۵۰ mm/s، ت) ۱۵۰۰ mm/s، ث) ۳۰۰۰ mm/s، ج) ۷۵۰۰ mm/s و چ) ۱۵۰۰۰ mm/s..... ۷۸
- شکل ۵-۱۴: نمودار نیرو- لغزش با تغییر ابعاد مش بندی روی سطح جانبی ماتریس سیمانی..... ۷۹
- شکل ۵-۱۵: نمودار نیرو- لغزش با تغییر ابعاد مش بندی الیاف..... ۸۰
- شکل ۵-۱۶: نمودار نیرو- لغزش با تغییر ابعاد مش بندی ITZ..... ۸۰
- شکل ۵-۱۷: نمودار نیرو- لغزش با تغییر هم‌زمان ابعاد مش بندی الیاف و ITZ..... ۸۲
- شکل ۵-۱۸: نمودار نیرو- لغزش با تغییر هم‌زمان ابعاد مش بندی الیاف، ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف..... ۸۲
- شکل ۵-۱۹: نمودار نیروی بیرون کشیدن با ضرایب اصطکاک مختلف..... ۸۳
- شکل ۵-۲۰: نمودار نیروی بیرون کشیدن با زوایای اتساع مختلف..... ۸۴
- شکل ۵-۲۱: نمودار نیروی بیرون کشیدن با زوایای اتساع مختلف..... ۸۴
- شکل ۵-۲۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر K مختلف..... ۸۵

- شکل ۵-۲۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر نسبت تنش مختلف..... ۸۶
- شکل ۵-۲۴: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر خروج از مرکزیت مختلف..... ۸۷
- شکل ۵-۲۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چندضلعی منتظم..... ۸۸
- شکل ۵-۲۶: نمودار نیروی بیشینه بر حسب تعداد اضلاع..... ۸۹
- شکل ۵-۲۷: کانتور خرابی ماتریس سیمانی اطراف الیاف تابیده‌ی الف) سه‌ضلعی منتظم، ب) چهارضلعی منتظم، پ) پنج‌ضلعی منتظم، ت) شش‌ضلعی منتظم، ث) هفت‌ضلعی منتظم و ج) هشت‌ضلعی منتظم..... ۹۱
- شکل ۵-۲۸: نمودار انرژی بیرون کشیدن در مقاطع چندضلعی منتظم..... ۹۲
- شکل ۵-۲۹: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیشینه در مقاطع چندضلعی منتظم..... ۹۲
- شکل ۵-۳۰: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه‌ضلعی منتظم و مقادیر ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه..... ۹۳
- شکل ۵-۳۱: نمودار نسبت لغزش به طول مدفون اولیه بین نیروی بیرون کشیدن بیشینه و ۹۰ درصد، ۸۰ درصد و ۷۰ درصد مقدار بیشینه بر حسب تعداد اضلاع در مقاطع چندضلعی منتظم..... ۹۴
- شکل ۵-۳۲: نمودار شروع تنزل در مقاطع چندضلعی منتظم..... ۹۵
- شکل ۵-۳۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چندضلعی گون..... ۹۶
- شکل ۵-۳۴: نمودار نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف چندضلعی گون..... ۹۸
- شکل ۵-۳۵: نمودار انرژی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف چندضلعی گون..... ۹۸
- شکل ۵-۳۶: لغزش متناظر با نیروی بیشینه در مقاطع چندضلعی گون..... ۹۹

- شکل ۵-۳۷: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف سه ضلعی گون و سه ضلعی گون ناقص بر حسب لغزش..... ۱۰۱
- شکل ۵-۳۸: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چهار ضلعی گون و چهار ضلعی گون ناقص بر حسب لغزش..... ۱۰۱
- شکل ۵-۳۹: نیروی بیرون کشیدن بیشینه در مقاطع سه و چهار ضلعی گون ناقص..... ۱۰۲
- شکل ۵-۴۰: نمودار انرژی بیرون کشیدن بیشینه ی الیاف چند ضلعی گون ناقص..... ۱۰۳
- شکل ۵-۴۱: لغزش متناظر با نیروی بیشینه در مقاطع چند ضلعی گون ناقص..... ۱۰۴
- شکل ۵-۴۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش با قطرهای معادل مختلف..... ۱۰۵
- شکل ۵-۴۳: نمودار نیروی بیشینه بر حسب قطر معادل..... ۱۰۶
- شکل ۵-۴۴: نمودار انرژی بیرون کشیدن بر حسب قطر معادل..... ۱۰۷
- شکل ۵-۴۵: نمودار شروع تنزل بر حسب قطر معادل..... ۱۰۸
- شکل ۵-۴۶: نمودار نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش با تابیدگی های مختلف..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴۷: نمودار نیروی بیشینه بر حسب گام تابیدگی..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴۸: نمودار انرژی بیرون کشیدن بر حسب گام تابیدگی..... ۱۱۲
- شکل ۵-۴۹: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیشینه بر حسب گام تابیدگی..... ۱۱۲
- شکل ۵-۵۰: نمودار نیروی بیرون کشیدن حسب نسبت لغزش به طول مدفون..... ۱۱۴
- شکل ۵-۵۱: نمودار نیروی بیرون کشیدن بیشینه بر حسب طول مدفون..... ۱۱۵
- شکل ۵-۵۲: نمودار انرژی بیرون کشیدن بر حسب طول مدفون..... ۱۱۵

- شکل ۵-۵۳: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه طول مدفون.....۱۱۶
- شکل ۵-۵۴: نمودار نسبت لغزش به طول مدفون اولیه‌ی متناظر با شروع تنزل برحسب طول مدفون.....۱۱۶
- شکل ۵-۵۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش با طول آزاد صفر و ۱ میلی‌متر.....۱۱۸
- شکل پ-۱: مقطع سه‌ضلعی منتظم.....۱۲۶
- شکل پ-۲: مقطع سه‌ضلعی گون.....۱۲۸
- شکل پ-۳: مقطع سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی.....۱۳۰
- شکل پ-۴: نحوه‌ی محاسبه‌ی A_1۱۳۱
- شکل پ-۵: مقطع سه‌ضلعی گون ناقص صفر و ۱۰۰ درصدی.....۱۳۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از ادبیات فنی پیشین..... ۲۰
- جدول ۱-۴: خصوصیات مکانیکی الیاف فولادی..... ۴۴
- جدول ۲-۴: خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی..... ۴۷
- جدول ۳-۴: خصوصیات مکانیکی ITZ..... ۴۹
- جدول ۱-۵: خصوصیات مکانیکی الیاف..... ۷۳
- جدول ۱-۶: شکل سطح مقطع پیشنهادی..... ۱۲۳

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

از زمان‌های بسیار دور یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها و تلاش‌های بشر، جستجو و دستیابی به مصالح بهتر بود و مصالحی از جنس خاک و سنگ مورد استفاده قرار می‌گرفت. به کار بردن گاه و پنبه نسوز^۱ برای تقویت و بهبود مصالحی از جنس گل‌ولای و خاک رس از اولین نشانه‌های پیدایش و کاربرد الیاف^۲ بود [۱]. بتن ماده‌ای مرکب از آب و سیمان و سنگ‌دانه است و مقاومت فشاری نسبتاً بالایی دارد. مقاومت فشاری بتن تقریباً ۸ تا ۱۲ برابر مقاومت کششی آن می‌باشد. مقاومت کششی ناچیز بتن، یکی از ضعف‌های بتن است و هنگامی که تحت تنش‌های کششی کم قرار می‌گیرد، ترک می‌خورد. در قرن ۱۸ میلادی به‌منظور غلبه بر ضعف بتن درکشش، از فولاد به‌صورت میلگرد استفاده شد. علت استفاده از فولاد، مقاومت کششی بالای آن بود.

از سال ۱۹۱۰ مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور استفاده از الیاف فولادی در بتن آغاز گردید. در دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی استفاده از الیاف در مصالح سیمانی به‌صورت ناپیوسته و کوتاه که به‌طور تصادفی جهت‌دهی شده بودند، پایه‌گذاری شد [۲]. فایده‌ی عمده‌ی الیاف، افزایش شکل‌پذیری و سختی یا چقرمگی^۳ مصالح سیمانی است که در نبود الیاف، شبه شکننده^۴ می‌باشد. افزودن الیاف به مصالح سیمانی، باعث جبران ضعف در برابر کشش می‌شود و نتیجه‌ی آن، ترکیب سیمانی مسلح به الیاف می‌باشد که به آن «بتن الیافی»^۵ نیز گفته می‌شود. بتن الیافی شامل دو جز است. جز اول، ماتریس^۶

^۱ Asbestos

^۲ Fibers

^۳ Toughness

^۴ Quasi-Brittle

^۵ Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC)

^۶ Matrix

سیمانی می‌باشد که خود می‌تواند شامل اجزای دیگری باشد و جز دوم الیاف می‌باشد. الیاف و ماتریس سیمانی به دلیل چسبندگی بین‌شان منجر به تشکیل یک ماده‌ی مرکب می‌شود.

با توجه به خصوصیات مختلف الیاف، می‌توان آن‌ها را تقسیم‌بندی نمود. اولین خصوصیت، جنس الیاف است که می‌تواند طبیعی، معدنی و دست‌ساز باشد. نمونه‌های الیاف طبیعی عبارت‌اند از: الیافی از جنس چوب، سیسل^۱ (الیاف محکمی که در ساختن طناب کاربرد دارد)، کنف^۲، نی^۳، کاه و موی اسب. نمونه‌های الیاف معدنی شامل الیاف پنبه نسوز و پشم شیشه^۴ و نمونه‌های مصنوعی یا دست‌ساز الیاف، الیاف فولادی، پلیمری، شیشه‌ای، کربنی و فلزی می‌باشد. از دیگر خصوصیات الیاف می‌توان به خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، خصوصیات مکانیکی و خصوصیات هندسی اشاره نمود. شکل ۱-۱ دسته‌بندی الیاف را بر اساس خصوصیات آن نشان می‌دهد [۳].

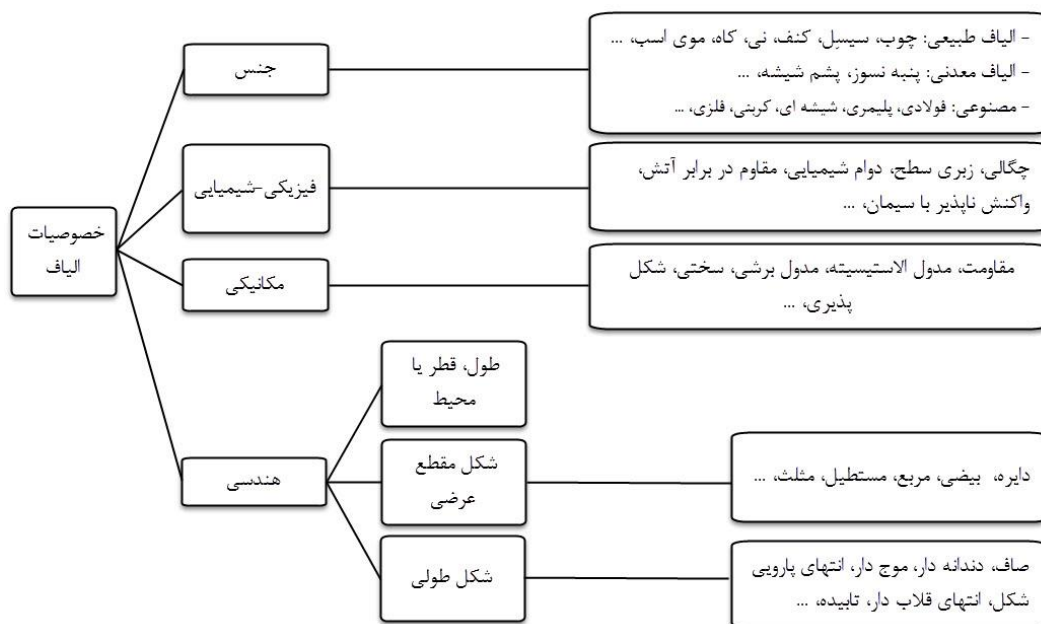
شکل الیاف بر روی رفتار بتن الیافی تأثیر می‌گذارد. شکل ۱-۲ نمونه‌های مختلفی از جنس و شکل هندسی الیاف و شکل ۱-۳ نمونه‌های تغییرات در شکل طولی و سطح مقطع الیاف را نشان می‌دهد.

^۱ Sisal

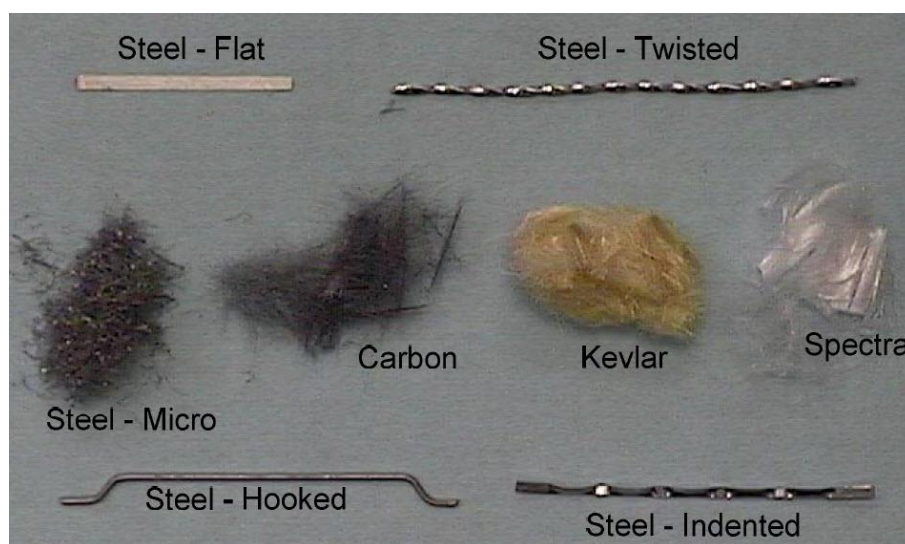
^۲ Jute

^۳ Bamboo

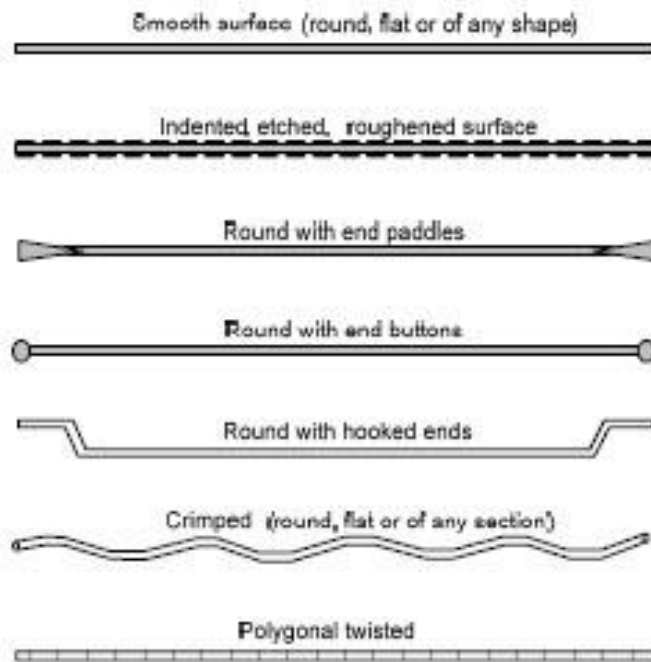
^۴ Rock Wool



شکل ۱-۱: دسته بندی الیااف.



شکل ۱-۲: نمونه های مختلفی از جنس و شکل هندسی الیااف [۴].



شکل ۱-۳: شکل‌های مختلف الیاف فولادی [۴].

یک عضو بتنی مسلح به الیاف، هنگامی که تحت تنش کششی ناشی از نیروی کششی یا لنگر خمشی قرار می‌گیرد، دارای رفتارهای مختلفی قبل و بعد از ترک‌خوردگی دارد. در مرحله‌ی قبل از ترک‌خوردگی^۱، هنگامی که تنش‌های کششی به ترکیب مسلح به الیاف اعمال می‌شود؛ تنش‌های کششی از ماتریس به الیاف منتقل می‌شود. با افزایش تنش کششی، ماتریس سیمانی که مقاومت کششی بسیار پایینی دارد، ترک می‌خورد.

در مرحله‌ی بعد از ترک‌خوردگی^۲، الیاف، تنش‌های کششی را در میان قسمت‌های ترک‌خورده‌ی ماتریس سیمانی انتقال می‌دهد؛ بنابراین الیاف با پل زدن^۳ بین دو وجه ترک‌ها و جلوگیری از باز شدن ترک‌ها، در رفتار بعد از ترک‌خوردگی شرکت می‌کند. انتقال نیرو بین الیاف و ماتریس برای هر دو مرحله،

^۱ Pre-cracking

^۲ Post-cracking

^۳ Bridging

در میان سطوح چسبنده رخ می‌دهد که به‌عنوان تنش برشی چسبندگی بین سطوح مشترک الیاف و ماتریس سیمانی اطراف آن تعریف می‌شود. ماتریس سیمانی تحت بارگذاری بسیار کم به دلیل پایین بودن مقاومت کششی آن، ترک می‌خورد و رفتار سازه بلافاصله وارد مرحله‌ی بعد از ترک‌خوردگی می‌شود. در نتیجه، مرحله‌ی بعد از ترک‌خوردگی بحرانی‌تر از مرحله‌ی پیش از ترک‌خوردگی است. در مرحله‌ی بعد از ترک‌خوردگی، کشش در الیاف، افزایش پیدا می‌کند تا زمانی که الیاف از ماتریس بیرون کشیده شوند یا تحت تنش کششی گسیخته شوند. آزمایش بیرون کشیدن^۱ الیاف از ماتریس سیمانی در واقع رفتار بعد از ترک‌خوردگی را برای یک رشته الیاف بررسی می‌کند.

رفتار بعد از ترک‌خوردگی، بستگی به خصوصیات الیاف (هندسه، مقاومت و مدول الاستیسیته)، خصوصیات ماتریس سیمانی (مقاومت و ترکیب مصالح)، درصد حجمی الیاف، جهت‌گیری الیاف و چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی دارد. چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی به‌عنوان یک پارامتر کلیدی تأثیرگذار بر رفتار بعد از ترک‌خوردگی ترکیبات سیمانی به رسمیت شناخته می‌شود. بالا بردن چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی، علاوه بر استفاده‌ی بهینه از مقاومت کششی بالای الیاف، امکان بهره بردن از رفتارهای سخت‌شدگی کرنش^۲ و ترک‌خوردگی‌های متعدد^۳ را می‌دهد. تغییر شکل مکانیکی الیاف یکی از مؤثرترین راهکارهای بهبود رفتار چسبندگی-لغزش^۴ الیاف در ترکیب سیمانی است. الیاف فولادی به دلیل داشتن رفتار سخت‌شدگی کرنش، به‌منظور بهبود چسبندگی مکانیکی در ماتریس سیمانی، نسبت به الیاف دیگر برتری دارند.

^۱ Pull-out Test

^۲ Strain-Hardening

^۳ Multiple Cracking

^۴ Slip

اجزای تشکیل دهنده ی چسبندگی شامل چسبندگی شیمیایی یا فیزیکی، چسبندگی اصطکاکی و چسبندگی مکانیکی بین الیاف و ماتریس سیمانی می شود. چسبندگی فیزیکی یا شیمیایی بین الیاف و ماتریس سیمانی در واقع قبل از شروع لغزش می باشد و نیروی بیرون کشیدن، ناشی از ترک خوردن ماتریس سیمانی اطراف الیاف است و در نهایت با جدا شدن الیاف از ماتریس سیمانی، چسبندگی شیمیایی یا فیزیکی بین الیاف و ماتریس سیمانی از بین می رود. با شروع لغزش، چسبندگی های اصطکاکی و مکانیکی به طور هم زمان فعال می شوند. چسبندگی اصطکاکی ناشی از اصطکاک سطوح الیاف و ماتریس سیمانی است. چسبندگی مکانیکی بسته به شکل الیاف متفاوت می باشد. به طور مثال، چسبندگی مکانیکی در الیاف قلاب دار^۱ به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در انتهای الیاف و در الیاف تابیده^۲ به دلیل باز شدن تابیدگی های الیاف در طول الیاف می باشد و در الیاف صاف و مستقیم^۳ چسبندگی مکانیکی وجود ندارد.

اجزای چسبندگی در الیاف فولادی تغییر شکل یافته، اساساً شامل اصطکاک و مهار مکانیکی می شود. چسبندگی اصطکاکی، عموماً از آزمایش بیرون کشیدن الیاف مستقیم و صاف قابل تشخیص است. چسبندگی مکانیکی به علت هندسه ی ویژه ی الیاف، مانند الیاف قلاب دار و تابیده، می تواند با استفاده از آزمایش بیرون کشیدن با آغشته کردن الیاف برای حذف اصطکاک، مورد آزمایش قرار گیرد.

الیاف مستقیم و صاف با سطح مقطع دایره ای شکل در سه مرحله انرژی را ذخیره و اتلاف می کنند. در مرحله ی اول، الیاف، تغییر شکل های نسبتاً کوچک را قبل از این که حداکثر نیروی بیرون کشیدن حاصل شود، تحمل می کند. در مرحله ی دوم، نیروی بیرون کشیدن به دلیل از بین رفتن چسبندگی

^۱ Hooked Fibers

^۲ Twisted Fibers

^۳ Straight Smooth Fibers

فیزیکی یا شیمیایی و در مرحله‌ی سوم، نیروی بیرون کشیدن با افزایش لغزش کاهش می‌یابد و انرژی، از طریق اصطکاک بین سطح مشترک الیاف و ماتریس، اتلاف می‌شود. قطر این الیاف بستگی به ترکیبات ماتریس اطراف الیاف دارد و بایستی کوچک‌تر از قطر مؤثر بیشینه باشد [۵]. طول این الیاف بایستی کمتر از طول بحرانی الیاف باشد. طول بحرانی یک رشته الیاف طولی است که با افزایش طول الیاف، مود گسیختگی از بیرون کشیده شدن به شکست کششی الیاف تغییر می‌کند. مقادیر نسبت طول به قطر الیاف یا نسبت ظاهری الیاف معمولاً در محدوده‌ی ۶۰ تا ۱۰۰ می‌باشد [۶].

در الیاف قلاب‌دار، علاوه بر سه مرحله‌ی ذکر شده در الیاف مستقیم، انرژی جذب‌شده توسط الیاف به دلیل تشکیل مفاصل پلاستیک متعدد در قسمت‌هایی از طول الیاف (در انتهای قلاب‌دار)، افزایش می‌یابد. نیروی بیرون کشیدن حداکثر الیاف قلاب‌دار نسبت به الیاف مستقیم، با طول مدفون^۱ یکسان، تقریباً $\frac{4}{5}$ برابر است [۷].

در الیاف تابیده، علاوه بر سه مرحله‌ی ذکر شده در الیاف مستقیم، انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده به دلیل وجود تابیدگی در طول الیاف و باز شدن آن‌ها در طول بیرون کشیده شدن، افزایش می‌یابد. در این الیاف، نیروی بیرون کشیدن بیشینه ۲ تا ۳ برابر الیاف مستقیم، لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه ۱۰ برابر الیاف مستقیم و قلاب‌دار و انرژی لازم برای بیرون کشیدن، ۴ تا ۵ برابر الیاف مستقیم می‌باشد [۸]. یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد الیاف تابیده این است که نیروی بیرون کشیدن را در ۷۰ تا ۹۰ طول مدفون نزدیک مقدار بیشینه نگه می‌دارد [۹]. از دیگر ویژگی‌های این الیاف رفتار

^۱ Embedded length

شبه پلاستیک^۱ و سخت‌شدگی لغزش^۲ می‌باشد. ایجاد تعداد ترک‌های زیاد^۳، فاصله‌ی کم ترک‌ها و عرض ترک کوچک در آزمایش کشش به دلیل رفتار سخت‌شدگی لغزش در آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده می‌باشد [۱۰].

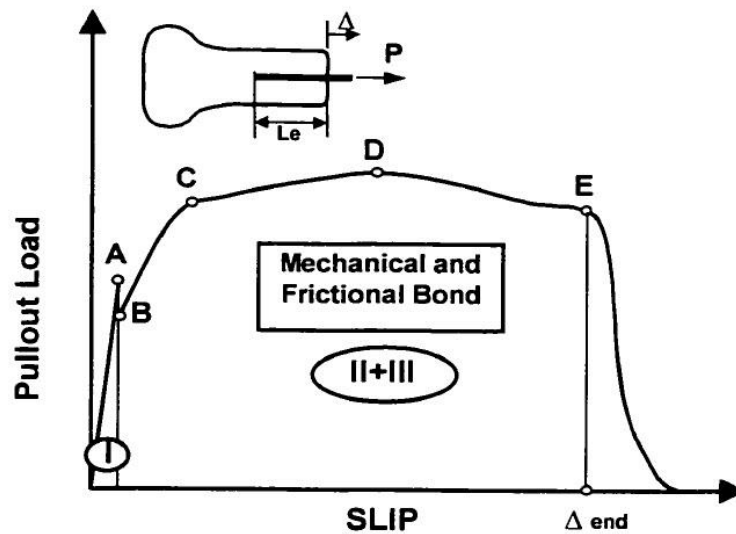
شکل ۴-۱ نمودار نمادین نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی را نشان می‌دهد. در این نمودار، نیروی بیرون کشیدن تا نقطه‌ی A به دلیل چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی به صورت خطی می‌باشد. در نقطه‌ی A چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی از بین رفته و نیروی بیرون کشیدن تا نقطه‌ی B با افت ناگهانی مواجه می‌شود. از نقطه‌ی B تا C، به دلیل باز شدن تابیدگی‌های الیاف تابیده و افزایش اصطکاک بین الیاف و ماتریس سیمانی، نیروی بیرون کشیدن الیاف افزایش می‌یابد. در نقطه‌ی C، لنگر پیچشی بازشدگی^۴ در نوک الیاف به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. نقاط D و E به ترتیب نیروی بیرون کشیدن بیشینه و شروع تنزل را نشان می‌دهند [۹].

^۱ Pseudo-Plastic

^۲ Slip-Hardening

^۳ Multiple Cracking

^۴ Untwisting Torque



شکل ۴-۱: نمودار نمادین نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش یاف تابیده‌ی فولادی [۹].

پارامترهای مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن یاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی شامل قطر معادل یاف، گام تابیدگی^۱ یاف، شکل سطح مقطع یاف، طول مدفون یاف، مقاومت کششی یاف، زاویه‌ی بین محور یاف و راستای لغزش، خصوصیات سطح تماس بین یاف و ماتریس سیمانی و مقاومت ماتریس سیمانی می‌باشد. رفتار بیرون کشیدن یاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی به چهار نوع تقسیم می‌شود. بهترین نوع آن رفتار شبه پلاستیک می‌باشد و زمانی حاکم است که تابیدگی‌های یاف تابیده در انتهای آزمایش باز شده باشد. شکل ۴-۱ رفتار شبه پلاستیک را نشان می‌دهد. نوع دوم هنگامی رخ می‌دهد که نیروی لازم برای غلبه بر چسبندگی بین یاف و ماتریس سیمانی از نیروی لازم برای باز شدن یاف تابیده بیشتر باشد. در این حالت، بعد از جدا شدن یاف از ماتریس سیمانی نیروی بیرون کشیدن تا زمانی که یاف به‌طور کامل بیرون کشیده شود، کاهش می‌یابد. در نوع سوم یاف تابیده از ماتریس سیمانی بیرون کشیده نمی‌شود و یاف درکشش گسیخته می‌شود. این حالت زمانی رخ می‌دهد که نیروی لازم برای غلبه بر چسبندگی بین یاف و ماتریس، به دلیل زیاد بودن طول مدفون

^۱ Pitch

الیاف، از مقاومت کششی الیاف بیشتر باشد. هنگامی که گام تابیدگی و مقاومت ماتریس سیمانی کم باشد، ماتریس سیمانی اطراف الیاف در برش گسیخته می‌شود و حالت چهارم رخ می‌دهد. به این پدیده، تونل شدن ماتریس^۱ گفته می‌شود [۹].

رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده برخلاف الیاف مستقیم صاف و الیاف قلاب‌دار نسبت به نرخ بارگذاری حساس می‌باشد [۱۱]. همچنین استفاده از خاکستر بادی، کاهش ابعاد ذرات و افزایش نسبت ریزدانه به درشت‌دانه، از دیگر عوامل مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده می‌باشد که موجب بهبود آن می‌شود [۱۲ و ۱۳].

۱-۲- ضرورت انجام پژوهش

الیاف تابیده به دلیل جذب انرژی بالا، بیشتر در اعضای بتنی تحت بار ضربه یا انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار خمشی و کششی تیرهای بتنی مسلح به الیاف در مرحله‌ی بعد از ترک‌خوردگی وابسته به پدیده‌ی پل زدن بین دو طرف ترک توسط الیاف می‌باشد. اگر الیاف و ماتریس سیمانی مقاومت کافی را داشته باشند، الیاف تمایل به بیرون کشیده شدن از ماتریس را دارند. الیاف منفرد برای بیرون کشیده شدن از ماتریس سیمانی بایستی بر مقاومت چسبندگی و اصطکاکی بین الیاف و ماتریس سیمانی غلبه کند. روش استاندارد برای ارزیابی چسبندگی بین الیاف کوتاه و ماتریس سیمانی وجود ندارد. آزمایش بیرون کشیدن الیاف منفرد که به وسیله‌ی آن الیاف از ماتریس سیمانی بیرون کشیده می‌شود؛ عموماً به‌عنوان یک روش غیرمستقیم برای ارزیابی چسبندگی و اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

^۱ Matrix Tunneling

از این رو در این پژوهش رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده با نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳- هدف از انجام پژوهش

پارامترهای مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن الیاف منفرد تابیده فولادی شامل خصوصیات هندسی الیاف، خصوصیات چسبندگی و اصطکاکی بین سطح تماس الیاف و ماتریس سیمانی و مقاومت الیاف و ماتریس سیمانی می باشد. خصوصیات هندسی الیاف شامل طول مدفون، گام تابیدگی، قطر معادل و شکل سطح مقطع الیاف است. در صورت کفایت مقاومت الیاف و ماتریس سیمانی، کاهش گام تابیدگی و افزایش طول مدفون و قطر معادل می تواند باعث بهبود رفتار بیرون کشیدن الیاف منفرد تابیده فولادی شود. شکل سطح مقطع این الیاف بسیار متنوع بوده و می تواند تأثیر به سزایی بر روی رفتار بیرون کشیدن این الیاف داشته باشد. از این رو در این پژوهش اثر شکل سطح مقطع الیاف تابیده بر روی رفتار بیرون کشیدن مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی

پیشین

مینزل^۱ در سال ۱۹۵۲ رفتار بیرون کشیدن میلگرد فولادی تابیده پیوسته از ماتریس سیمانی را مورد بررسی قرار داد. مینزل به این نتیجه رسید که تابیده کردن آرماتور فولادی باعث ۱۰ برابر شدن تنش در آرماتور نسبت به آرماتور مستقیم و صاف در $0/4$ میلی‌متر اول لغزش می‌شود [۱۴].

مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف از ماتریس سیمانی به کمک روش اجزای محدود برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط لی^۲ و مباشر^۳ صورت گرفت. الیاف مدل‌سازی شده در این پژوهش الیاف مستقیم و صاف بودند. در این مدل‌سازی سطح مشترک بین الیاف و ماتریس سیمانی به‌عنوان مصالحی با سختی کمتر در نظر گرفته شد و برای اصطکاک بین سطوح از مدل اصطکاک کولمب^۴ استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با شروع گسیختگی در سطح مشترک بین الیاف و ماتریس سیمانی، نیروی بیرون کشیدن به مقدار بیشینه می‌رسد و شروع گسیختگی در ماتریس سیمانی از جایی شروع می‌شود که الیاف در ماتریس نفوذ کرده‌اند [۱۵].

نعمان^۵ در سال ۱۹۹۹ الیاف تابیده را ابداع نمود. شکل سطح مقطع این الیاف به‌صورت چندضلعی منتظم (مثلث متساوی الاضلاع و مربع) بود. همچنین با معرفی نسبت مؤثر ذاتی الیاف، شکل بهینه‌ای از سطح مقطع الیاف را ارائه نمود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد درحالتی که مساحت سطح مقطع ثابت باشد، افزایش سطح جانبی الیاف موجب افزایش نیروی بیرون کشیدن ناشی از چسبندگی اصطکاکی

^۱ Menzel

^۲ Li

^۳ Mobasher

^۴ Coulomb

^۵ Naaman

الیاف می‌شود. همچنین تابیده کردن الیاف بهترین و مؤثرترین راه برای ایجاد بهبود چسبندگی مکانیکی می‌باشد و منجر به رفتار سخت‌شدگی لغزش می‌شود [۱۶].

در سال ۲۰۰۲ پارامترهای مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی توسط سوجیوورا^۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی حکایت از آن دارد که کاهش گام تابیدگی تا مقدار مشخصی که وابسته به مقاومت ماتریس سیمانی است، موجب افزایش نیرو و انرژی بیرون کشیدن می‌شود. افزایش طول مدفون الیاف منجر به افزایش چسبندگی اصطکاکی و در نتیجه افزایش نیروی بیرون کشیدن می‌شود. هنگامی که رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده به صورت شبه پلاستیک می‌باشد، افزایش مقاومت ماتریس سیمانی، نیروی بیرون کشیدن را افزایش نمی‌دهد ولی افزایش مقاومت الیاف منجر به افزایش نیروی بیرون کشیدن می‌شود. افزایش نسبت اضلاع الیاف مستطیل شکل به علت کاهش چسبندگی مکانیکی، باعث کاهش نیروی بیرون کشیدن می‌شود و الیاف مربع شکل رفتار بهتری نسبت به الیاف مستطیل شکل دارند. نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده که محور طولی آن‌ها با راستای لغزش موازی نیستند، کمتر از حالتی که موازی هستند، نیست و رفتار شبه پلاستیک دارند [۹].

در سال ۲۰۰۳ یانگ^۲، کین^۳ و پنگ^۴ تأثیر ابعاد نمونه بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف مستقیم و صاف را به کمک روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند. در این مدل‌سازی سطح مشترک بین الیاف و ماتریس سیمانی به صورت پیوسته و رفتار مصالح به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شد. به دلیل

^۱ Sujivorakul

^۲ Yang

^۳ Qin

^۴ Peng

تقارن، مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی انجام شد. در این پژوهش تأثیر طول مدفون الیاف و ضخامت ماتریس سیمانی بر روی تنش‌های پیوستگی و فرایند گسیختگی بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در ابتدا و انتهای الیاف تمرکز تنش وجود دارد. مقدار تمرکز تنش در ابتدای الیاف، به طول مدفون الیاف وابسته نمی‌باشد ولی افزایش طول مدفون الیاف منجر به کاهش تمرکز تنش انتهای الیاف می‌شود. همچنین بیشترین تنش عمودی در ابتدای الیاف مشاهده شد [۱۷].

در سال ۲۰۱۰ رفتار بیرون کشیدن الیاف قلاب‌دار فولادی به کمک روش اجزای محدود توسط کرایکی^۱ و همکاران شبیه‌سازی شد. به دلیل تقارن، نیمی از کل هندسه به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. همچنین رفتار غیرخطی برای مصالح در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اختصاص ضریب اصطکاک ۰/۱، نتایج حاصل از مدل‌سازی و آزمایشگاهی انطباق خوبی با یکدیگر دارند. همچنین هندسه‌ی الیاف تأثیر به‌سزایی بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف قلاب‌دار داشته و قلاب انتهای الیاف باعث افزایش چشمگیر نیروی بیرون کشیدن می‌شود [۱۸].

در سال ۲۰۱۲ چین^۲ و ژاوو^۳ رفتار بیرون کشیدن الیاف فولادی را به کمک نرم‌افزار ANSYS به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. الیاف فولادی مورد استفاده در این پژوهش الیاف با انتهای پهن شده قلاب‌دار بودند. همچنین رفتار پلاستیک الیاف فولادی به کمک معیار فون-میسز، گسیختگی ماتریس سیمانی به کمک مدل ویلیا و وارنک و رفتار سطح مشترک الیاف و ماتریس سیمانی به کمک مدل اصطکاک کولمب شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که از مدل مذکور می‌توان به‌منظور بهینه‌یابی هندسه، طول مدفون و قطر الیاف استفاده نمود [۱۹].

^۱ Kyriaki

^۲ Chin

^۳ Xiao

در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ الیس^۱، مک دوول^۲ و ژو^۳ توانستند با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد تابیده‌ی فولادی را شبیه‌سازی کنند. در این مدل برای شبیه‌سازی رفتار مصالح سیمانی از مدل دراگر-پراگر توسعه‌یافته^۴ و برای مصالح الیاف فولادی از مدل پلاستیک کلاسیک فلزات^۵ استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار اصطکاکی سطوح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی از مدل اصطکاک کولمب بهره گرفته شد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی ۴۴ و ۸۴ مگا پاسکال بود. الیاف تابیده‌ی بکار برده شده در این مدل‌سازی دارای سطح مقطع مثلث شکل با قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر، طول مدفون ۱۲/۵ میلی‌متر، طول آزاد ۳ میلی‌متر و گام تابیدگی ۶/۳۵، ۱۲/۷ و ۳۸/۱ میلی‌متر بودند. اعوجاج^۶ الیاف و تنش‌های باقی‌مانده ناشی از تابیده شدن الیاف نادیده گرفته شد. همچنین چسبندگی شیمیایی بین الیاف و ماتریس سیمانی در نظر گرفته نشد. پیش از بیرون کشیدن الیاف از ماتریس سیمانی، انقباض^۷ مصالح سیمانی نیز در نظر گرفته شد. سرعت بیرون کشیدن الیاف از ماتریس سیمانی ۱۰ متر بر ثانیه اتخاذ شد. همچنین در این مدل‌سازی از ۹۰۰۰۰ المان چهاروجهی چهار گره‌ای برای ماتریس سیمانی و ۴۰۰۰ المان شش‌وجهی هشت گره‌ای برای الیاف و ۱۴۰۰۰ المان چهاروجهی چهار گره‌ای برای ناحیه انتقال دو سطح الیاف و ماتریس سیمانی استفاده شد. ضریب

^۱ Ellis

^۲ McDowell

^۳ Zhou

^۴ Extended Drucker-Prager

^۵ Classical Metal Plasticity

^۶ warping

^۷ shrinkage

اصطکاک بین الیاف و ماتریس سیمانی ۰/۴۵ و بین ماتریس سیمانی با خودش ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

نتایج مهم به دست آمده از مدل سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده نشان داد که [۲۰ و ۲۱]:

- ریزساختار الیاف تأثیر به سزایی بر رفتار بیرون کشیدن دارد و تابیده کردن الیاف منجر به افزایش

نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده می شود. نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده به ترتیب ۵

و ۱۰ برابر نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف مستقیم و صاف است.

- کاهش طول آزاد الیاف، پاسخ بیرون کشیدگی الیاف را ارتقا می بخشد.

- برای شبیه سازی رفتار بیرون کشیدگی الیاف تابیده با مصالح سیمانی با مقاومت بالا، نمی توان از

ضریب اصطکاک مربوط به مصالح سیمانی با مقاومت پایین تر استفاده نمود [۲۰ و ۲۱].

در ادامه مدلی توسط نرم افزار MATLAB به منظور بررسی رفتار کششی الیاف تابیده ی فولادی در

ماتریس سیمانی ارائه شد. ابعاد ماتریس سیمانی $50 \times 50 \times 50$ میلی متر در نظر گرفته شد. در این مدل

ترکی به صورت پیش فرض در مصالح سیمانی ایجاد شد. رفتار بیرون کشیدن الیاف توسط رفتار بیرون

کشیدن الیاف منفرد محاسبه شد. دو المان به صورت فنی برای تعریف رفتار کشش-بازشدگی در وجوه

ترک پیش فرض به کار برده شد. این مدل شامل دو المان صلب و تعداد زیادی الیاف که دو وجه ترک

پیش فرض را پل زده اند، می شود. در ماتریس سیمانی مدل شده، الیاف به صورت تصادفی جهت گیری و

قرار داده شد. یکی از دو المان صلب ثابت نگه داشته شد؛ و دیگری تحت تغییر مکان قرار گرفت. این

مدل شامل فرض هایی می باشد. ترک به صورت پیش فرض ایجاد شده است و صفحه ی ترک خوردگی نیز

تعیین شده است. همچنین فرض شده است که تنش های اطراف هر الیاف بر روی الیاف دیگر تأثیر ندارد.

رفتار الیاف نیز مستقل از نرخ کرنش فرض شده است و هنگامی که الیاف از ماتریس سیمانی به طور

کامل بیرون کشیده می شود، نیروی آن به طور یکنواخت بین الیاف دیگر توزیع می شود. خروجی های

این مدل مقاومت کششی بیشینه و چگالی اتلاف انرژی^۱ بودند و هدف از ارائه‌ی این شبیه‌سازی، مدل‌سازی رفتار صفحه‌ای^۲ در برابر بار انفجار در نرم‌افزار ABAQUS بود [۲۱].

یک مدل سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار ABAQUS به منظور شبیه‌سازی رفتار صفحه‌ای حاوی الیاف تابیده در برابر بار انفجار ارائه گردید. این صفحه به ضخامت ۵۰/۴ میلی‌متر، عرض ۸۶۳/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۲۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. بالا و پایین صفحه توسط شیارهایی از جنس فولاد نگه‌داشته شده است. صفحه شامل المان‌های حجمی^۳ و المان‌های چسبنده^۴ با ضخامت صفر می‌باشد. به منظور مدل‌سازی مقادیر متوسط خصوصیات چسبندگی، از توزیع گوسی^۵ استفاده شده است. در این مدل برای شبیه‌سازی رفتار المان‌های حجمی از مدل دراگر-پراگر توسعه‌یافته و برای شبیه‌سازی رفتار اصطکاکی از مدل اصطکاک کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۴۵ بهره گرفته شد. برای شبیه‌سازی رفتار المان‌های چسبنده با ضخامت صفر که بین المان‌های حجیم می‌باشند، برنامه‌ای به وسیله‌ی Subroutine VUMAT نوشته شد. در این مدل اثر مقاومت کششی، چگالی اتلاف انرژی و ضخامت صفحه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با دو برابر کردن مقاومت کششی و چگالی اتلاف انرژی، ضربه‌ی ویژه‌ی بحرانی^۶ به ترتیب ۱۶ و ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ضخامت صفحه منجر به افزایش ضربه‌ی ویژه‌ی بحرانی شد و در بعضی موارد صفحه دچار گسیختگی نشد [۲۱].

جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از ادبیات فنی پیشین را نشان می‌دهد.

^۱ Dissipated Energy Density

^۲ Panel

^۳ Bulk Elements

^۴ Cohesive Elements

^۵ Gaussian

^۶ Critical Specific Impulse

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از ادبیات فنی پیشین

پژوهش‌گر	سال	الیاف	فعالیت	نتیجه
منزل	۱۹۵۲	میلگرد فولادی تابیده	رفتار بیرون کشیدن	ده برابر شدن تنش در آرماتور نسبت به آرماتور مستقیم و صاف در ۰/۴ میلی‌متر اول لغزش.
لی و مباشر	۱۹۹۷	الیاف مستقیم و صاف	مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن	با شروع گسیختگی در سطح مشترک بین الیاف و ماتریس سیمانی، نیروی بیرون کشیدن به مقدار بیشینه رسید.
نعمان	۱۹۹۹	الیاف تابیده	ابداع و معرفی الیاف تابیده	تابیده کردن الیاف بهترین و مؤثرترین راه برای ایجاد بهبود چسبندگی مکانیکی می‌باشد و منجر به رفتار سخت‌شدگی لغزش می‌شود.
سوجیوورا کول	۲۰۰۲	الیاف تابیده	بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن	الیاف مربع شکل رفتار بهتری نسبت به الیاف مستطیل شکل دارند. افزایش نسبت اضلاع الیاف مستطیل شکل به علت کاهش چسبندگی مکانیکی، باعث کاهش نیروی بیرون کشیدن می‌شود.
یانگ، کین و پنگ	۲۰۰۳	الیاف مستقیم و صاف	تأثیر ابعاد نمونه بر روی رفتار بیرون کشیدن	در ابتدا و انتهای الیاف تمرکز تنش وجود دارد. مقدار تمرکز تنش در ابتدای الیاف، به طول مدفون الیاف وابسته نمی‌باشد ولی افزایش طول مدفون الیاف منجر به کاهش تمرکز تنش انتهای الیاف می‌شود. همچنین بیشترین تنش عمودی در ابتدای الیاف مشاهده شد.
کرایکی، میستاکیدیس، پانتیوسیا و زیگومالاس	۲۰۱۰	الیاف قلاب‌دار	مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن	هندسه‌ی الیاف تأثیر به‌سزایی بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف قلاب‌دار داشته و قلاب انتهای الیاف باعث افزایش چشم‌گیر نیروی بیرون کشیدن می‌شود.
چین و ژاوو	۲۰۱۲	الیاف قلاب‌دار و با انتهای پهن‌شده	مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن	از این مدل به‌منظور بهینه‌یابی هندسه، طول مدفون و قطر الیاف استفاده شد.
الیس، مک دوول و ژو	۲۰۱۴	الیاف تابیده	مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن	تابیده کردن الیاف منجر به افزایش نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده شد. نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده به ترتیب ۵ و ۱۰ برابر نیرو و انرژی بیرون کشیدن الیاف مستقیم و صاف است. کاهش طول آزاد الیاف، پاسخ بیرون کشیدگی الیاف را ارتقا می‌بخشد. برای شبیه‌سازی رفتار بیرون کشیدگی الیاف تابیده با مصالح سیمانی با مقاومت بالا، نمی‌توان از ضریب اصطکاک مربوط به مصالح سیمانی با مقاومت پایین‌تر استفاده نمود.

فصل سوم: رفتار مکانیکی و

اصطکاکي مصالح

۳-۱- رفتار مکانیکی مصالح

مصالح استفاده شده در این پژوهش شامل فولاد و بتن می شود که رفتار مکانیکی آن ها شرح داده خواهد شد.

۳-۱-۱- فولاد

در این قسمت به بررسی مدل سخت شدگی کینماتیکی^۱ موجود در نرم افزار ABAQUS پرداخته می شود. مدل سخت شدگی کینماتیکی به منظور شبیه سازی رفتار غیر الاستیک مصالح مورد استفاده قرار می گیرد. مدل سخت شدگی کینماتیکی شامل مدل سخت شدگی کینماتیکی خطی و مدل سخت شدگی کینماتیکی و همسانگرد غیرخطی^۲ می باشد که در این پژوهش از مدل سخت شدگی کینماتیکی و همسانگرد غیرخطی استفاده شده است. در ادامه سطوح تسلیم، قانون جاری شدن^۳ و سخت شدگی شرح داده خواهد شد [۲۲].

۳-۱-۱-۱- سطوح تسلیم

مدل های سخت شدگی کینماتیکی که برای مدل سازی رفتار فلزات در معرض بارگذاری چرخه ای^۴ استفاده می شوند، مستقل از فشار^۵ هستند؛ به عبارت دیگر، جاری شدن فلزات مستقل از تنش فشاری معادل است. این مدل ها برای اکثر فلزات در شرایط بارگذاری چرخه ای مناسب هستند. مدل

^۱ Kinematic Hardening Model

^۲ Nonlinear Isotropic/Kinematic Hardening Model

^۳ Flow Rule

^۴ Cyclic Loading

^۵ Pressure-Independent

سخت‌شدگی کینماتیکی خطی می‌تواند با سطح تسلیم میسز یا هیل^۱ استفاده شود. مدل سخت‌شدگی کینماتیکی و همسانگرد غیرخطی می‌تواند فقط با سطح تسلیم هیل در تحلیل دینامیکی صریح استفاده شود. سطح تسلیم مستقل از فشار توسط رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma^0 = 0 \quad (1-3)$$

که σ^0 تنش تسلیم و $f(\sigma - \alpha)$ تنش میسز معادل یا پتانسیل هیل نسبت به پیش تنش α ^۲ است. تنش میسز معادل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(\sigma - \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2} (S - \alpha^{dev}) : (S - \alpha^{dev})} \quad (2-3)$$

که S تانسور تنش انحرافی^۳ (که به صورت $S = \sigma + pI$ تعریف می‌شود که σ تانسور تنش، p تنش فشاری معادل و I تانسور همانی^۴ است) و α^{dev} قسمت انحرافی تانسور پیش تنش می‌باشد [۲۲].

۳-۱-۱-۲- قانون جاری شدن

مدل سخت‌شدگی کینماتیکی فرض می‌کند جریان پلاستیک وابسته^۵ به صورت زیر است:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\epsilon}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3-3)$$

^۱ Hill

^۲ Backstress

^۳ Deviatoric

^۴ Identity

^۵ Associated Plastic Flow

که $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ جریان پلاستیک و $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ جریان پلاستیک معادل است. رشد کرنش پلاستیک معادل از عبارت کار پلاستیک معادل زیر به دست می آید:

$$\sigma^0 \dot{\epsilon}^{pl} = \sigma : \dot{\epsilon}^{pl} \quad (۴-۳)$$

که $\dot{\epsilon}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{pl} : \dot{\epsilon}^{pl}}$ است. جریان وابسته، برای فلزات در معرض بارگذاری چرخه‌ای در اندازه‌های بسیار کوچک قابل قبول است [۲۲].

۳-۱-۱-۳- سخت‌شدگی

مدل سخت‌شدگی کینماتیکی همسانگرد غیرخطی تلفیقی از هر دو مدل سخت‌شدگی کینماتیکی غیرخطی و همسانگرد غیرخطی است. فرایند سخت‌شدگی این مدل شامل دو جزء است. جزء اول، سخت‌شدگی کینماتیکی غیرخطی است که انتقال سطح تسلیم را در فضای تنش در میان پیش تنش α توصیف می‌کند. جزء دوم، سخت‌شدگی همسانگرد غیرخطی است که تغییرات تنش معادل که خود معرف اندازه سطح تسلیم σ^0 به‌عنوان تابعی از تغییرشکل پلاستیک است را توصیف می‌کند [۲۲].

در برخی موارد به‌منظور بهبود نتایج می‌توان چندین جزء سخت‌شدگی (پیش تنش) اتخاذ شود. قانون سخت‌شدگی برای هر پیش تنش به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\alpha}_k = C_k \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma_k \alpha_k \dot{\epsilon}^{pl} \quad (۵-۳)$$

و جمع پیش تنش‌ها به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (۶-۳)$$

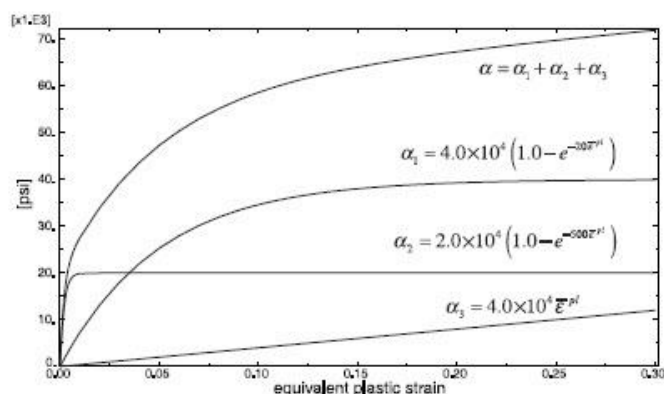
که N تعداد پیش تنش‌ها و C_k مدول سخت‌شدگی کینماتیکی اولیه است و γ_k نرخ کاهش مدول سخت‌شدگی کینماتیکی با افزایش تغییرشکل پلاستیک را تخمین می‌زند. قانون سخت‌شدگی

کینماتیکی به دو قسمت انحرافی و هیدرواستاتیک تقسیم می‌شود و فقط قسمت انحرافی بر روی رفتار ماده تأثیر می‌گذارد. زمانی که C_k و γ_k صفر هستند، این مدل به مدل سخت‌شدگی همسانگرد تغییر می‌کند. زمانی که همه γ_k ها صفر هستند؛ قانون سخت‌شدگی بیگنر خطی بازیابی می‌شود. شکل ۳-۱ نمونه‌ای از سخت‌شدگی کینماتیکی غیرخطی با سه پیش‌تنش را نشان می‌دهد که هر پیش‌تنش محدودی متفاوتی از کرنش‌ها را پوشش می‌دهد و قانون سخت‌شدگی خطی برای کرنش‌های بزرگ حفظ می‌شود [۲۲].

رفتار سخت‌شدگی همسانگرد مدل، اندازه‌ی سطح تسلیم، σ^0 که تابعی از کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\epsilon}^{pl}$ است را تعریف می‌کند. این قانون رشد می‌تواند به‌طور مستقیم با اختصاص σ^0 یا با قانون نمایی زیر معرفی شود:

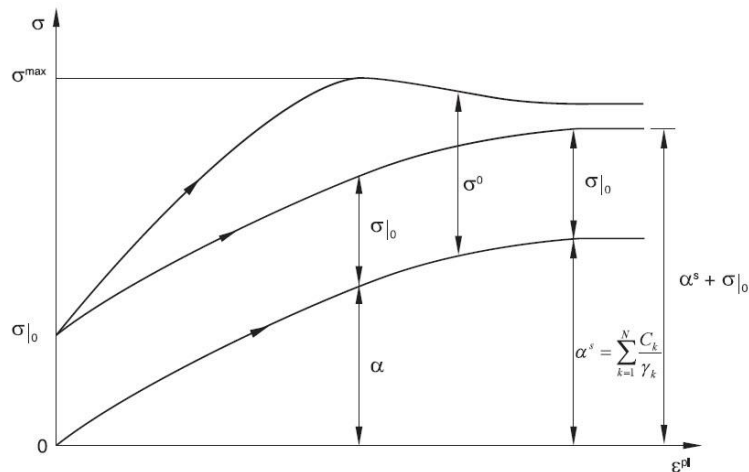
$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\bar{\epsilon}^{pl}}) \quad (7-3)$$

که $\sigma|_0$ تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر، Q_∞ حداکثر تغییر در اندازه سطح تسلیم است و b معرف نرخ تغییرات اندازه سطح تسلیم با رشد کرنش پلاستیک می‌باشد. زمانی که تنش معادلی که اندازه سطح تسلیم را تعریف می‌کند ($\sigma^0 = \sigma|_0$) ثابت باقی‌بماند؛ این مدل به مدل سخت‌شدگی کینماتیکی غیرخطی تغییر می‌کند [۲۲].

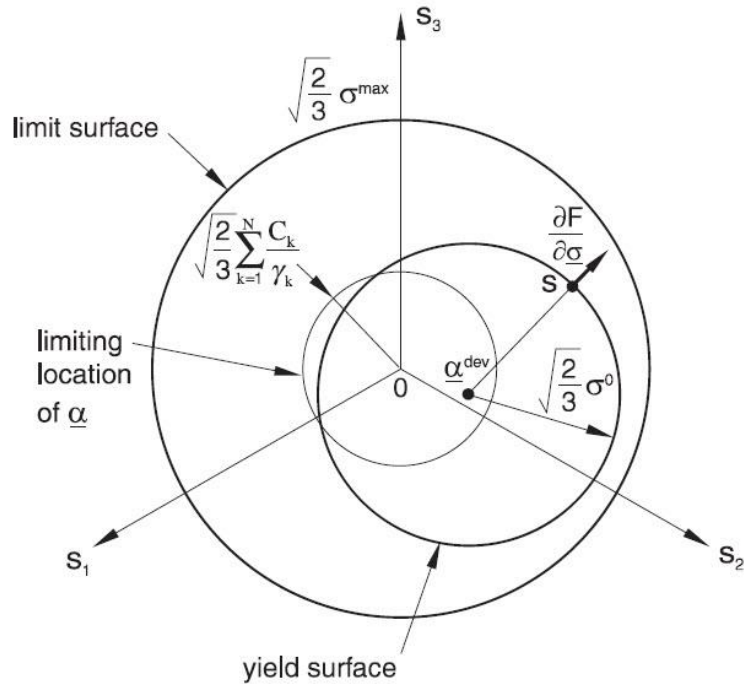


شکل ۳-۱: مدل سخت‌شدگی کینماتیکی با سه پیش‌تنش [۲۲].

اجزای سخت‌شدگی و همسانگرد و کینماتیکی در شکل ۲-۳ در حالت بارگذاری تک‌محوره و در شکل ۳-۳ در حالت بارگذاری چند محوره نشان داده شده است. همچنین پیش تنش در داخل یک استوانه به شعاع $\sqrt{2/3} \alpha^s = \sqrt{2/3} \sum_k^N C_k / \gamma_k$ تعریف می‌شود که مقدار α در حالت کرنش‌های پلاستیک بزرگ است. نقطه‌ی تنش بایستی داخل استوانه‌ای به شعاع $\sqrt{2/3} \sigma_{max}$ قرار گیرد زیرا سطح تسلیم کران‌دار باقی می‌ماند. در کرنش‌های پلاستیک بزرگ، هر نقطه‌ی تنش، داخل یک استوانه به شعاع $\sqrt{2/3} (\alpha^s + \sigma^s)$ محدود می‌شود که تنش معادلی است که اندازه‌ی سطح تسلیم را در کرنش‌های پلاستیک بزرگ تعریف می‌کند. اگر برای جزء همسانگرد، داده‌ها به صورت جدولی وارد شوند؛ α^s آخرین مقدار داده شده برای تعریف اندازه‌ی سطح تسلیم خواهد بود [۲۲].



شکل ۲-۳: نمایش یک‌بعدی سخت‌شدگی مدل همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی [۲۲].



شکل ۳-۳: نمایش سه بعدی سخت‌شدگی مدل همسانگرد کینماتیکی غیرخطی [۲۲].

۳-۱-۲- بتن

در نرم‌افزار ABAQUS برای در نظر گرفتن خرابی مصالح سه نوع ترک‌خوردگی قابل مدل‌سازی است: مدل‌سازی ترک‌خوردگی با مدل ترک پخشی بتن^۱؛ مدل‌سازی ترک‌خوردگی با مدل ترک خورگی شکننده بتن^۲ و مدل‌سازی ترک‌خوردگی با مدل خرابی پلاستیک بتن^۳. مدل خرابی پلاستیک بتن دو مکانیزم گسیختگی ترک‌خوردگی کششی و شکست فشاری مصالح بتنی را دربر می‌گیرد [۲۲].

معیار گسیختگی در محدوده‌ی پلاستیک ماده تحت تنش‌های ترکیبی بیان می‌شود. این معیار به دو دسته‌ی عمده بر اساس پاسخ ماده به فشار هیدرواستاتیک تقسیم‌بندی می‌شود. در اکثر مواد، رفتار

^۱ Smearred Crack Concrete Model

^۲ Brittle Crack Concrete Model

^۳ Concrete Damage Plasticity Model

شکل پذیر با نام وابسته به فشار هیدرواستاتیک شناخته می‌شود و مواد غیرفلزی مانند خاک، سنگ و بتن از این دسته بوده و وابسته به فشار هستند. این مدل، مدل خرابی با رفتار پلاستیک و پیوسته^۱ است. ارزیابی گسیختگی با دو متغیر سخت‌شدگی $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ، $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ کنترل می‌شود که به ترتیب مکانیزم گسیختگی تحت بارهای کششی و فشاری است. $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ به ترتیب به‌عنوان کرنش‌های پلاستیک کششی و فشاری معادل می‌باشد [۲۲].

۳-۱-۲-۱- رفتار کششی و فشاری تک‌محوره

همان‌طور که در شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ نشان داده شده است، این مدل فرض می‌کند که نمودار فشاری و کششی تک‌محوره بتن، توسط خرابی پلاستیک مشخص شده است. نمودار تنش-کرنش تحت کشش تک‌محوره، رابطه‌ی خطی الاستیک دارد تا هنگامی که به مقدار تنش گسیختگی σ_{t0} برسد. تنش گسیختگی به شروع ترک‌های خیلی ریز در مصالح بتنی مربوط است. بعد از تنش گسیختگی، در شاخه‌ی نزولی یا نمودار تنش-کرنش نرم‌شدگی، ترک‌های ریز به‌صورت ترک‌های درشت نمایان می‌شود که موجب کرنش‌های موضعی در ساختار بتن می‌شود. تحت فشار تک‌محوره، نمودار تنش-کرنش تا مقدار تسلیم اولیه σ_{c0} خطی است. در محدوده‌ی پلاستیک، نمودار توسط تنش سخت‌شدگی تعیین می‌شود و به مقدار حداکثر خود، σ_{cu} می‌رسد. پس از آن شاهد نرم‌شدگی کرنش خواهیم بود [۳۳].

منحنی تنش-کرنش تک‌محوره قابل تبدیل به منحنی‌های تنش در مقابل کرنش پلاستیک می‌باشد؛

بنابراین:

$$\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (۸-۳)$$

^۱ Continuum

$$\sigma_c = \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (9-3)$$

که زیرنویس c, t به ترتیب مربوط به کشش و فشار، $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ کرنش‌های پلاستیک معادل، $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ نرخ کرنش‌های پلاستیک معادل، θ دما و f_i ($i = 1, 2, \dots$) دیگر متغیرهای میدانی از پیش تعریف شده، هستند [۲۲].

هنگامی که نمونه‌ی بتنی از هر نقطه از شاخه‌ی نزولی منحنی تنش-کرنش باربرداری شده است، شیب شاخه‌ی باربرداری نسبت به شیب اولیه کمتر می‌باشد. در واقع به نظر می‌رسد که سختی الاستیک مصالح آسیب دیده است. مقدار خرابی سختی الاستیک توسط دو متغیر خرابی d_c و d_t مشخص می‌شود که تابعی از کرنش پلاستیک، دما و متغیرهای میدانی فرض شده است [۲۲]:

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i) \quad 0 \leq d_t \leq 1 \quad (10-3)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad 0 \leq d_c \leq 1 \quad (11-3)$$

مقدار خرابی می‌تواند مقادیری از صفر تا یک داشته باشد که صفر نشان‌دهنده‌ی مصالح تخریب نشده و یک مصالحی کاملاً تخریب شده را نشان می‌دهد. اگر E_0 سختی الاستیک اولیه مصالح (خراب نشده) باشد، روابط تنش-کرنش تحت بارهای کششی و فشاری تک‌محوره به ترتیب زیر است:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (12-3)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (13-3)$$

و تنش‌های مؤثر فشاری و کششی که اندازه‌ی سطح تسلیم را مشخص می‌کنند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (14-3)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (15-3)$$

نرم افزار ABAQUS به صورت خودکار با استفاده از روابط زیر مقادیر کرنش غیر الاستیک و کرنش ترک خوردگی را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می کند:

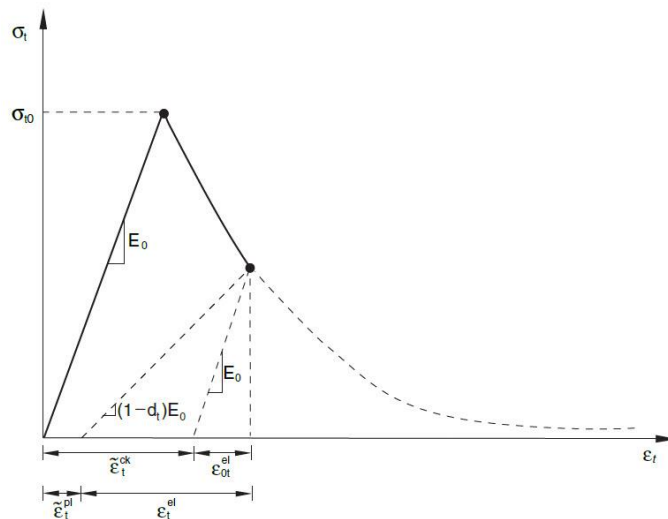
$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (16-3)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (17-3)$$

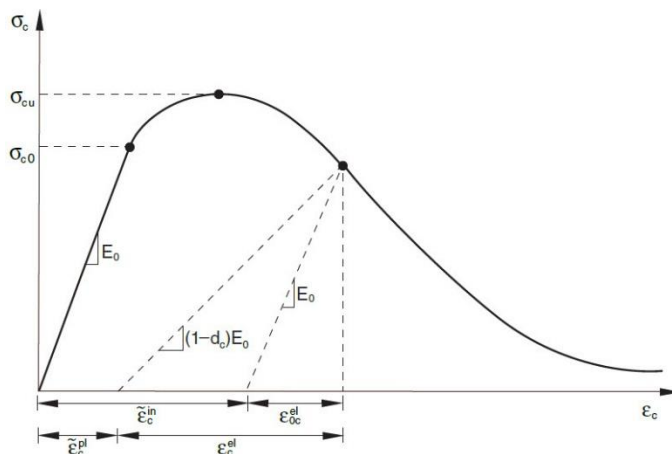
اگر مقادیر کرنش پلاستیک منفی شود یا با افزایش کرنش غیر الاستیک و کرنش ترک خوردگی، مقادیر کرنش پلاستیک کاهش یابد، ABAQUS یک پیغام اخطار نشان خواهد داد. همچنین انتخاب کردن مقدار ۱ برای متغیرهای خرابی منجر به بروز خطای عددی در نرم افزار می شود. به طور کلی، خرابی بیش از حد، می تواند اثر بحرانی بر روی نرخ همگرایی بگذارد. توصیه شده است که از مقادیر متغیرهای خرابی بالای ۰/۹۹ که مربوط به کاهش ۹۹ درصدی سختی است، اجتناب شود [۲۲].

برای بتنی که با مش نسبتاً دقیق مدل سازی شده است فرض می شود در حالت نرم شدگی کرنش، تنش به صورت خطی تا مقدار صفر در کرنش کل که ده برابر کرنش گسیختگی است، کاهش می یابد [۲۲].

در برخی موارد، حساسیت به مش بندی^۱ در نتایج مشاهده می‌شود و به یک حل منحصر به فرد همگرا نمی‌شود؛ زیرا ریز کردن مش بندی منجر به نوارهای باریک‌تر ترک خوردگی می‌شوند. این اتفاق معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که ترک خوردگی به صورت محلی^۲ در سازه رخ می‌دهد و ریز کردن مش بندی منجر به تشکیل ترک‌های اضافی نمی‌شود [۲۲].



شکل ۳-۴: نمودار تنش- کرنش تک‌محوره‌ی کششی [۲۲].



شکل ۳-۵: نمودار تنش- کرنش تک‌محوره‌ی فشاری [۲۲].

^۱ Mesh Sensitivity

^۲ Local

۳-۱-۲-۲- پلاستیسیته‌ی بتن

در ادامه نامتغیرهای تنش مؤثر، پتانسیل جریان و سطح تسلیم توضیح داده می‌شود.

۳-۱-۲-۱- نامتغیرهای تنش مؤثر

تنش مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\sigma} = D_0^{el}(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (18-3)$$

تابع پتانسیل جریان پلاستیک و سطح تسلیم، امکان استفاده از دو نامتغیر تنش مربوط به تانسور

تنش مؤثر را فراهم می‌کند، یعنی تنش فشار هیدرواستاتیکی:

$$\bar{p} = -\frac{1}{3}\text{trace}(\bar{\sigma}) \quad (19-3)$$

و تنش مؤثر معادل می‌سز:

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{S}:\bar{S})} \quad (20-3)$$

که \bar{S} تنش انحرافی مؤثر^۱ است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I \quad (21-3)$$

^۱ Effective Stress Deviator

۳-۱-۲-۲-۲- جریان پلاستیک

در مدل خرابی پلاستیک بتن، پتانسیل جاری شدن پلاستیک به صورت غیر وابسته^۱ است. پتانسیل جاری شدن، G ، برای این مدل، تابع هذلولی دراکر-پراگر^۲ است:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (۲۲-۳)$$

$\psi(\theta, f_i)$: زاویه اتساع^۳ در صفحه $p-q$ ؛

$$\sigma_{t0}(\theta, f_i) = \sigma_t |_{\dot{\epsilon}_t^{pl}=0, \dot{\epsilon}_t^{pl}=0}$$
 تنش گسیختگی کششی تک محوره و

$\epsilon(\theta, f_i)$: خروج از مرکزیت^۴ می باشد و نرخ را تعیین می کند که در آن تابع به خط مجانب، نزدیک

می شود (وقتی که خروج از مرکزیت به صفر میل کند، پتانسیل جاری شدن به خط راست متمایل

می شود) [۲۲].

۳-۱-۲-۲-۲- تابع تسلیم

^۱ Nonassociated

^۲ Drucker-Prager Hyperbolic

^۳ Dilation Angle

^۴ Eccentricity

این مدل از تابع تسلیم لوبلینر^۱ و همکاران (۱۹۸۹) با تغییرات پیشنهاد شده توسط لی^۲ و فنوس^۳ (۱۹۹۸) استفاده می‌کند تا تغییرات مختلف مقاومت را تحت کشش و فشار به دست آورد. تغییرات سطح تسلیم توسط متغیرهای سخت‌شدگی $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ و $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ کنترل می‌شود. تابع تسلیم با داشتن عبارات تنش‌های مؤثر به صورت زیر خواهد بود:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl})\langle\hat{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\sigma}_{max}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (23-3)$$

که

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0})-1} \quad 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (24-3)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (25-3)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c-1} \quad (26-3)$$

و

$\hat{\sigma}_{max}$: تنش مؤثر اصلی حداکثر^۴؛

σ_{b0}/σ_{c0} : نسبت تنش تسلیم فشاری دومحوره‌ی اولیه^۵ به تنش تسلیم فشاری تک‌محوره اولیه^۶ (با مقدار پیش‌فرض ۱/۱۶)؛

^۱ Lubliner

^۲ Lee

^۳ Fenves

^۴ Maximum Principal Effective Stress

^۵ Initial Equibiaxial Compressive Yield Stress

^۶ Initial Uniaxial Compressive Yield Stress

K_c : نسبت دومین نامتغیر تنش روی نصف‌النهار کششی^۱ $q_{(TM)}$ ، به دومین نامتغیر تنش نصف انهاری فشاری $q_{(CM)}$ ، در ابتدای تسلیم برای هر مقدار داده‌شده‌ی نامتغیر فشار p ، به‌طوری‌که تنش اصلی ماکزیمم، منفی است و باید شرط $0.5 < K_c \leq 1.0$ برقرار باشد (مقدار پیش‌فرض 0.66 است)؛

$$\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})$$

تنش کششی مؤثر و

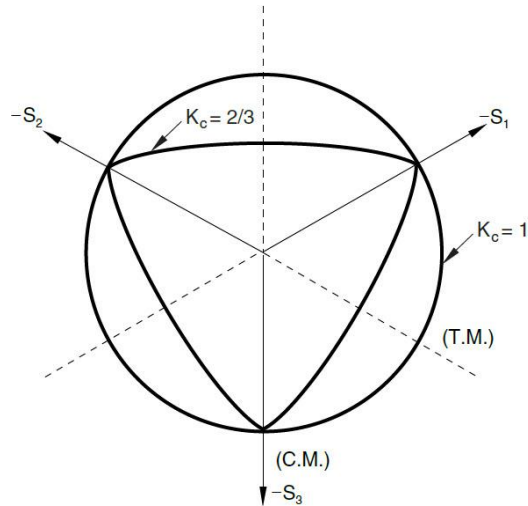
$$\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})$$

تنش فشاری مؤثر است [۲۲].

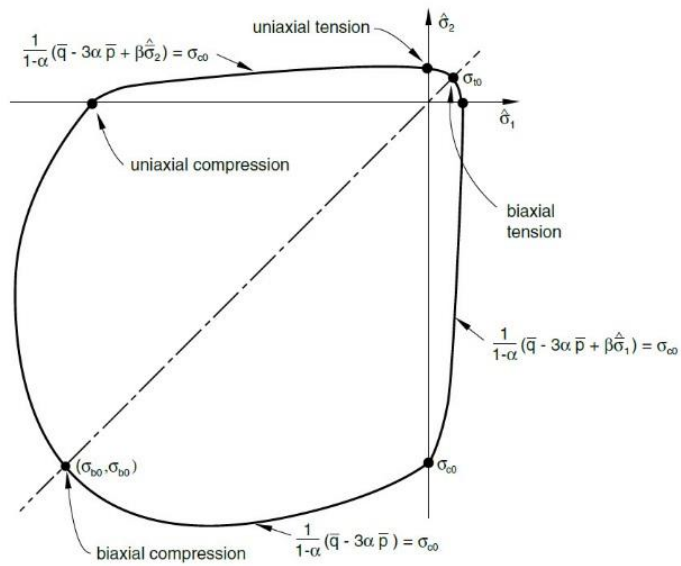
شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ به ترتیب سطوح تسلیم را بر روی صفحه‌ی انحرافی و در فضای تنش دومی‌محوره،

نشان می‌دهد.

^۱ Second Stress Invariant on the Tensile Meridian



شکل ۳-۶: سطوح تسلیم در صفحه‌ی انحرافی با مقادیر مختلف K_c [۲۲].



شکل ۳-۷: سطح تسلیم در فضای تنش دومیحوره [۲۲].

۳-۲- رفتار اصطکاکی

هنگامی که سطوح با یکدیگر در تماس هستند، تنش برشی و تنش قائم در میان سطوح تماس منتقل می‌شود که بین این دو نیرو رابطه‌ای برقرار است. این رابطه، اصطکاک بین سطوح می‌باشد. مدل‌های اصطکاکی در نرم‌افزار ABAQUS شامل مدل اصطکاک همسانگرد کولمب و مدل اصطکاک غیر همسانگرد کولمب می‌شود. در این پژوهش از مدل اصطکاک همسانگرد کولمب استفاده شده است.

مدل اصطکاک کولمب مبتنی بر ارتباط تنش اصطکاکی (برشی) به فشار تماسی بین سطوح تماس است. در این مدل سطوح تماس می‌توانند قبل از اینکه نسبت به یکدیگر بلغزند، تنش‌های برشی را تا مقدار مشخصی در سطح تماس مشترک خود تحمل کنند که این وضعیت به‌عنوان وضعیت چسبندگی^۱ شناخته می‌شود. مدل اصطکاک کولمب، تنش برشی بحرانی (τ_{crit}) را تعیین می‌کند که وابسته به فشار تماسی P و ضریب اصطکاک μ بین صفحات می‌باشد ($\tau_{crit} = \mu p$). محاسبات لغزش و چسبندگی مشخص می‌کند که چه هنگامی در یک نقطه، انتقال از چسبندگی به لغزش و از لغزش به چسبندگی رخ می‌دهد [۲۲].

برای حالتی که سطح بر پایه‌ی گره باشد، فشار تماس برابر با نیروی تماسی نرمال تقسیم بر سطح مقطع در محل گره‌ی تماسی است. در تحلیل دینامیکی صریح، مساحت سطح مقطع همیشه ۱ است و نمی‌توان آن را تغییر داد [۲۲].

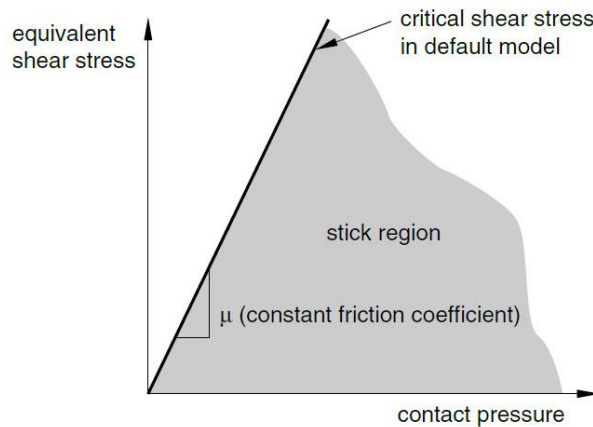
در مدل اصطکاک کولمب، ضریب اصطکاک در همه‌ی جهات یکسان است (اصطکاک همسانگرد). در شبیه‌سازی سه‌بعدی، دو جز متعامد در تنش‌های برشی τ_1, τ_2 در طول وجه مشترک بین دو جسم وجود دارد. این اجزا به‌عنوان جهات لغزش در سطوح یا المان‌های تماس عمل می‌کنند. نرم‌افزار ABAQUS برای محاسبات لغزش و چسبندگی، دو جز تنش برشی را به یک تنش برشی معادل با معادله‌ی $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ ترکیب می‌کند. همچنین، دو جز نرخ لغزش را با معادله‌ی $\dot{\gamma}_{eq} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$ به نرخ لغزش معادل تبدیل می‌کند. محاسبات لغزش و چسبندگی، صفحه‌ای را تعیین می‌کند که مرز بین چسبندگی و لغزش است. شکل ۴-۸ این مرز را در حالت دوبعدی نشان می‌دهد [۲۲].

^۱ Sticking

دو راه برای تعیین مدل اصطکاکی کولمب در نرم‌افزار ABAQUS وجود دارد. در مدل پیش‌فرض، ضریب اصطکاک به صورت تابعی از نرخ لغزش معادل و فشار تماسی تعیین می‌شود. همچنین، می‌توان ضرایب اصطکاکی جنبشی و استاتیکی به طور مستقیم مشخص شود. در مدل پیش‌فرض، ضریب اصطکاک را به طور مستقیم توسط معادله زیر مشخص می‌شود:

$$\mu = \mu(\gamma_{eq}, \dot{p}, \bar{\theta}, \bar{f}^\alpha) \quad (27-3)$$

که در آن نرخ لغزش معادل، P فشار تماسی، $\bar{\theta} = \frac{1}{2}(\theta_A + \theta_B)$ دمای میانگین در نقطه‌ی تماسی، $\bar{f}^\alpha = \frac{1}{2}(f_A^\alpha + f_B^\alpha)$ میانگین متغیرهای میدانی از پیش تعیین‌شده‌ی α در نقطه‌ی تماسی، θ_A و θ_B دما و متغیرهای میدانی از پیش تعیین‌شده در نقاط A و B بر روی سطوح هستند. نقطه‌ی A یک گره بر روی سطح slave و نقطه‌ی B بر روی سطح master است. به طور معمول به سطحی که مدول الاستیسیته‌ی بیشتری دارد سطح master گفته می‌شود. همچنین عموماً فشار تماسی از سطح master به سطح slave منتقل می‌شود [۲۲].



شکل ۳-۸: ناحیه‌های لغزش مدل پایه‌ی اصطکاک کولمب [۲۲].

فصل چهارم: مدل سازی رفتار

بیرون کشیدن الیاف تایپدهی

فولادی منفرد

۴-۱- مقدمه

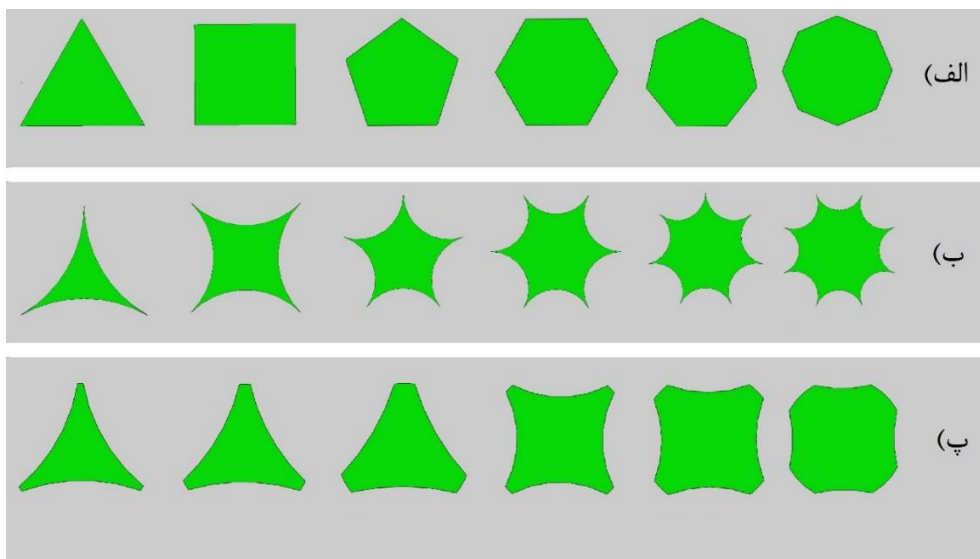
برای مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی منفرد از نرم‌افزار ABAQUS 6.11 بهره گرفته شده است. در این فصل نحوه‌ی مدل‌سازی آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی منفرد فولادی از ماتریس سیمانی شرح داده می‌شود.

۴-۲- خصوصیات هندسی

در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف منفرد تابیده از ماتریس بتنی در نرم‌افزار ABAQUS، از سه بخش^۱ برای هندسه‌ی مدل استفاده شده است. این سه بخش شامل الیاف فولادی، ماتریس سیمانی و ناحیه انتقال بین سطوح^۲ الیاف و ماتریس سیمانی است. فضای مدل‌سازی بخش‌ها به صورت سه‌بعدی می‌باشد. خصوصیات هندسی الیاف مدل‌سازی شده در این پژوهش، شامل قطر معادل، طول مدفون، طول آزاد، گام تابیدگی و شکل سطح مقطع می‌باشد. سطح مقطع این الیاف به شکل چندضلعی منتظم، چندضلعی گون و چندضلعی گون ناقص است. شکل ۴-۱ شکل سطح مقطع الیاف مورد استفاده را نشان داده است. خصوصیات مقاطع الیاف مدل‌سازی شده در این پژوهش در پیوست به‌طور مفصل شرح داده شده است.

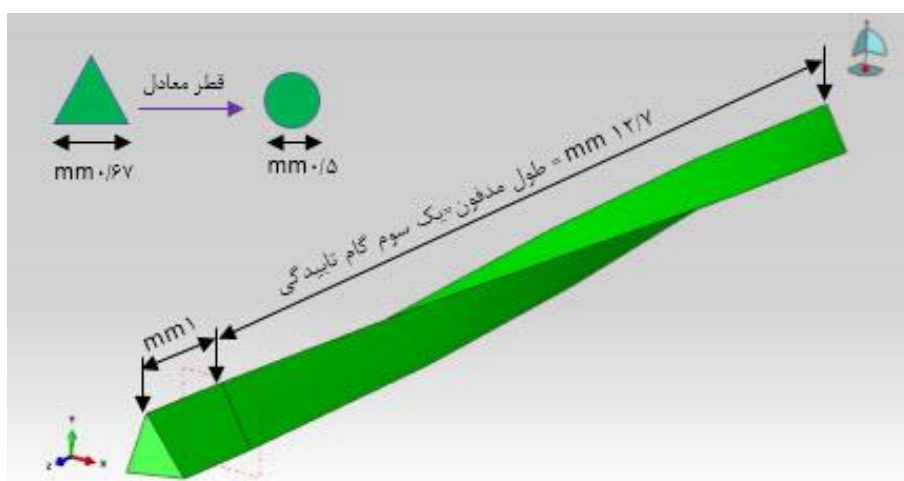
^۱ Part

^۲ Interfacial Transition Zone (ITZ)



شکل ۴-۱: شکل سطح مقطع الیاف. الف) سه ضلعی تا هشت ضلعی منتظم؛ ب) سه ضلعی تا هشت ضلعی گون و ج) سه ضلعی و چهار ضلعی گون ناقص ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصدی.

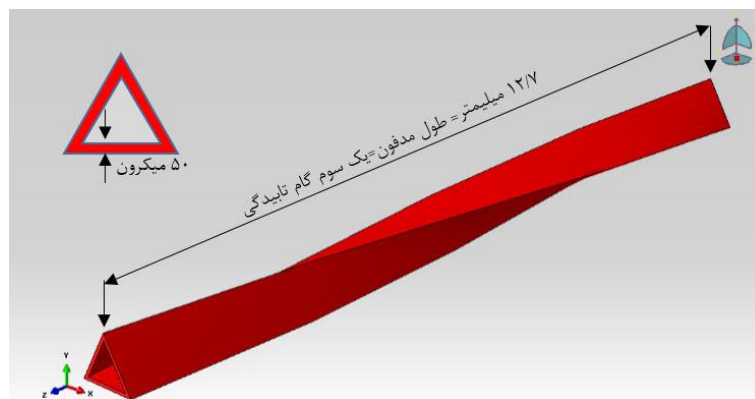
در ادامه به منظور بررسی نحوه‌ی مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن، الیاف با سطح مقطع سه ضلعی منتظم (مثلث متساوی الاضلاع)، قطر معادل $0/5$ میلی‌متر، طول مدفون $12/7$ میلی‌متر، طول آزاد 1 میلی‌متر و گام تابیدگی $38/1$ میلی‌متر شرح داده شده است. شکل ۴-۲ خصوصیات هندسی این الیاف را نشان داده است.



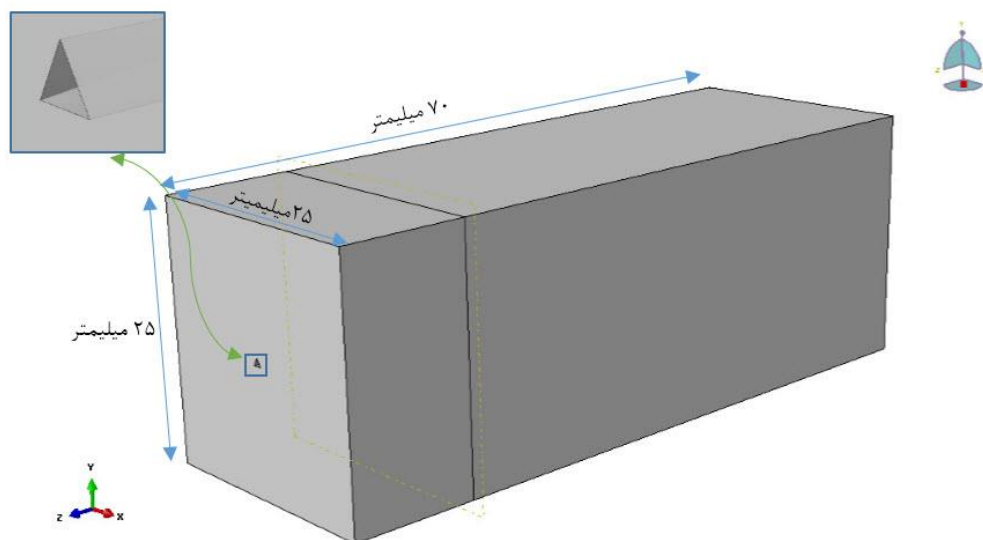
شکل ۴-۲: خصوصیات هندسی الیاف.

همان طور که در شکل ۳-۴ ملاحظه می‌شود، ضخامت ITZ ۵۰ میکرون و طول و گام تابیدگی آن به ترتیب ۱۲/۷ و ۳۸/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب ضخامت ۵۰ میکرون برای ITZ در ادامه‌ی همین فصل و در بخش ۳-۳-۴ بیان شده است.

ماتریس سیمانی دارای سطح مقطع ۲۵×۲۵ میلی‌متر و طول ۷۰ میلی‌متر است که در شکل ۴-۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۴: خصوصیات هندسی ITZ.



شکل ۴-۴: خصوصیات هندسی ماتریس سیمانی.

۳-۴- خصوصیات رفتار مکانیکی مصالح

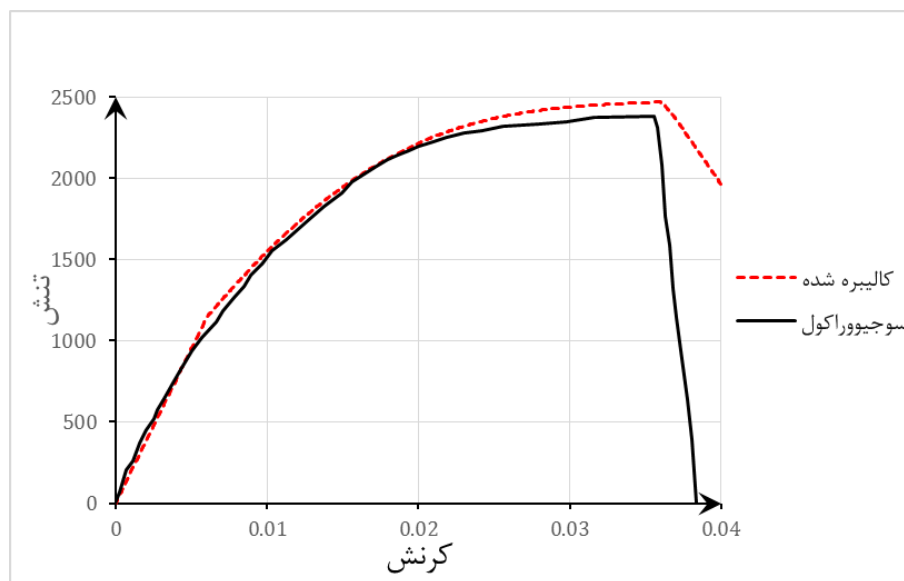
در این پژوهش از مدل سخت‌شدگی همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی الیاف فولادی و از مدل خرابی پلاستیک بتن برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی ماتریس سیمانی استفاده شده است.

۴-۳-۱- الیاف فولادی

برای الیاف فولادی از مدل سخت‌شدگی همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی به صورت ترکیبی استفاده شده است که پیش‌تر به‌طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل مصالح الیاف فولادی مستقل از فشار و سرعت فرض شده‌اند. برای الیاف فولادی شروع و پروسه‌ی خرابی در نظر گرفته نشده است. جدول ۴-۱ خصوصیات مکانیکی الیاف فولادی که شامل مدول الاستیسیته E ، چگالی ρ ، نسبت پواسون ν ، تنش تسلیم σ^0 ، مدول سخت‌شدگی کینماتیکی اولیه C و نرخ کاهش مدول سخت‌شدگی کینماتیکی با افزایش تغییرشکل پلاستیک γ می‌شود را نشان می‌دهد. مقادیر تنش تسلیم σ^0 ، مدول سخت‌شدگی کینماتیکی اولیه C و نرخ کاهش مدول سخت‌شدگی کینماتیکی با افزایش تغییرشکل پلاستیک γ ، با مدل‌سازی آزمایش کشش تک‌محوره الیاف در حالت بدون تابیدگی و کالیبره کردن نمودار تنش-کرنش حاصل از مدل‌سازی با نمودار تنش-کرنش ارائه شده توسط سوجیورا کول [۹]، ارزیابی شد. شکل ۴-۵ مقایسه‌ی نمودار تنش-کرنش حاصل از مدل‌سازی با نمودار تنش-کرنش ارائه شده توسط سوجیورا کول را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: خصوصیات مکانیکی الیاف فولادی

ρ (gr/cm^3)	E (GPa)	ν	σ^0 (MPa)	C (GPa)	γ
۷/۸۵	۱۹۰	۰/۳۳	۱۱۵۰	۲۶۰	۱۹۵



شکل ۴-۵: نمودار تنش-کرنش کالیبره الیاف فولادی.

۴-۳-۲- ماتریس سیمانی

برای مدل سازی ماتریس سیمانی در نرم افزار ABAQUS از مدل خرابی پلاستیک بتن استفاده شده است.

۴-۳-۲-۱- رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری تک محوره‌ی ماتریس سیمانی

ماتریس سیمانی مورد استفاده در این پژوهش دارای مقاومت ۴۴ مگا پاسکال است که رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری تا محدوده‌ی نصف مقاومت، به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است.

برای وارد کردن نمودار تنش- کرنش فشاری تک‌محوره‌ی بتن در نرم‌افزار از رابطه‌ی پیشنهادشده‌ی تورنفیلد^۱، توماسویچ^۲ و یانسن^۳ [۲۳] که برای بتن‌های با مقاومت ۱۵ تا ۱۲۵ مگا پاسکال معتبر می‌باشد، استفاده‌شده و رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n(\epsilon_c/\epsilon_0)}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon_0)^{nk}} \quad (۱-۴)$$

که

f'_c : تنش حداکثر به دست آمده از آزمایش استوانه‌ای؛

n : ضریب کالیبراسیون نمودار که مساوی $E_c(E_c - E'_c)$ است؛

E_c : مدول الاستیسیته‌ی اولیه؛

$$E'_c = f'_c/\epsilon_0$$

ϵ_0 : کرنش متناظر با تنش f'_c که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \left(\frac{n}{n-1} \right) \quad (۲-۴)$$

k : پارامتری است که شیب شاخه‌های صعودی و نزولی نمودار تنش-کرنش را کنترل می‌کند و مقدار

آن برای ϵ_c/ϵ_0 کوچک‌تر از یک، برابر یک و برای ϵ_c/ϵ_0 بزرگ‌تر از یک از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$k = 0.67 + \left(\frac{f'_c}{9000} \right) \geq 1.0 \quad (\text{psi}) \quad (۳-۴)$$

^۱ Thorenfeldt

^۲ Tomaszewicz

^۳ Jensen

مقدار مدول الاستیسیته‌ی ماتریس سیمانی از رابطه‌ی پیشنهادشده‌ی آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا [۲۴]

استفاده‌شده است که به صورت زیر می‌باشد:

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c} \quad (\text{psi}) \quad (۴-۴)$$

۴-۳-۲-۲- رابطه‌ی تنش- کرنش کششی تک‌محوره‌ی ماتریس سیمانی

رابطه‌ی تنش-کرنش کششی تک‌محوره‌ی ماتریس سیمانی به این صورت است که تا تنش گسیختگی به صورت الاستیک خطی می‌باشد ($\sigma_t = E\epsilon_t$) و پس از آن به صورت خطی تا کرنش نهایی خود که ده برابر کرنش متناظر با تنش حداکثر می‌باشد، نزول می‌کند تا به مقدار یک‌صدم تنش گسیختگی می‌رسد. مقدار تنش گسیختگی توسط رابطه‌ی پیشنهادشده در آیین‌نامه‌ی CEB-FIP 1990 به صورت زیر می‌باشد، تعیین می‌شود [۲۵]:

$$f_t = 1.4 \left(\frac{f'_c}{10} \right)^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad (۵-۴)$$

۴-۳-۲-۳- متغیرهای خرابی فشاری و کششی

مقادیر خرابی در حالت بارگذاری فشاری و کششی برای شاخه‌ی صعودی نمودار تنش-کرنش، صفر و برای شاخه‌ی نزولی از رابطه‌های زیر استفاده‌شده است:

$$d_c = 1 - \left(\frac{\sigma_c}{f'_c} \right) \quad (۶-۴)$$

$$d_t = 1 - \left(\frac{\sigma_t}{f_t} \right) \quad (۷-۴)$$

جدول ۴-۲ خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی که شامل مدول الاستیسیته E ، چگالی ρ ، نسبت پواسون ν ، زاویه‌ی اتساع λ ، خروج از مرکزیت ϵ ، نسبت تنش تسلیم فشاری دومحوره‌ی اولیه به تنش تسلیم فشاری تک‌محوره اولیه σ_{b0}/σ_{c0} ، نسبت دومین نامتغیر تنش روی نصف‌النهار کششی به

دومین نامتغیر تنش روی نصف انهاری فشاری K و پارامتر ویسکوزیته می باشد را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در این پژوهش زاویه ی اتساع به عنوان پارامتر کالیبراسیون در نظر گرفته شده و با تغییر دادن مقدار زاویه ی اتساع و همچنین پروسه ی کالیبراسیون مدل، که در فصل ۵ شرح داده شده است، مقدار ۴۵ درجه برای ماتریس سیمانی اتخاذ شده است.

جدول ۴-۲: خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی

ρ (gr/cm ³)	E (GPa)	ν	f'_c (MPa)	ψ (degree)	$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	K	پارامتر ویسکوزیته
۲/۴	۳۱/۴	۰/۲	۴۴	۴۵	۱/۱۶	۰/۶۶۶	۰

۴-۳-۳- ناحیه انتقال بین دو سطح الیاف و ماتریس سیمانی (ITZ)

هنگامی که بتن تازه درون قالب ریخته می شود، نسبت آب به سیمان اطراف سنگدانه ها افزایش می یابد. علت افزایش نسبت آب به سیمان، لرزاندن قالب به منظور خروج ذرات هوا از داخل بتن است. استفاده از افزودنی های بسیار ریزدانه و توزیع مناسب در بتن منجر به پایین آمدن نسبت آب به سیمان اطراف سنگدانه های شده و ITZ متراکم تر می شود. ضخامت ITZ به طور تقریبی، نصف مقدار میانگین فاصله ی بین دانه های ماسه موجود در بتن می باشد [۲۶]. باینکه ضخامت ITZ بسیار کوچک می باشد، فاصله ی ۷۵ تا ۱۰۰ میکرونی بین سنگدانه ها در بتن، این اجازه را می دهد که ۲۰ تا ۴۰ درصد فضای اشغال نشده توسط سنگدانه ها را در برگیرد [۱]. ضخامت ITZ اطراف سنگدانه ها و الیاف بین ۱۰ تا ۵۰ میکرون می باشد [۲۷]. از این رو در این پژوهش به منظور کاهش هزینه های محاسباتی که در ادامه ی این فصل توضیح داده خواهد شد، ضخامت ITZ، ۵۰ میکرون در نظر گرفته شده است.

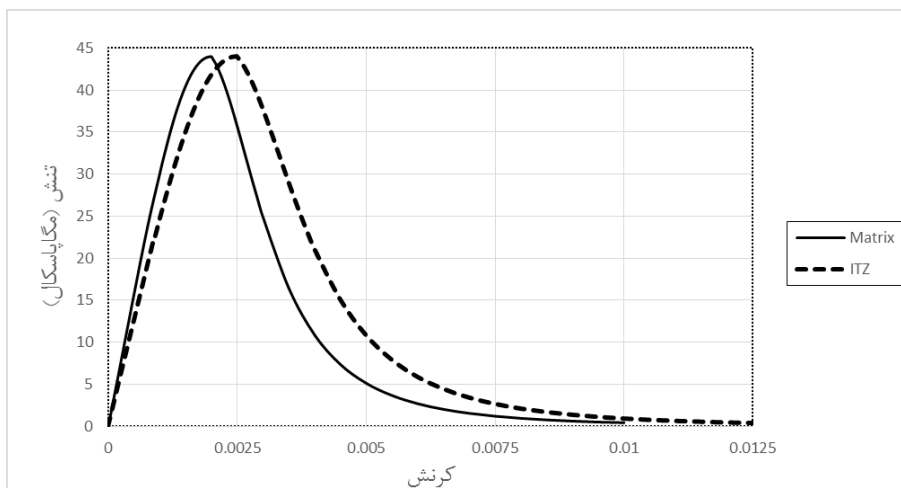
با توجه به نتایج به دست آمده توسط کوهن^۱، لی^۲ و گولدمن^۳، مدول الاستیسیته ی مصالح ITZ نسبتی از مدول الاستیسیته ی ماتریس بتنی می باشد که این نسبت تابعی لگاریتمی از ضخامت ITZ است. این نسبت زمانی که ضخامت ITZ ۵۰ میکرون است، برای ملات سیمان پرتلند ۰/۷۵ و برای ماتریس سیمانی ای که ۱۰٪ سیمان پرتلند آن با سیلیکافوم جایگزین شده است، ۰/۸۸ می باشد. در این پژوهش نسبت مدول الاستیسیته ی ITZ به ماتریس بتنی، ۰/۸ در نظر گرفته شده است [۲۸].

تمامی خصوصیات مصالح ITZ با خصوصیات در نظر گرفته شده برای مصالح ماتریس بتنی یکسان می باشد، به غیر از مدول الاستیسیته و پارامتر کالیبراسیون یا زاویه ی اتساع. زاویه ی اتساع مصالح ITZ نبایستی بزرگ تر از مصالح ماتریس بتنی باشد [۲۰]؛ از این رو با توجه به پروسه ی کالیبره کردن مدل سازی با آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده، مقدار ۴۴ درجه اتخاذ شده است. شکل ۴-۶ نمودار تنش-کرنش فشاری تک محوره ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ، شکل ۴-۷ نمودار تنش-کرنش کششی تک محوره ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ و را نشان می دهد. جدول ۳-۵ خصوصیات مکانیکی ITZ را نشان می دهد.

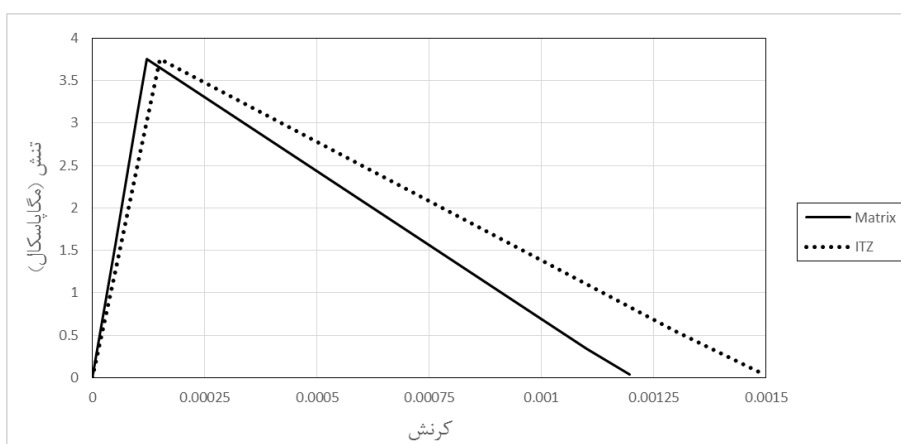
^۱ Cohen

^۲ Lee

^۳ Goldman



شکل ۴-۶: نمودار تنش-کرنش فشاری تک‌محوره‌ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ.



شکل ۴-۷: نمودار تنش-کرنش کششی تک‌محوره‌ی مصالح ماتریس سیمانی و ITZ.

جدول ۴-۳: خصوصیات مکانیکی ITZ

ρ (gr/cm^3)	E (GPa)	ν	f'_c (MPa)	ψ (degree)	$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	K	پارامتر ویسکوزیته
۲/۴	۲۵/۱	۰/۲	۴۴	۴۴	۱/۱۶	۰/۱۶۶۶	۰

۴-۴ - خصوصیات سطح تماس بین الیاف و ITZ

در این پژوهش از قانون اصطکاک کولمب همسانگرد و مدل پایه‌ی اصطکاک کولمب موجود در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی اصطکاک بین الیاف و ITZ استفاده شده است. برای تخمین ضریب اصطکاک کولمب از آزمایش‌های بالتای^۱ و جلسویک^۲ بهره برده شده است.

بالتای و جلسویک پی بردند که ضریب اصطکاک بین فولاد و بتن به سطح فولاد وابسته است. میانگین ضریب اصطکاک برای سطوح فولادی صیقل داده شده در محدوده‌ی فشار نرمال ۱۳/۸ کیلو پاسکال تا ۵۵ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد. اگرچه بالتای و جلسویک مقدار میانگین ۰/۴۷ را معرفی کردند، داده‌های مربوط به سطوح فولادی صیقل داده شده یک رابطه‌ی سهمی شکل با حداکثر مقدار ۰/۵۸ برای تنش نرمال ۳/۴ مگا پاسکال و حداقل مقدار ۰/۳۵ برای تنش‌های نرمال کمتر از ۳/۴ مگا پاسکال و بیشتر از ۵۵ مگا پاسکال را نشان می‌دهد. بالتای و جلسویک برای سطوح فولادی با مقیاس میلی‌متری^۳ گزارش دادند که رابطه‌ی ضریب اصطکاک نسبت به تنش فشاری تماسی به صورت خطی بوده؛ به طوری که ضریب اصطکاک در تنش فشاری تماسی ۱۰ کیلو پاسکال، ۰/۲ و سپس به مقدار ۰/۵۳ در تنش فشاری تماسی ۳۴/۵ مگا پاسکال می‌رسد [۲۹]. در این پژوهش ضریب اصطکاک بین الیاف و ITZ مستقل از فشار و مقدار ثابت ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین از چسبندگی بین سطوح الیاف و ITZ صرف نظر شده است.

^۱ Baltay

^۲ Gjelsvik

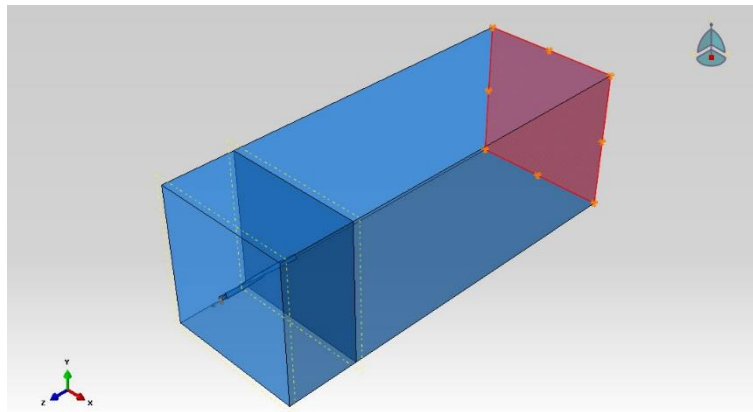
^۳ Mill Scale

از آنجا که مصالح ITZ با سنگ‌دانه‌ها به صورت پیوسته بوده و در واقع جزئی از ماتریس سیمانی می‌باشد، سطح تماس بین ماتریس بتنی و ITZ به صورت یکپارچه^۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- خصوصیات شرایط مرزی

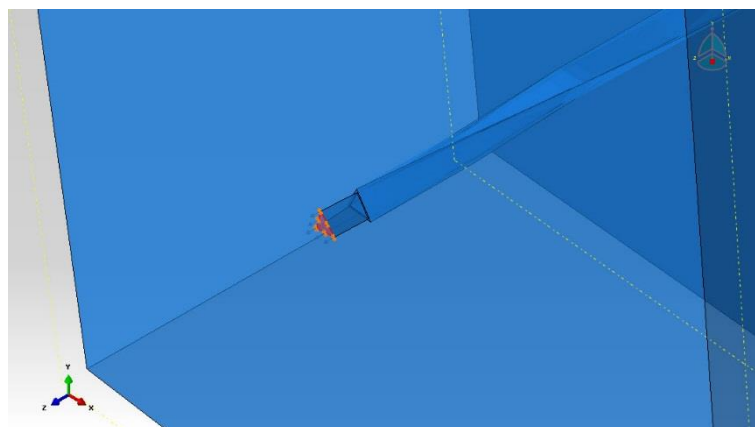
در آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی، انتهای نمونه برای جلوگیری از تغییر مکان ماتریس سیمانی توسط گیره‌ای مهار می‌شود. از این رو به منظور ثابت نگه‌داشتن ماتریس، از تغییر مکان انتهای ماتریس در سه راستای x ، y و z جلوگیری شده است که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود.

در آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده، گیره‌ی متحرکی که الیاف را در راستای محور z از ماتریس سیمانی بیرون می‌کشد، بایستی نسبت به دوران حول محور z مهار شود. برای این منظور بایستی از جابجایی گره‌های واقع در نوک الیاف در دو راستای x و y جلوگیری شود. شکل ۴-۹ شرایط مرزی نوک الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: شرایط مرزی انتهای ماتریس.

^۱ Tie



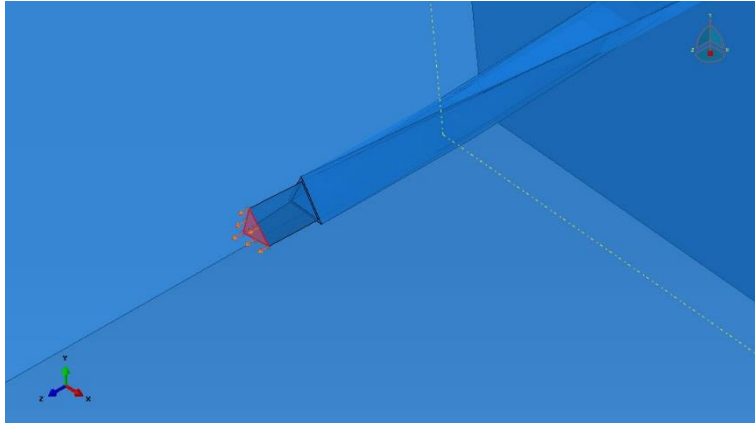
شکل ۴-۹: شرایط مرزی نوک الیاف.

۴-۶- خصوصیات بارگذاری

برای در اختیار داشتن شاخه‌های نزولی نمودار نیرو-لغزش آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی و همچنین مشابه‌سازی با روند آزمایش، بارگذاری از نوع کنترل تغییر مکان می‌باشد. این بارگذاری توسط نمودار سرعت-زمان به نوک الیاف اعمال شده است. بدین منظور از تابع گام آرام^۱ موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. ابتدا در لحظه‌ی صفر سرعت بیرون کشیدن الیاف صفر می‌باشد و سپس سرعت به آرامی با یک تابع درجه ۶ افزایش پیدا می‌کند و در لحظه‌ی ۰/۰۰۰۵ ثانیه به سرعت ۳۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد و تا انتهای بیرون کشیده شدن ثابت باقی می‌ماند. از ویژگی‌های این تابع این است که شیب نمودار در لحظه‌های صفر و ۰/۰۰۰۵ ثانیه صفر است و همچنین شیب نمودار قبل از لحظه‌ی صفر ثانیه و بعد از لحظه‌ی ۰/۰۱ ثانیه نیز صفر می‌باشد.

کل زمان بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس بتنی ۰/۰۰۵ ثانیه است. به دلیل سرعت بالای بیرون کشیدن الیاف این مسئله به صورت دینامیکی بوده و از حل گر دینامیکی صریح نرم‌افزار استفاده شده است. شکل ۴-۱۰ شرایط بارگذاری در نوک الیاف را نشان می‌دهد.

^۱ Smooth Step



شکل ۴-۱۰: شرایط بارگذاری در نوک الیاف.

۴-۷- خصوصیات مش بندی

مدل خرابی پلاستیک بتن از دسته‌ی مدل‌های خرابی محلی^۱ می‌باشد. در این مدل، خرابی‌هایی که مشاهده می‌شود در واقع قسمت‌هایی از ماتریس سیمانی است که ترک می‌خورد. هنگامی که ماتریس سیمانی شروع به ترک خوردن می‌کند، مقدار عرض ترک ناچیز بوده و با افزایش بارگذاری و رشد ترک، عرض ترک بیشتر می‌شود. هنگامی که عرض ترک به یک مقدار مشخصی می‌رسد، انتقال تنش بین دو وجه ترک صورت نمی‌پذیرد. این مقدار مشخص تقریباً برابر بعد سنگ‌دانه‌های ماتریس سیمانی می‌باشد. در مدل خرابی پلاستیک بتن هنگامی که قسمتی از سازه ترک می‌خورد، عرض ترک به ابعاد المان بستگی دارد. از این رو مش بندی بایستی به‌طور دقیق و با حساسیت خاصی انجام شود. بعد مؤثر مصالح ماتریس سیمانی مدل شده $0/3$ میلی‌متر می‌باشد.

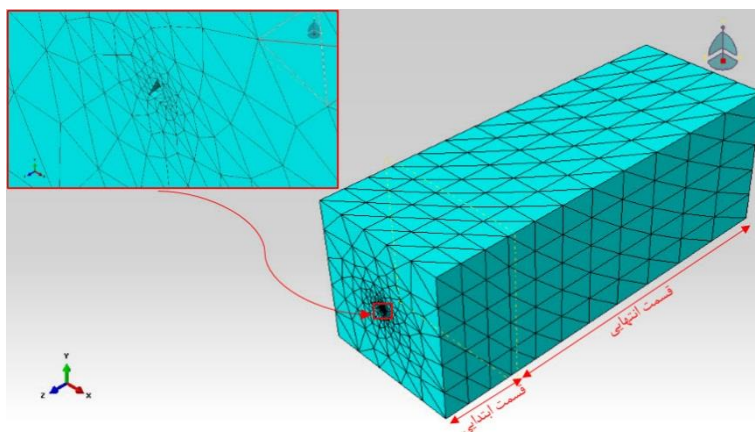
به دلیل ابعاد میلی‌متری الیاف، بهتر است که در نزدیکی الیاف از المان‌های کوچک و در سطوح خارجی ماتریس به علت عدم تغییرات تنش و ناچیز بودن مقدار تنش در این سطوح، از المان‌های بزرگ استفاده شود. دلیل به‌کارگیری از مش بندی غیریکنواخت، کاهش تعداد المان در مدل و در نتیجه کاهش

^۱ Local damage

زمان محاسبات می‌باشد. برای مش بندی ابتدا بایستی طول المان‌های واقع در مرزهای هر قسمت از مدل مشخص و سپس نوع المان و در انتها تکنیک مش زدن انتخاب می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود؛ ماتریس بتنی به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت ابتدایی دارای فضای توخالی است که ITZ و الیاف فولادی را در برمی‌گیرد و قسمت انتهایی به شکل مکعب مستطیل و بدون فضای خالی می‌باشد. به دلیل پایین بودن مقدار تنش‌ها و همچنین تغییر نامحسوس مقادیر تنش در فواصل دور از الیاف تابیده، اندازه‌ی المان‌ها بر روی مرزهای سطوح خارجی قسمت ابتدایی ۵ میلی‌متر و در قسمت انتهایی آن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر است. همچنین اندازه‌ی المان‌ها بر روی مرزهای مقطع نیز ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که اشاره شد، بعد مؤثر مصالح ماتریس سیمانی ۰/۳ میلی‌متر می‌باشد، بنابراین اندازه‌ی المان‌ها بر روی مرزهای مقطع و سطوح جانبی فضای توخالی در قسمت ابتدایی ماتریس که دربرگیرنده‌ی الیاف و ITZ است، ۰/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تکنیک مش زدن به صورت آزاد می‌باشد و شکل المان‌ها، چهاروجهی^۱ در نظر گرفته شده است. درجه هندسی المان‌های ماتریس به صورت خطی است. در نرم‌افزار ABAQUS هر المان با توجه به شکل، نوع و تنظیمات کنترل آن دارای نام واحدی است. نام المان‌های استفاده شده برای ماتریس سیمانی C3D4 می‌باشد.

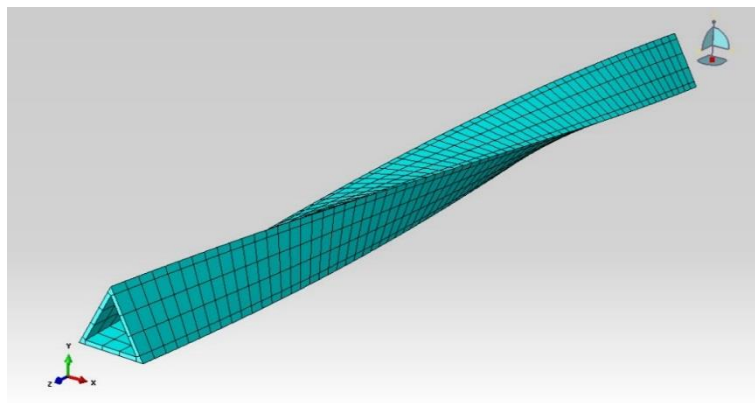
^۱ tetrahedral



شکل ۴-۱۱: مش بندی ماتریس سیمانی.

شکل ۴-۱۲ مش بندی ITZ را نشان می‌دهد. به دلیل یکپارچه بودن سطح تماس بین ماتریس سیمانی و ITZ، کاهش زمان محاسبات و همچنین ایجاد شرایط تماسی بهتر، اندازه‌ی المان‌ها بر روی مرزهای مقطع و سطوح جانبی، همانند الیاف، $0/3$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ولی به دلیل ضخامت $0/05$ میلی‌متری ITZ، ضخامت المان‌ها نیز $0/05$ میلی‌متر می‌باشد. تکنیک مش زدن به صورت جارو کردن^۱ می‌باشد. مش زدن به روش جارو کردن به این صورت است که ابتدا نرم‌افزار، یک سطح دوبعدی که در اینجا سطح مقطع ITZ است را مش می‌زند و سپس این مش بندی را در بعد سوم که به صورت یک مسیر است توسعه می‌دهد. شکل المان‌ها شش‌وجهی در نظر گرفته شده است و درجه‌ی هندسی آن خطی است. انتگرال‌گیری بر روی المان‌های الیاف به صورت کاهش یافته اتخاذ شده است. نام المان‌های استفاده شده برای ITZ، C3D8R می‌باشد.

^۱ Sweep



شکل ۴-۱۲: مش بندی ITZ.

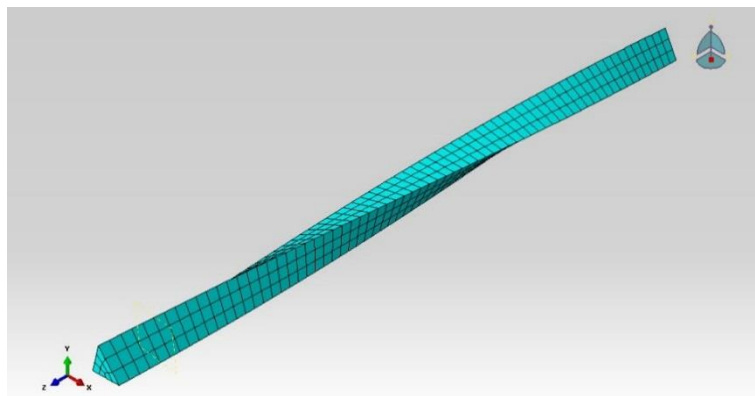
شکل ۴-۱۳ مش بندی الیاف را نشان می‌دهد. به دلیل کاهش زمان محاسبات و همچنین ایجاد شرایط تماسی بهتر اندازه‌ی المان‌ها بر روی مرزهای مقطع و سطوح جانبی الیاف 0.3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تکنیک مش زدن به صورت ^۱ منظم^۱ می‌باشد و شکل المان‌ها شش‌وجهی^۲ در نظر گرفته شده و درجه‌ی هندسی^۳ آن خطی است. همچنین برای کاهش زمان محاسبات، انتگرال‌گیری بر روی المان‌های الیاف به صورت کاهش‌یافته^۴ اتخاذ شده است. نام المان‌های استفاده شده برای الیاف C3D8R می‌باشد.

^۱ Structured

^۲ Hexahedral

^۳ Geometric Order

^۴ Reduced



شکل ۴-۱۳: مش بندی الیاف.

۴-۸- خصوصیات تحلیل

در این پژوهش برای تحلیل مدل بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی، از حل‌گر دینامیکی صریح موجود در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این حل‌گر تعداد زیادی از گام‌های زمانی کوچک را به خوبی اجرا و از قانون انتگرال‌گیری زمانی دیفرانسیل مرکزی صریح استفاده می‌کند. محاسبات هر گام زمانی نسبتاً سبک است زیرا دسته‌ای از معادلات را به طور هم‌زمان تشکیل نمی‌دهد. عملگر دیفرانسیل مرکزی صریح، معادلات تعادل دینامیکی را در شروع گام زمانی t ارضاء می‌کند. شتاب محاسبه شده در زمان t برای پیش بردن سرعت در زمان $t + \frac{\Delta t}{4}$ و حل جابجایی در زمان $t + \Delta t$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند تحلیل دینامیکی صریح بر پایه‌ی اجرای قانون انتگرال‌گیری صریح به همراه استفاده از ماتریس‌های جرم قطری المان پایه‌گذاری شده است. معادلات حرکت با استفاده از قانون انتگرال‌گیری دیفرانسیل مرکزی صریح انتگرال‌گیری می‌شود:

$$\dot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \dot{u}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N \quad (۸-۴)$$

$$u_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (۹-۴)$$

که در آن u^N درجه‌ی آزادی و زیرنویس i شماره گام زمانی در هر مرحله‌ی دینامیکی صریح را نشان می‌دهد. عملگر انتگرال دیفرانسیل مرکزی، صریح است و با استفاده از مقادیر $\ddot{u}_{(i)}^N$ و $\dot{u}_{(i-\frac{1}{2})}^N$ از گام‌های قبل روند تحلیل پیش می‌رود. قانون انتگرال‌گیری صریح نسبتاً ساده است. کلید دستیابی به کارا بودن محاسبات مربوط به روند صریح، استفاده از ماتریس‌های جرم قطری است زیرا که شتاب در شروع هر گام زمانی با استفاده از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{u}_{(i)}^N = (M^{NJ})^{-1}(P_{(i)}^J - I_{(i)}^J) \quad (10-4)$$

که در آن M^{NJ} جرم ماتریس، P^J بردار بار اعمال‌شده و I^J بردار نیروی داخلی است. روند صریح نیاز به تکرار و ماتریس سختی مماسی ندارد. بردار نیروی داخلی I^J ، توسط بخشی از المان‌های منفرد گردآوری‌شده است؛ به‌گونه‌ای که ماتریس سختی کلی نیاز به شکل‌گیری ندارد. روند صریح، با استفاده از تعداد زیادی گام زمانی کوچک، بر روی زمان انتگرال‌گیری می‌شود. عملگر تفاضل مرکزی تحت شرایطی پایدار است و شرط پایداری عملگر (بدون میرایی) به صورت عباراتی برحسب بالاترین فرکانس سیستم داده‌شده است:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (11-4)$$

و با میرایی، گام زمانی پایدار به صورت زیر است:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi_{\max}^2} - \xi_{\max}) \quad (12-4)$$

که در آن ξ_{\max} بخشی از میرایی بحرانی در حالت بالاترین فرکانس است. تعریف میرایی، مقدار گام زمانی پایدار را کاهش می‌دهد. در تحلیل دینامیکی صریح مقادیر کوچک میرایی به شکل ویسکوزیته‌ی بالک تعریف شده است تا نوسانات بالای فرکانس را کنترل کند. تخمین محدودیت پایداری اغلب به صورت کوچک‌ترین زمان انتقال موج اتساعی در هر المان در مش بندی توصیه می‌شود:

$$\Delta t \approx \frac{L_{min}}{C_d} \quad (13-4)$$

که در آن L_{min} کوچک‌ترین بعد المان در مش بندی و C_d سرعت موج اتساعی برحسب λ_0 و μ_0 است. این تخمین برای Δt تقریبی است و برای بیشتر حالات محافظه‌کارانه نیست. در حالت کلی، گام زمانی پایدار واقعی انتخاب شونده توسط نرم‌افزار ABAQUS کمتر از این مقدار خواهد بود که با ضریبی بین $\frac{1}{2}$ و 1 در مدل دوبعدی و $\frac{1}{\sqrt{3}}$ و 1 برای مدل سه‌بعدی است. سرعت موج اتساعی، C_d ، در نرم‌افزار ABAQUS، برای مصالح الاستیک همسانگرد توسط ثابت‌های مؤثر لامه $\hat{\lambda}$ و $\hat{\mu}$ به شیوه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$\hat{\lambda} = \lambda_0 = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (14-4)$$

$$\hat{\mu} = \mu_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15-4)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}} \quad (16-4)$$

که در آن ρ چگالی مصالح، E مدول یانگ و ν نسبت پواسن است. گام زمانی مورد استفاده در آنالیز باید کوچک‌تر از محدودیت پایداری در عملگر تفاضل مرکزی باشد [۲۲].

$$\Delta t \leq \min(L_e \sqrt{\frac{\rho}{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}}) \quad (17-4)$$

اگر مدل شامل تنها یک نوع مصالح باشد، گام زمانی اولیه به‌طور مستقیم متناسب با اندازه کوچک‌ترین المان در مش بندی است. اگر اندازه المان‌های یکنواخت باشد ولی شامل خصوصیات مصالح مختلف باشد، المانی با بیشترین سرعت موج تعیین‌کننده‌ی گام زمانی اولیه خواهد بود. در مسائل غیرخطی که تغییرشکل بزرگ دارند و یا پاسخ مصالح غیرخطی است، بالاترین فرکانس مدل به‌طور پیوسته تغییر می‌کند که در نتیجه محدودیت پایداری تغییر می‌کند [۲۲].

هنگامی که مش بندی مدل کوچک باشد، در روند حل مسأله مشکلاتی به وجود می آید. در این پژوهش به دلیل ابعاد بسیار کوچک الیاف و ITZ، تابیده بودن الیاف و فراهم نمودن شرایط تماسی بهتر بین سطوح الیاف و ITZ از المان های بسیار کوچک به ابعاد ۵۰ میکرون استفاده شده است. کوچک بودن المان منجر به افزایش زمان محاسبات و بروز خطای سرعت تغییر شکل می شود و آنالیز به صورت ناقص خاتمه می یابد. خطای سرعت تغییر شکل هنگامی رخ می دهد که ماکزیمم نسبت سرعت تغییر شکل به سرعت موج اتساعی موجود برای هر المانی بزرگ تر از نسبت قطع جریان شود. نسبت قطع جریان برابر یک می باشد.

تحلیل مدل های ساخته شده، توسط رایانه ای ۸ هسته ای با قدرت پردازش ۴ گیگاهرتز و ۱۶ گیگابایت RAM، انجام شد. زمان تقریبی تحلیل مدل ها بسته به مش بندی، گام تابیدگی و سرعت بیرون کشیدن، ۱۰۰ تا ۶۰۰ ساعت بود.

از مزایای حلگر دینامیکی صریح می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- شیوهی دینامیکی صریح به صورت ایده آلی برای تحلیل اتفاقات دینامیکی با سرعت بالا مناسب است، با این حال در بسیاری از مسائل شبه استاتیکی مفید واقع می شود.

- نتایج در تحلیل دینامیکی صریح به صورت اتوماتیک برای داشتن دقت به مانند روش ضمنی چک نمی شود. در بیشتر حالات جای نگرانی نیست زیرا که شرایط پایداری، یک گام زمانی کوچک را ایجاد می کند؛ به گونه ای که حل در هر گام زمانی به آرامی تغییر می کند که باعث ساده سازی محاسبات گام زمانی می شود. ممکن است آنالیز شامل تعداد بسیار زیادی گام زمانی باشد ولی زمان محاسبات هر گام زمانی نسبتاً کم می باشد.

- می توان برای اجرای آنالیزهای شبه الاستیک با شرایط تماسی پیچیده استفاده کرد.

فصل پنجم: نتایج و بحث

۵-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا کالیبره کردن مدل حاصل از نرم‌افزار ABAQUS ارائه می‌شود و سپس با تغییر هندسه و مقاومت کششی الیاف و همچنین مقاومت فشاری ماتریس سیمانی، صحت سنجی مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها بر روی تأثیر شکل سطح مقطع و دیگر خصوصیات هندسی الیاف تأیید بر روی رفتار بیرون کشیدن بحث می‌شود.

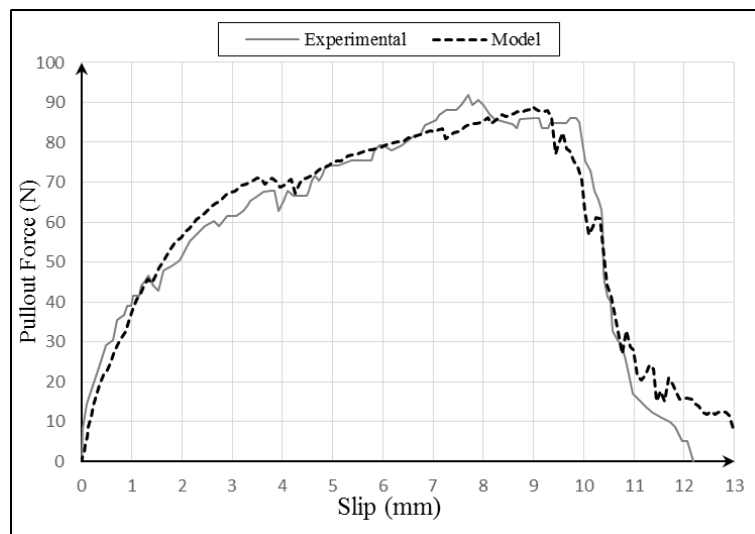
۵-۲- کالیبراسیون و صحت سنجی مدل

مدل ارائه شده برای کالیبره شدن با نتایج آزمایشگاهی نیازمند داده‌هایی می‌باشد. این داده‌ها عبارت‌اند از ضریب اصطکاک بین سطوح الیاف و ITZ، پارامتر خرابی، نمودار تنش-کرنش مصالح ماتریس سیمانی، ITZ و الیاف و زاویه‌ی اتساع که در این پژوهش به‌عنوان پارامتر کالیبراسیون انتخاب شده است.

در فرآیند کالیبراسیون ابتدا هندسه‌ی مدل مطابق با نمونه‌ی آزمایشگاهی در محیط گرافیکی نرم‌افزار ABAQUS ساخته شد. پس از آن برای مشخص نمودن رفتار مکانیکی مصالح سیمانی که شامل نمودار تنش-کرنش کششی و فشاری ماتریس سیمانی و ITZ می‌باشد، از روابط ارائه شده توسط تورنفلد، توماسویچ و یانسن؛ و آیین‌نامه‌ی CEB-FIP 1990 بهره برده شد. همچنین برای کالیبراسیون نمودار تنش-کرنش کششی الیاف فولادی، مدلی در نرم‌افزار ABAQUS ساخته شد که پیش‌تر توضیح داده شد. در ادامه از قانون اصطکاک کولمب همسانگرد برای مدل‌سازی اصطکاک بین الیاف و ITZ استفاده شد. مقدار ضریب اصطکاک، مطابق با نتایج به دست آمده از بالتای و جلسویک، $0/5$ اتخاذ شد. مقادیر خرابی فشاری و کششی را بایستی از بارگذاری و باربرداری پی‌درپی در آزمایش‌های مقاومت فشاری و کشش مستقیم بتن به دست آورد. در این آزمایش ابتدا در یک کرنش مشخص باربرداری شده و با توجه

به شیب شاخه‌ی باربرداری، مقدار خرابی به دست می‌آید. سپس نمونه تحت بار قرار گرفته و در کرنش دیگر دوباره بار برداشته می‌شود و مقدار خرابی در کرنش جدید به دست می‌آید. این فرآیند به صورت پی‌درپی در کرنش‌های متعدد انجام می‌شود. در این پژوهش برای مقادیر خرابی فشاری و کششی در ماتریس سیمانی و ITZ از روابط ۴-۴۲ و ۴-۴۳ استفاده شد. در انتها با تغییر مقدار زاویه‌ی اتساع، مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار ABAQUS با نمونه‌ی آزمایشگاهی کالیبره شد.

مهم‌ترین خروجی آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی، نمودار نیرو-لغزش می‌باشد. از این رو، به منظور کالیبره کردن مدل ارائه‌شده توسط نرم‌افزار ABAQUS، نمودار نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی با سطح مقطع سه ضلعی منتظم با نمونه‌ی مشابه آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط سوچیورا کول [۹]، مقایسه شد. الیاف تابیده‌ی فولادی مدل شده و آزمایشگاهی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر و مقاومت کششی ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. مقاومت ماتریس سیمانی در برگیرنده‌ی الیاف فولادی، ۴۴ مگا پاسکال است. مقدار نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی آزمایشگاهی و مدل کالیبره شده به ترتیب ۹۱/۸ و ۸۹ نیوتن است که مقدار خطای آن برابر ۳٪ می‌باشد. سطح زیر نمودار نیرو-لغزش بیان‌گر مقدار انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف است. مقدار این انرژی در نمودار آزمایشگاهی و مدل کالیبره شده به ترتیب ۷۳۹ و ۷۶۰ نیوتن میلی‌متر است که مقدار خطای آن برابر ۳٪ می‌باشد. شکل ۵-۱ نمودار نیرو-لغزش آزمایشگاهی و مدل کالیبره شده با نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد.

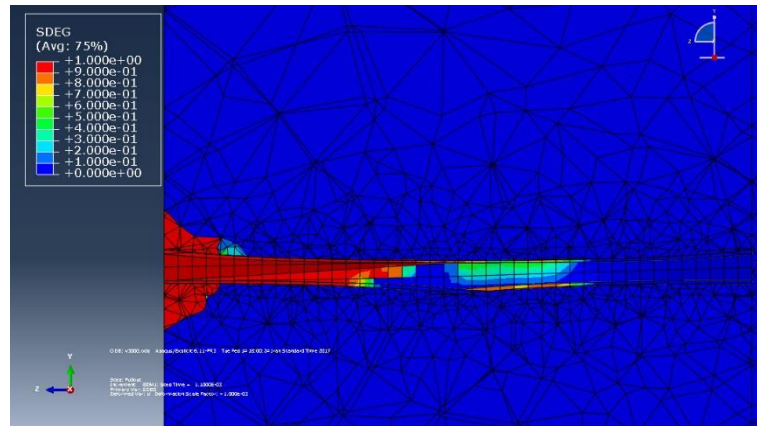


شکل ۵-۱: مقایسه‌ی نمودار کالیبره شده با نمودار آزمایشگاهی.

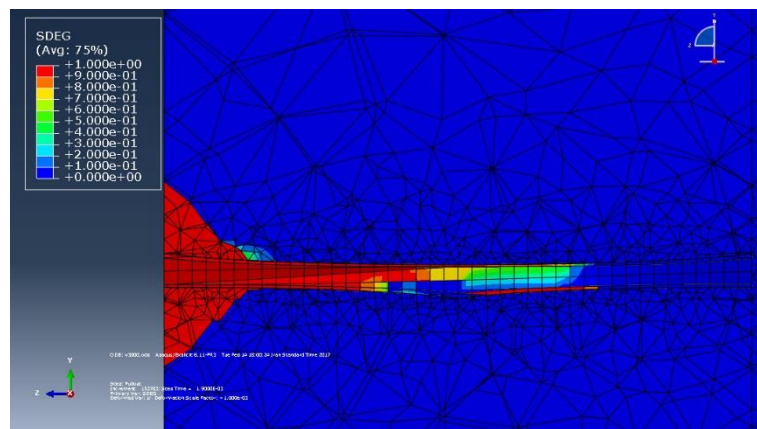
در نمونه‌های آزمایشگاهی، در حین بیرون کشیده شدن الیاف، ماتریس سیمانی اطراف الیاف به دلیل اصطکاک بینشان خرد شده و بستر الیاف گسترش می‌یابد. همچنین در انتهای بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی، پدیده‌ی کنده شدن قسمتی از ماتریس سیمانی رخ می‌دهد. طول مدفون الیاف مدل‌سازی شده ۱۲/۷ میلی‌متر است. از این رو مقدار نیروی بیرون کشیدن در لغزش‌های بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باستی صفر نیوتن باشد. ولی این مقدار در نمودارهای نیرو-لغزش حاصل از مدل ارائه شده صفر نیست. یکی از ضعف‌های مدل خرابی پلاستیک بتن موجود در نرم‌افزار ABAQUS عدم حذف المان می‌باشد. در نتیجه المان‌های اطراف الیاف به دلیل کاهش ۹۹ درصدی سختی و همچنین حذف نشدن از مدل، تغییر شکل‌های بسیار زیادی دارند. از طرفی، به دلیل تغییر شکل زیاد این المان‌ها، زمان تحلیل را به شدت افزایش می‌دهند و گاهی به دلیل اعوجاج زیاد این المان‌ها، باعث بروز خطا در حین تحلیل مدل می‌شود. این اتفاق تا انتهای بیرون کشیده شدن الیاف ادامه دارد و منجر به صفر نشدن نیروی بیرون کشیدن الیاف می‌شود. با این حال، المان‌های اطراف الیاف به دلیل کاهش ۹۹ درصدی سختی‌شان، تنش و نیروی بسیار کوچکی را تحمل می‌کنند و مقدار نیروی بیرون کشیدن الیاف در لغزش‌های انتهایی، درصد ناچیزی از حداکثر مقدار خود می‌باشد. شکل ۵-۲ کاهش سختی المان‌های

ماتریس سیمانی را در لغزش‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۹، ۱۰ و ۱۲/۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. قسمت‌های قرمز نواحی‌ای هستند که مقدار سختی المان‌ها به حداقل یا به‌بیان‌دیگر، مقدار کاهش سختی به حداکثر رسیده و در نمونه‌های آزمایشگاهی این نواحی ترک‌خورده و از نمونه جدا می‌شوند. همان‌طور که در شکل‌های ۲-۵(ث) و ۲-۵(ج) مشاهده می‌شود، این نواحی قرمز رشد ناگهانی دارند که نشان‌دهنده‌ی پدیده‌ی کنده شدن ماتریس سیمانی می‌باشد. در لغزش‌های ابتدایی آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی، خرابی ماتریس سیمانی از نواحی جلوی ماتریس یعنی نواحی‌ای که الیاف در ماتریس نفوذ کرده است شروع می‌شود. با مشاهده نمودن شکل ۲-۵(الف) این پدیده در مدل ارائه‌شده نیز به‌وضوح قابل‌ملاحظه می‌باشد.

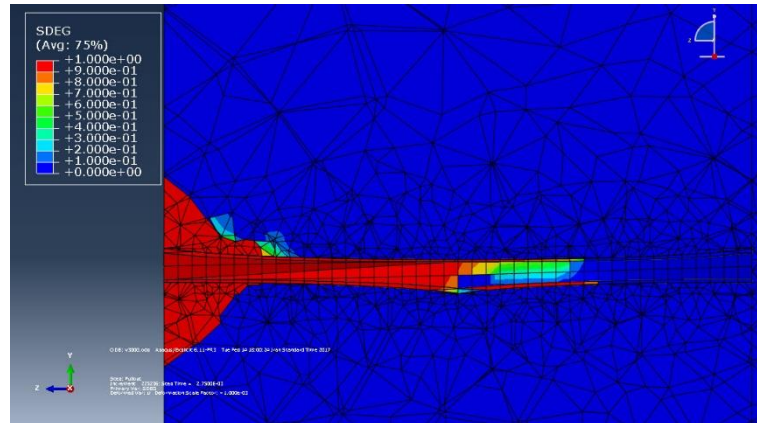
در طول آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی، هنگامی که الیاف از ماتریس سیمانی بیرون کشیده می‌شود، تابیدگی‌های آن باز می‌شود و قسمتی که هنوز درون ماتریس سیمانی قرار دارد تحت تنش‌های ناشی از اصطکاک می‌باشد. از این‌رو قسمتی از الیاف که از ماتریس بیرون کشیده شده است، تنش‌های بیشتری را تحمل می‌کند. شکل ۳-۵ تنش فون-میسز را در لغزش‌های صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۹، ۱۰ و ۱۲/۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل‌مشاهده می‌باشد، قسمتی از الیاف که از ماتریس سیمانی بیرون کشیده شده است، تنش فون-میسز بیشتری را دارا می‌باشد. همچنین شکل ۴-۵ تنش فون-میسز را در طول بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ای را نشان می‌دهد که گام تابیدگی آن برابر طول مدفون یعنی ۱۲/۷ میلی‌متر است و در طول الیاف یک دور کامل می‌زند. در این شکل مکانیزم باز شدن تابیدگی‌های الیاف نیز قابل‌رؤیت می‌باشد.



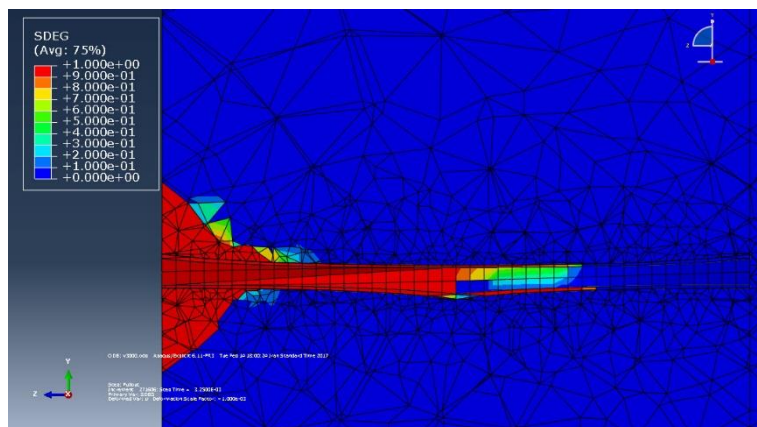
الف



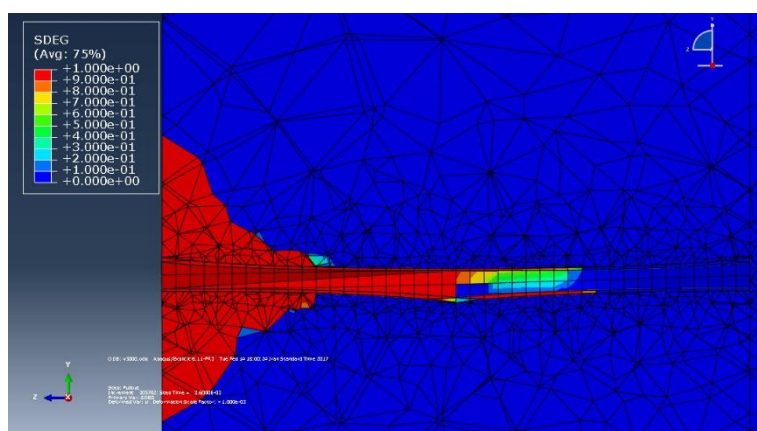
ب



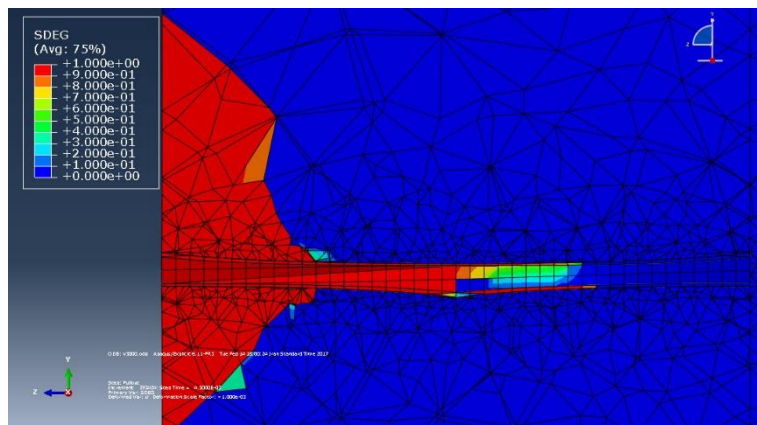
ج



ت

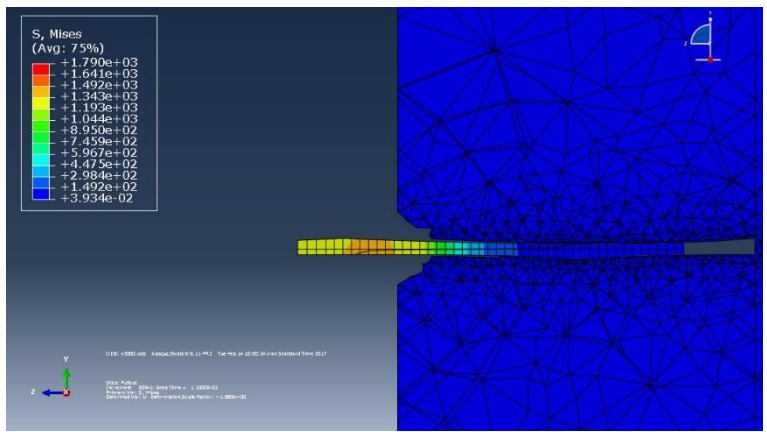


ث

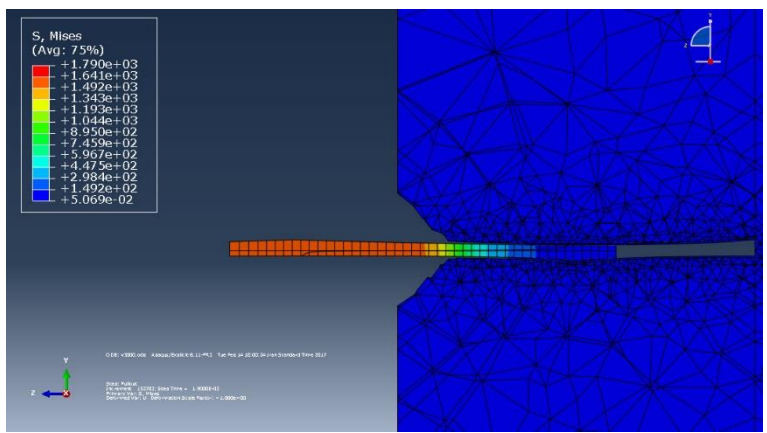


ج

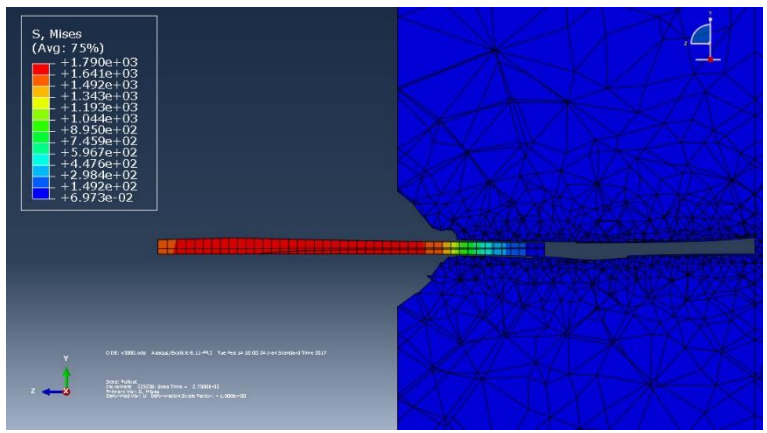
شکل ۵-۲: کاهش سختی المان‌های ماتریس سیمانی در لغزش‌های الف) ۲/۵، ب) ۵، پ) ۷/۵، ت) ۹، ث) ۱۰ و ج) ۱۲/۷ میلی‌متر.



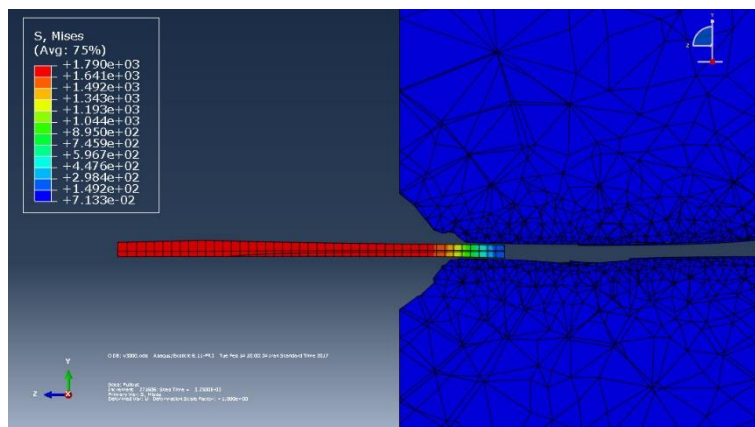
الف



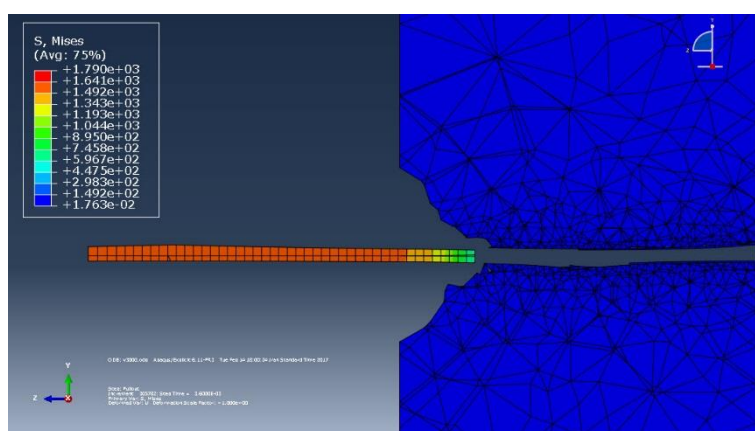
ب



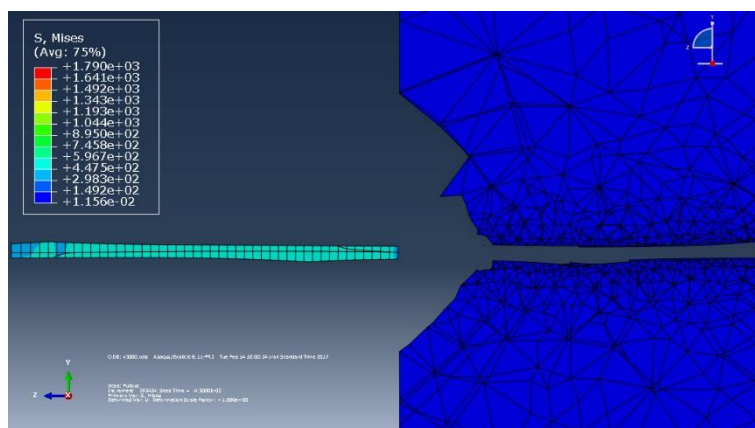
ج



ت

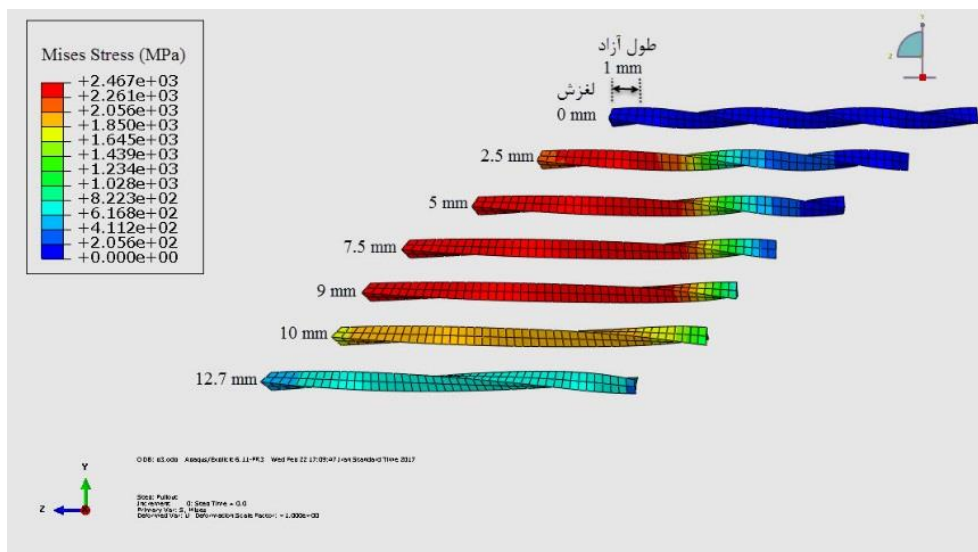


ث



ج

شکل ۳-۵: کانتور تنش فون-میسز در طول بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی در لغزش‌های الف) ۲/۵، ب) ۵، پ) ۷/۵، ت) ۹، ث) ۱۰ و ج) ۱۲/۷ میلی‌متر.

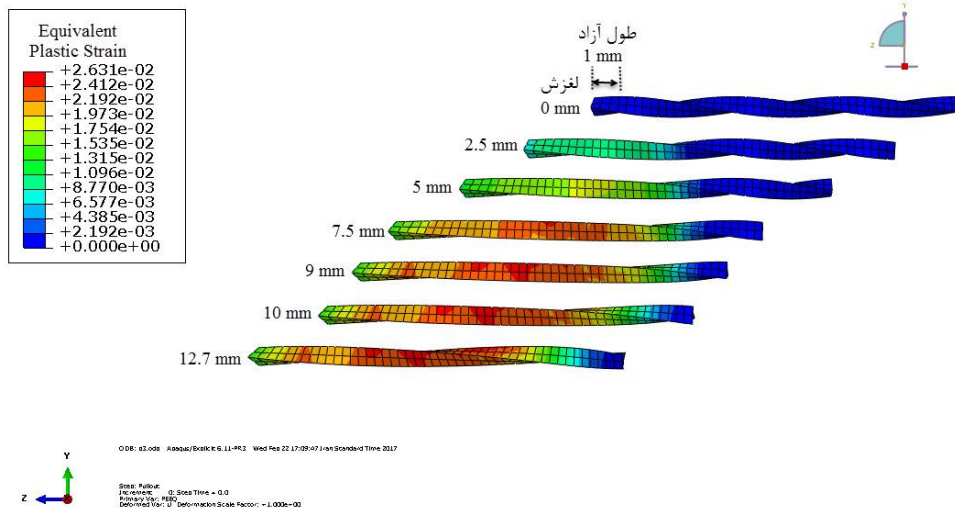


شکل ۴-۵: کانتور تنش فون-میسز در طول بیرون کشیدن الیاف تابیده.

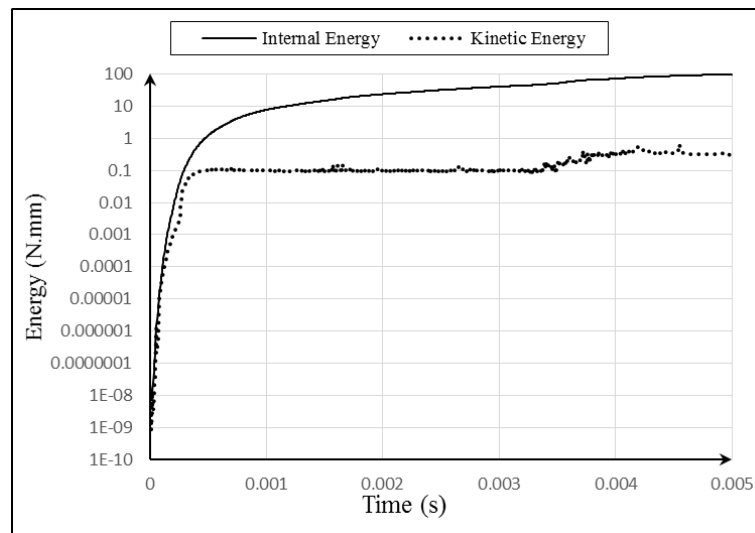
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی، تابیدگی‌های قسمتی از الیاف تابیده که درون ماتریس سیمانی مدفون است، باز نمی‌شود و هنگامی که از درون ماتریس سیمانی به بیرون می‌لغزند تابیدگی‌های آن باز می‌شود. در نتیجه قسمتی از الیاف که از ماتریس سیمانی بیرون کشیده شده است دارای کرنش‌های بیشتری نسبت به قسمت مدفون در ماتریس سیمانی می‌باشد. شکل ۵-۵ کرنش پلاستیک معادل در لغزش‌های صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۹، ۱۰ و ۱۲/۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. این الیاف دارای طول مدفون و گام تابیدگی ۱۲/۷ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل ۵-۵ هر چه الیاف بیشتر بیرون کشیده می‌شود یا به عبارت دیگر مقدار لغزش افزایش می‌یابد؛ مقدار کرنش پلاستیک بیشتر می‌شود. همچنین قسمتی از الیاف که دارای کرنش پلاستیک کوچکی است و در شکل ۵-۵ به رنگ آبی نشان داده شده است، درون ماتریس سیمانی قرار دارد و هنوز بیرون کشیده نشده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در لغزش‌های ابتدایی آزمایش بیرون کشیدن، قسمتی از جلوی ماتریس سیمانی که با الیاف در تماس است، خرد شده و طول مدفون کاهش می‌یابد که با مقایسه‌ی الیاف در لغزش‌های صفر و ۲/۵ میلی‌متر در شکل ۵-۵ قابل مشاهده است. پدیده‌ی کنده شدن ماتریس نیز در لغزش ۹ میلی‌متر مشاهده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده

است، در لغزش‌های بیشتر از ۹ میلی‌متر قسمت آبی‌رنگ الیاف که معرف قسمت بیرون کشیده نشده از ماتریس سیمانی می‌باشد و همچنین مقدار کرنش پلاستیک در قسمت‌های بیرون کشیده شده از ماتریس سیمانی، به دلیل رخ دادن پدیده‌ی کنده شدن ماتریس سیمانی، تغییری نکرده است. هنگامی که پدیده‌ی کنده شدن ماتریس سیمانی رخ می‌دهد، الیاف تابیده مقداری از تابیدگی‌هایی که باز شده است را بازیابی می‌نماید.

در حالت کلی برحسب شکل فیزیکی بارگذاری، مسائل به سه صورت کلی استاتیکی، دینامیکی و شبه استاتیکی دسته‌بندی می‌شوند. در مسائل استاتیکی شتاب برابر صفر می‌باشد، از این رو در حل این دست مسائل می‌توان از جرم صرف‌نظر نمود. در واقع حالت مسئله در این لحظه بسیار به حالت قبلی نزدیک است. در مسائل دینامیکی جرم نقش اساسی ایفا می‌کند و سیستم دارای شتاب می‌باشد. در مسائل شبه استاتیکی در یک لحظه خاص از زمان می‌توان مسئله را استاتیکی فرض نمود. آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی در دسته‌ی مسائل شبه استاتیکی طبقه‌بندی می‌شود. دلیل آن سرعت بیرون کشیدن پایین این الیاف می‌باشد که در نمونه‌های آزمایشگاهی مقادیر مختلفی در حدود ۳ میکرون بر ثانیه می‌باشد. در این پژوهش برای تحلیل مدل اجزای محدود ارائه شده از حلگر دینامیکی صریح استفاده شده است و همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، سرعت بارگذاری ۳ متر بر ثانیه می‌باشد. در این حالت برای معتبر بودن نتایج ارائه شده می‌بایستی نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در کل مدل نسبتی کوچک باشد. شکل ۵-۶ نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی داخلی را برحسب زمان نشان می‌دهد که محور قائم به صورت لگاریتمی می‌باشد. همان‌طور که در شکل پیداست مقدار انرژی جنبشی در مقابل انرژی داخلی بسیار ناچیز می‌باشد.



شکل ۵-۵: کرنش پلاستیک معادل در لغزش‌های مختلف.



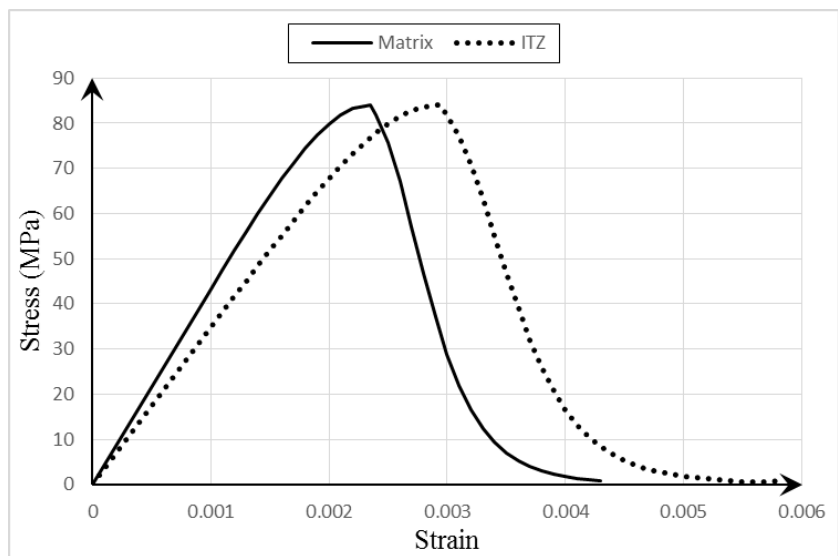
شکل ۵-۶: نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی داخلی.

به منظور صحت سنجی مدل ارائه شده، تمامی خصوصیات هندسی و مکانیکی الیاف و همچنین مقاومت فشاری ماتریس سیمانی تغییر داده شد و نمودار نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی با نمونه‌ی کاملاً مشابه آزمایشگاهی ارائه شده توسط سوچیورا کول [۹]، مقایسه شد. الیاف تابیده‌ی فولادی مدل شده و آزمایشگاهی دارای سطح مقطع مربعی شکل با ابعاد 1×1 میلی‌متر به طول مدفون $25/4$ میلی‌متر، گام تابیدگی $10/6$ میلی‌متر و مقاومت کششی 2065 مگا پاسکال

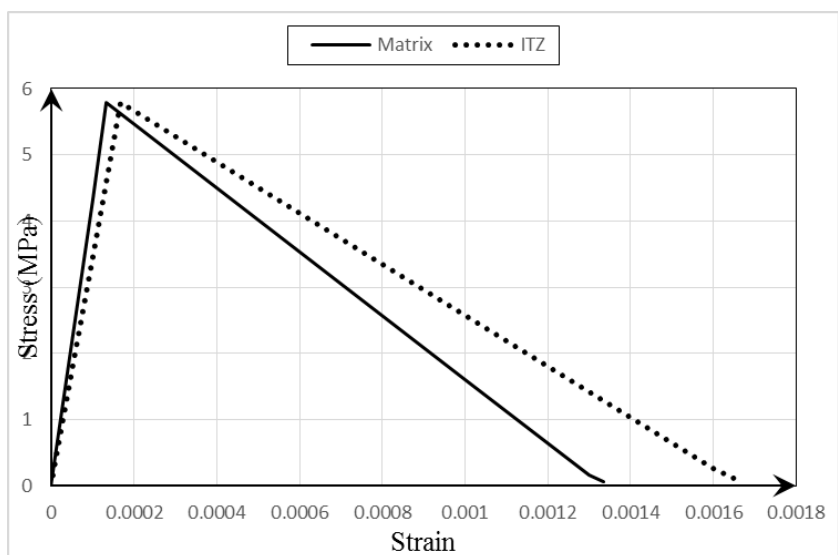
می‌باشد و مقاومت ماتریس سیمانی ۸۴ مگا پاسکال است. برای رفتار فشاری مصالح بتنی از رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری ارائه‌شده توسط تورنفیلد، توماسویچ و یانسن [۲۳] استفاده‌شده است. همچنین برای رفتار کششی مصالح بتنی از رابطه‌ی تنش-کرنش کششی ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ی CEB-FIP 1990 استفاده شده است. سپس توسط نرم‌افزار ABAQUS آزمایش کشش تک‌محوره‌ی الیاف فولادی بدون تابیدگی مدل‌سازی شد و نمودار تنش-کرنش کششی حاصل از این مدل با نمودار تنش-کرنش کششی آزمایشگاهی الیاف فولادی ارائه‌شده توسط سوجیورا کول کالیبره شد. در این مدل برای الیاف فولادی از مدل سخت‌شدگی همسانگرد و کینماتیکی غیرخطی به‌صورت ترکیبی استفاده شد که پیش‌تر به‌طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای کالیبراسیون در این مدل، تنش تسلیم σ^0 ، مدول سخت‌شدگی کینماتیکی اولیه C و نرخ کاهش مدول سخت‌شدگی کینماتیکی با افزایش تغییرشکل پلاستیک γ در نظر گرفته شدند که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۹۰۰ مگا پاسکال، ۳۵۰ گیگا پاسکال و ۳۰۰ می‌باشد. جدول ۱-۵ خصوصیات مکانیکی الیاف را نشان می‌دهد. شکل ۵-۷ رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری ماتریس و ITZ، شکل ۵-۸ رابطه‌ی تنش-کرنش کششی ماتریس و ITZ و شکل ۵-۹ کالیبراسیون رفتار کششی الیاف فولادی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۵ خصوصیات مکانیکی الیاف

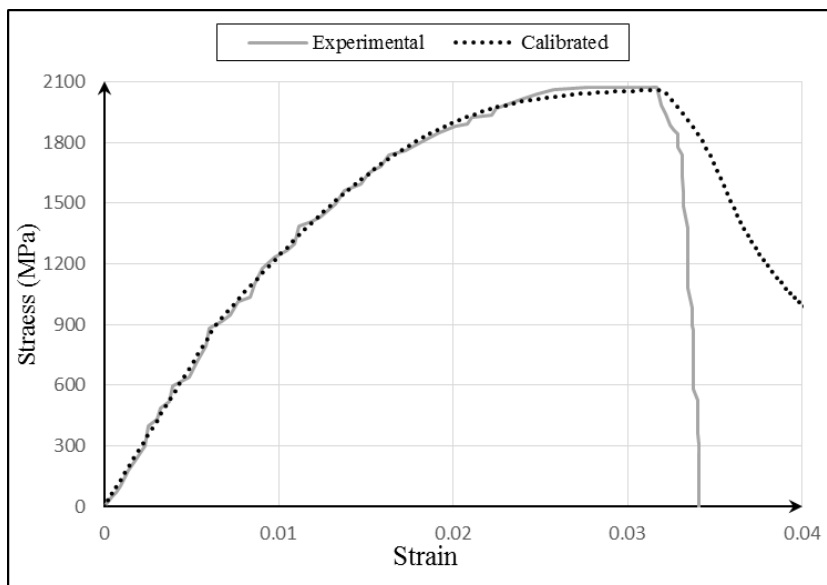
ρ (gr/cm^3)	E (GPa)	ν	σ^0 (MPa)	C (GPa)	γ
۷/۸۵	۱۴۰	۰/۳۳	۱۱۵۰	۳۵۰	۳۰۰



شکل ۵-۷: رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری ماتریس سیمانی و ITZ.

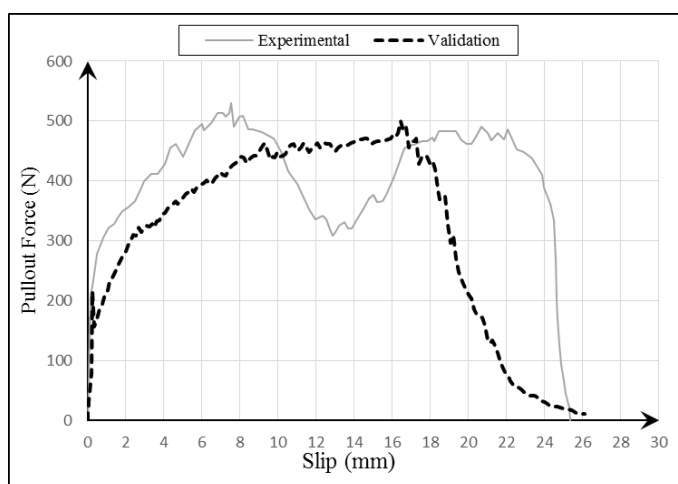


شکل ۵-۸: رابطه‌ی تنش-کرنش کششی ماتریس سیمانی و ITZ.



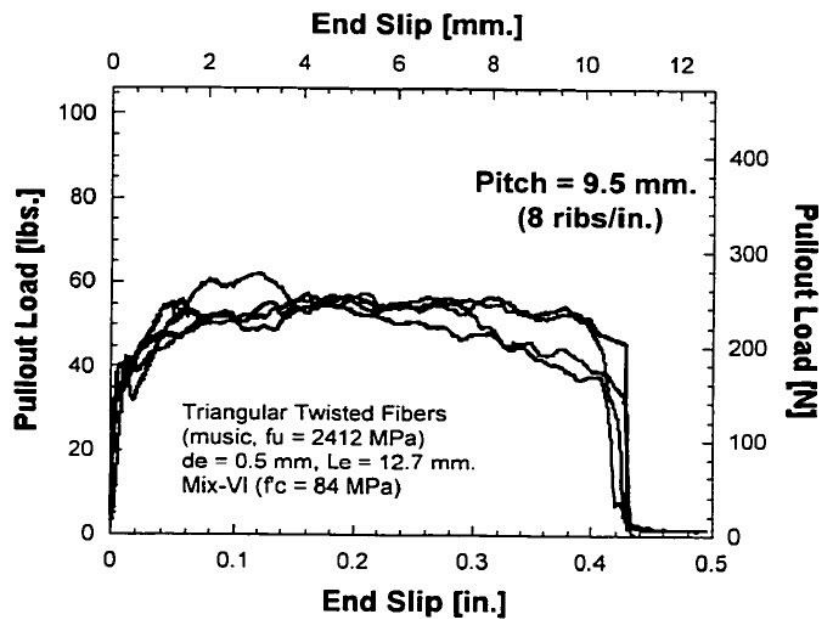
شکل ۵-۹: کالیبراسیون رفتار کششی الیاف فولادی.

مقدار نیروی بیرون کشیدن بیشینه در نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل صحت سنجی شده به ترتیب ۵۰۰ و ۵۳۰ نیوتن است که مقدار خطای آن برابر ۶٪ می‌باشد. مقدار انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف برای نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل صحت سنجی شده به ترتیب ۱۰۴۰۲ و ۸۲۵۰ نیوتن میلی‌متر است که مقدار خطای آن برابر ۲۱٪ می‌باشد. شکل ۵-۱۰ نمودار نیرو-لغزش آزمایشگاهی و مدل صحت سنجی شده حاصل از نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۰: مقایسه‌ی نمودار صحت سنجی شده با نمودار آزمایشگاهی.

معمولاً آزمایش‌های بیرون کشیدن الیاف، چندین بار تکرار می‌شود و نمودار نیرو-لغزش نهایی، میانگینی از چندین نمودار نیرو-لغزش با خصوصیات هندسی و مکانیکی کاملاً مشابه می‌باشد. شکل ۵-۱۱ نمونه‌ای از آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی می‌باشد. در این نمودار تغییرات نیروی بیرون کشیدن در طول لغزش به‌طور میانگین برابر ۴۰ نیوتن می‌باشد.



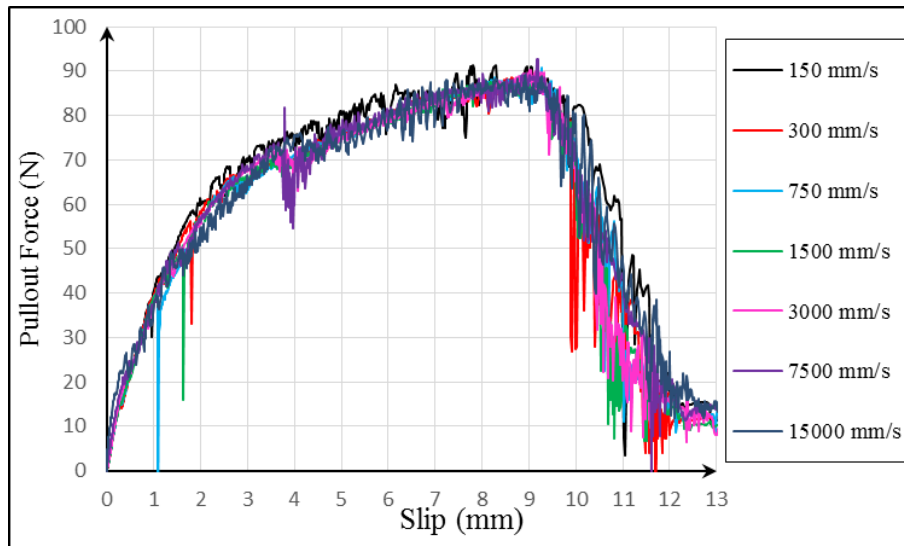
شکل ۵-۱۱: نمونه‌ای از آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی [۹].

۵-۳- آنالیز حساسیت

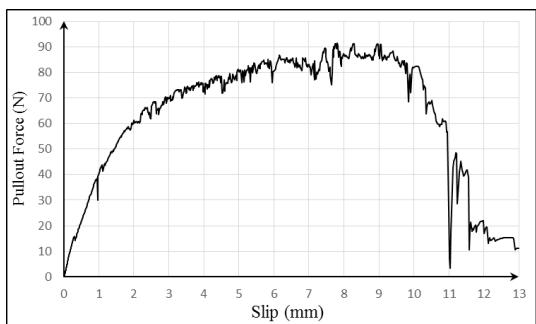
۵-۳-۱- آنالیز حساسیت بر روی سرعت بیرون کشیدن الیاف

در آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی سرعت بیرون کشیدن الیاف برابر با ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه یا ۳ میکرون بر ثانیه می‌باشد. با توجه به عدم دسترسی به رایانه‌ای با قدرت پردازش بالا و زمان‌بر بودن تحلیل مدل و کاهش هزینه‌ی محاسبات، الیاف تابیده با سرعت ۳۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه بیرون کشیده شدند. از این‌رو اثر سرعت بیرون کشیدن الیاف مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۵-۱۲ نمودار بیرون کشیدن الیاف تابیده با سرعت‌های ۱۵۰، ۳۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۷۵۰۰ و ۱۵۰۰۰

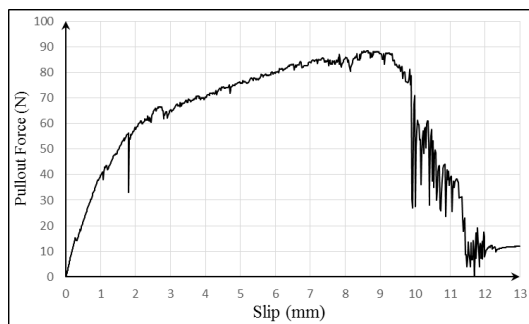
میلی‌متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت بیرون کشیدن الیاف تأثیری بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده نداشته است. به‌طور مثال، نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی این الیاف با سرعت‌های ۱۵۰، ۳۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۷۵۰۰ و ۱۵۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۹۱، ۸۹، ۹۰، ۹۳ و ۸۹ نیوتن می‌باشد که ۴/۵ درصد نوسان دارند. همچنین انرژی بیرون کشیدن این الیاف به ترتیب برابر با ۸۲۰، ۷۶۱، ۷۶۹، ۷۵۵، ۷۶۰، ۷۸۲ و ۷۸۶ نیوتن می‌باشد که ۸ درصد نوسان دارند. مطابق با شکل ۵-۱۳، هنگامی سرعت بیرون کشیدن الیاف تابیده از ۳۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه تجاوز می‌کند، نوسانات نمودار نیرو-لغزش افزایش می‌یابد.



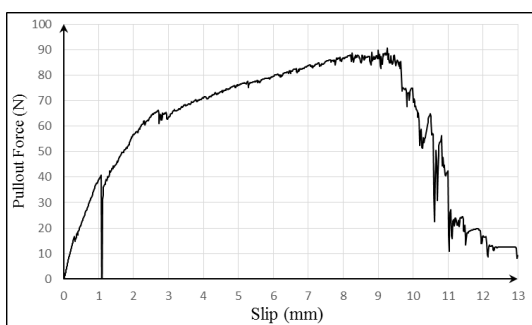
شکل ۵-۱۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با سرعت‌های مختلف.



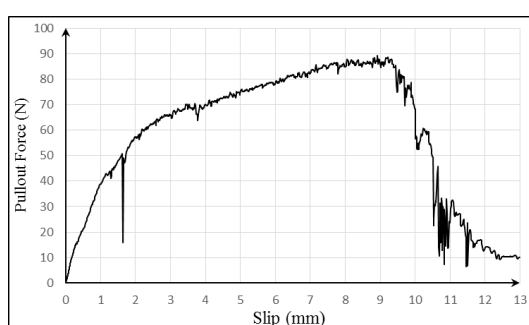
الف



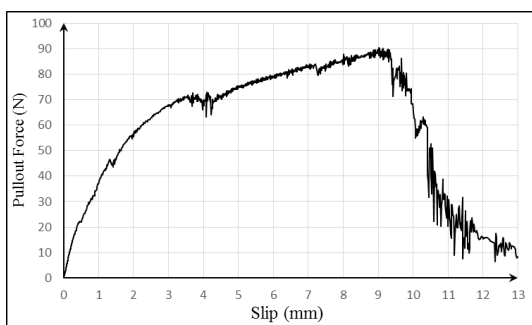
ب



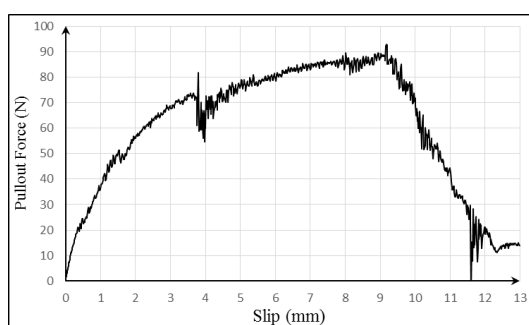
پ



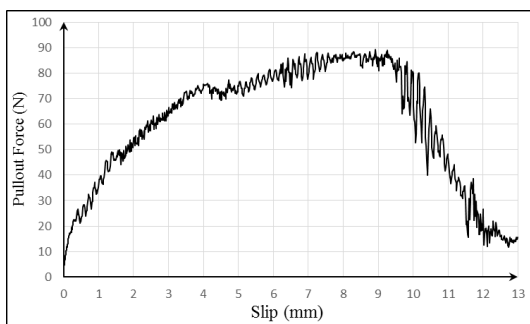
ت



ث



ج



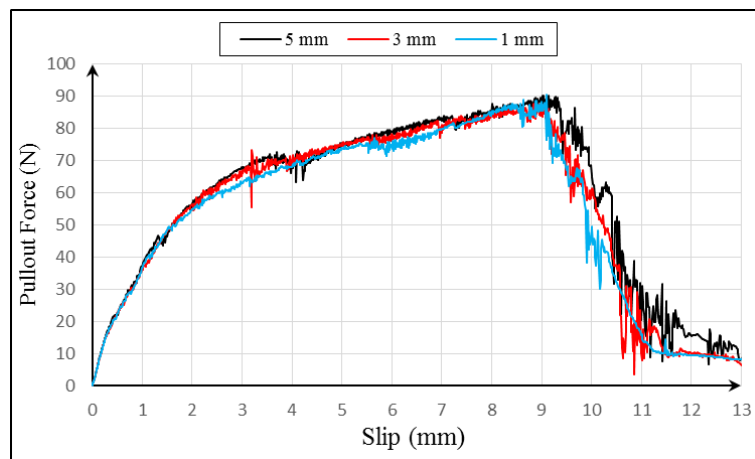
چ

شکل ۵-۱۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تاییده با سرعت الف) ۱۵۰ mm/s، ب) ۳۰۰ mm/s، پ) ۷۵۰ mm/s، ت) ۱۵۰۰ mm/s، ث) ۳۰۰۰ mm/s، ج) ۷۵۰۰ mm/s و چ) ۱۵۰۰۰ mm/s.

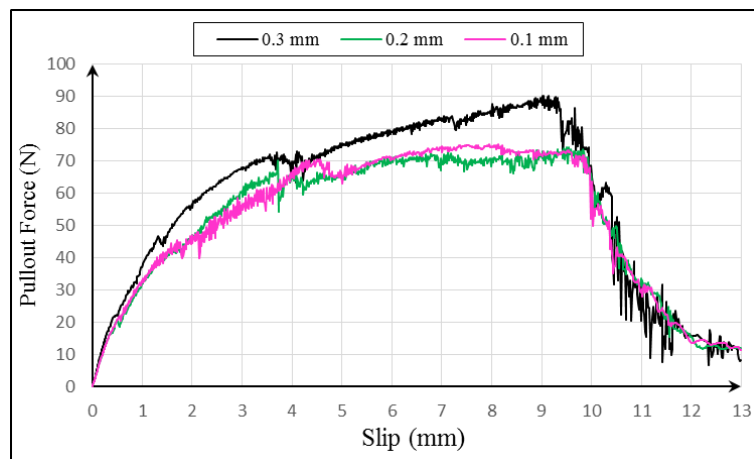
۵-۳-۲- آنالیز حساسیت بر روی مش بندی

شکل ۵-۱۴ اثر تغییرات ابعاد مش بندی روی سطح جانبی ماتریس سیمانی را بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده را نشان می‌دهد. ابعاد المان‌های الیاف، ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف ۰/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و تنها ابعاد المان بر روی سطح جانبی ماتریس سیمانی از ۱ تا ۵ میلی‌متر تغییر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود با ریز شدن مش بندی نوسانات نمودار بیرون کشیدن کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۳ و ۷/۵ درصد می‌باشد.

شکل ۵-۱۵ اثر تغییرات ابعاد مش بندی الیاف را بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده را نشان می‌دهد. ابعاد المان ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف ۰/۳ میلی‌متر و ابعاد المان‌های روی سطح جانبی ماتریس سیمانی ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و تنها ابعاد المان‌های الیاف از ۰/۳ تا ۰/۱ میلی‌متر تغییر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریز شدن مش بندی، افزایش جزئی نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد. همچنین تغییرات نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۱۷/۵ و ۱۱ درصد می‌باشد.

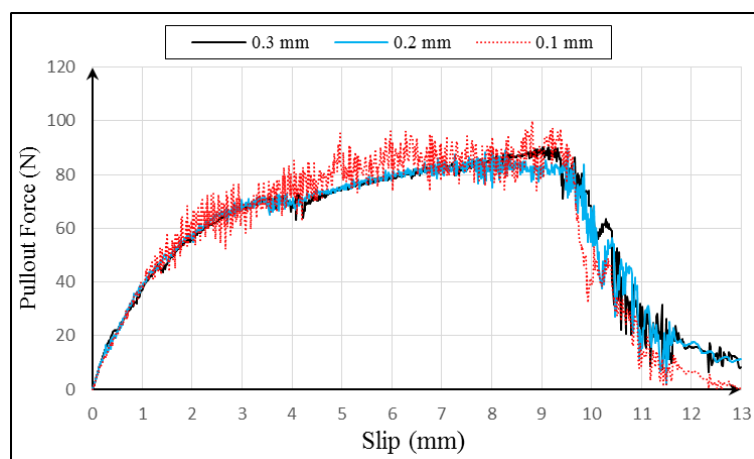


شکل ۵-۱۴: نمودار نیرو-لغزش با تغییر ابعاد مش بندی روی سطح جانبی ماتریس سیمانی.



شکل ۵-۱۵: نمودار نیرو-لغزش با تغییر ابعاد مش بندی الیاف.

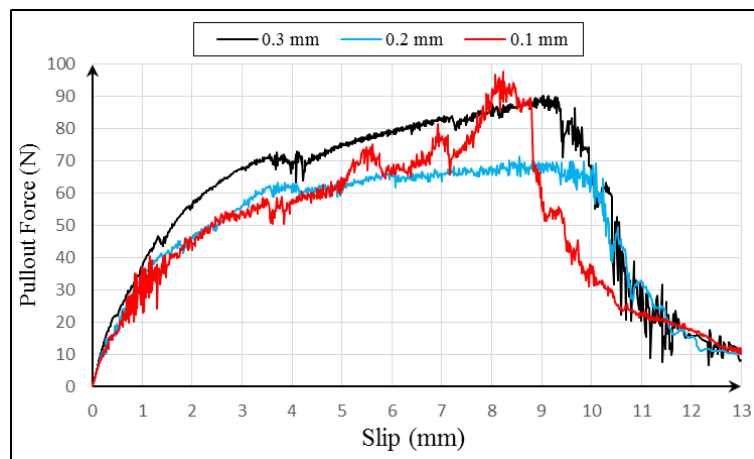
شکل ۵-۱۶ اثر تغییرات ابعاد مش بندی ITZ را بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده را نشان می‌دهد. ابعاد المان الیاف و ماتریس سیمانی اطراف الیاف $0/3$ میلی‌متر و ابعاد المان‌های روی سطح جانبی ماتریس سیمانی ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و تنها ابعاد المان‌های ITZ از $0/3$ تا $0/1$ میلی‌متر تغییر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریز شدن مش بندی، افزایش نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد. همچنین تغییرات نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۱۱ و ۱ درصد می‌باشد.



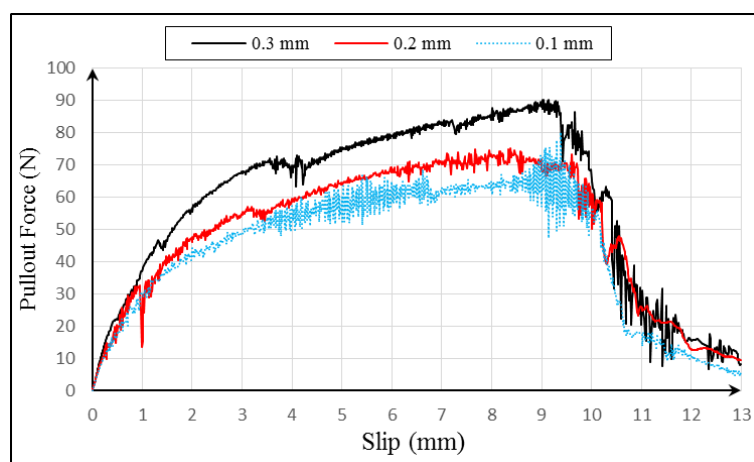
شکل ۵-۱۶: نمودار نیرو-لغزش با تغییر ابعاد مش بندی ITZ.

شکل ۵-۱۷ اثر تغییرات همزمان ابعاد مش بندی الیاف و ITZ را بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده را نشان می‌دهد. ابعاد المان‌های ماتریس سیمانی اطراف الیاف $0/3$ میلی‌متر و ابعاد المان‌های روی سطح جانبی ماتریس سیمانی 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است و تنها ابعاد المان‌های الیاف و ITZ به صورت یکسان از $0/3$ تا $0/1$ میلی‌متر تغییر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریز شدن مش بندی، افزایش جزئی نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد. همچنین تغییرات نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب 27 و 17 درصد می‌باشد.

شکل ۵-۱۸ اثر تغییرات همزمان ابعاد مش بندی الیاف، ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف را بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده را نشان می‌دهد. ابعاد المان‌های روی سطح جانبی ماتریس سیمانی 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است و تنها ابعاد المان‌های الیاف، ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف به صورت یکسان از $0/3$ تا $0/1$ میلی‌متر تغییر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریز شدن مش بندی، افزایش شدید نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد. همچنین تغییرات نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب $16/5$ و 25 درصد می‌باشد. از آنجایی که بعد مؤثر مصالح سیمانی بتن مدل‌سازی شده در این پژوهش $0/3$ میلی‌متر می‌باشد؛ به منظور جلوگیری از خرابی‌های مصالح سیمانی در محل‌های به‌خصوصی در مدل، اندازه‌ی المان‌های اطراف الیاف نیز $0/3$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۱۷: نمودار نیرو-لغزش با تغییر هم‌زمان ابعاد مش بندی الیاف و ITZ.



شکل ۵-۱۸: نمودار نیرو-لغزش با تغییر هم‌زمان ابعاد مش بندی الیاف، ITZ و ماتریس سیمانی اطراف الیاف.

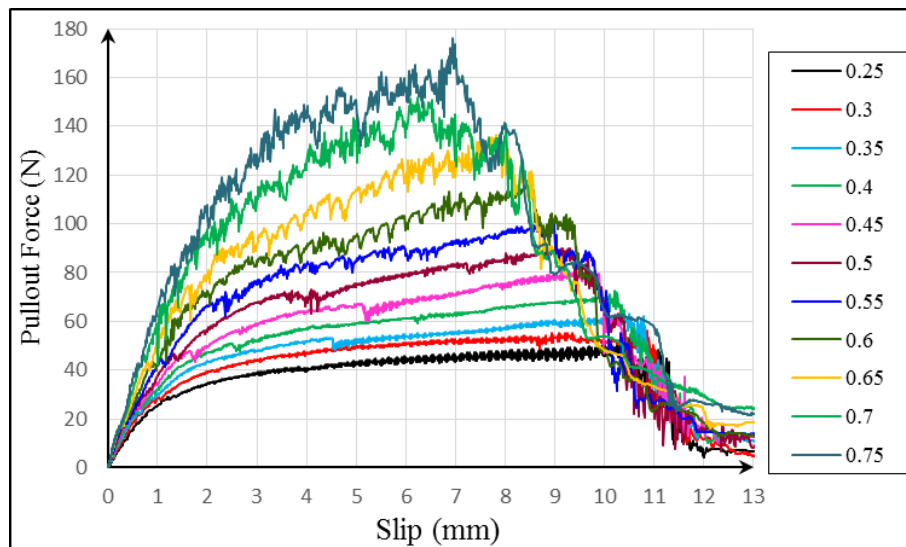
۵-۳-۳- آنالیز حساسیت بر روی ضریب اصطکاک سطح تماس الیاف و ITZ

شکل ۵-۱۹ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه ضلعی گون منتظم، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، طول مدفون ۱۲/۷، طول آزاد ۱ و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در مقدار ضریب اصطکاک سطح تماس الیاف و ITZ آن‌ها است که برابر ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵، ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ می‌باشند. با افزایش مقدار ضریب اصطکاک، نیروی بیرون

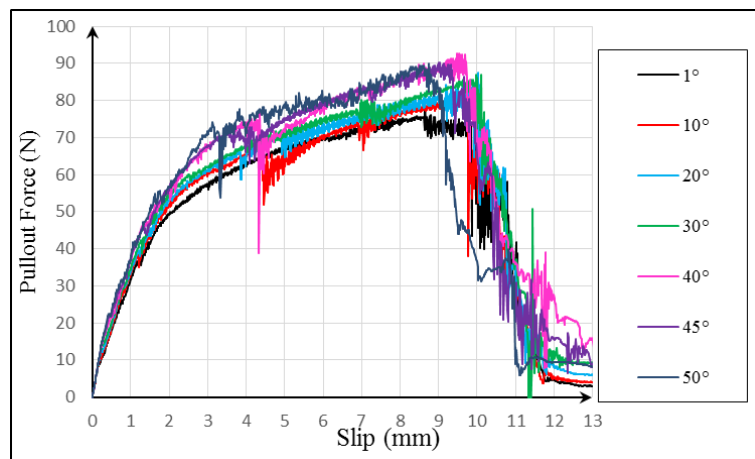
کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن افزایش چشم‌گیری داشته است. همچنین افزایش مقدار ضریب اصطکاک، افزایش نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد.

۵-۳-۴- آنالیز حساسیت بر روی زاویه‌ی اتساع

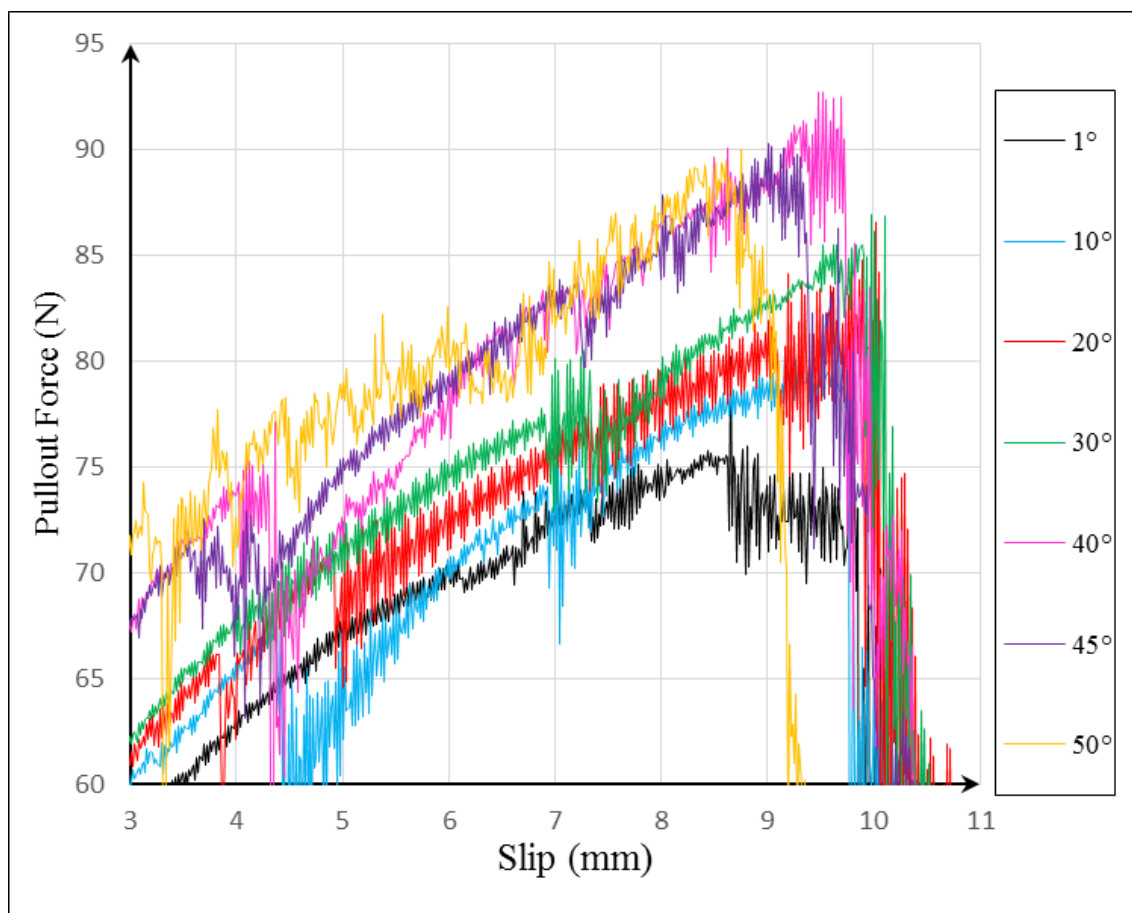
شکل‌های ۲۰-۵ و ۲۱-۵ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه‌ضلعی گون منتظم، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، طول مدفون ۱۲/۷، طول آزاد ۱ و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در مقدار زاویه‌ی اتساع است که برابر ۱، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه می‌باشد. نیروی بیرون کشیدن بیشینه با افزایش زاویه‌ی اتساع از ۱ تا ۴۰ درجه، سیر صعودی و برای زاویه‌های اتساع بزرگ‌تر از ۴۰ درجه سیر نزولی داشته است. نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۱۳/۵ و ۱۶ درصد نوسان دارند. کمترین نوسانات در زاویه‌های اتساع ۱، ۴۵ و ۵۰ درجه مشاهده شد.



شکل ۵-۱۹: نمودار نیروی بیرون کشیدن با ضرایب اصطکاک مختلف.



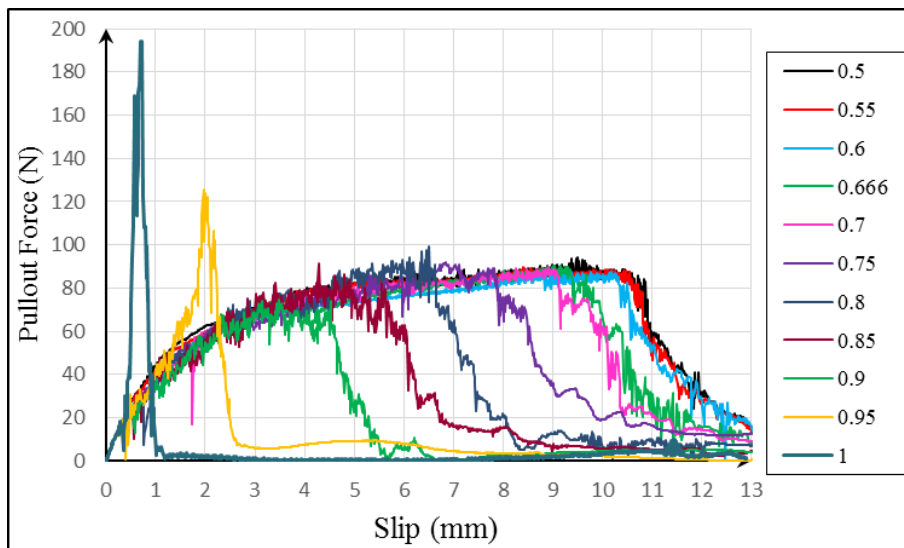
شکل ۵-۲۰: نمودار نیروی بیرون کشیدن با زوایای اتساع مختلف.



شکل ۵-۲۱: نمودار نیروی بیرون کشیدن با زوایای اتساع مختلف.

۵-۳-۵- آنالیز حساسیت بر روی نسبت دومین نامتغیر تنش روی نصف النهار کششی به فشاری (K)

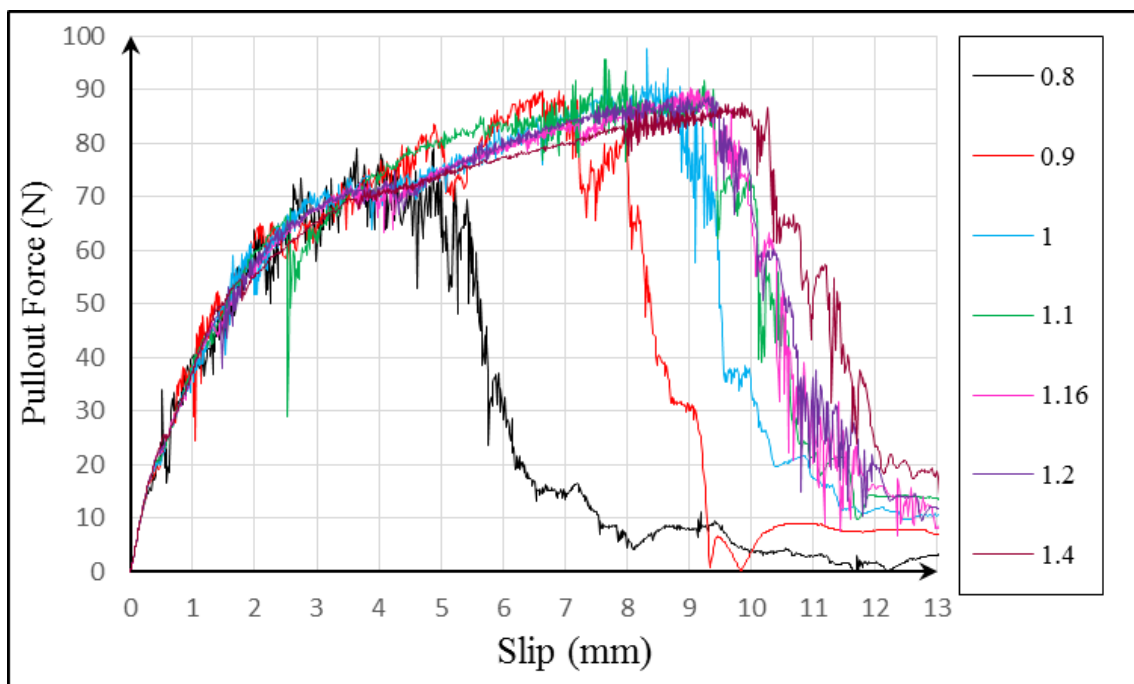
شکل ۵-۲۲ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه ضلعی گون منتظم، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی متر، طول مدفون ۱۲/۷ میلی متر، طول آزاد ۱ میلی متر و قطر معادل ۰/۵ میلی متر را نشان می دهد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می باشد. تفاوت این الیاف تنها در مقدار K است که برابر ۰/۵، ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۶۶۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵، ۰/۹، ۰/۹۵ و ۱ می باشد. همان طور که در شکل مشاهده می شود با افزایش مقدار K، شروع تنزل یا پدیده ی کنده شدن ماتریس سیمانی زودتر رخ می دهد. در مقادیر K برابر با ۰/۹۵ و ۱ در همان لغزش های ابتدایی ماتریس سیمانی ترک خورده و الیاف بیرون کشیده نمی شوند. افزایش مقدار K، افزایش نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال داشته است. همچنین افزایش مقدار ضریب اصطکاک، افزایش نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد.



شکل ۵-۲۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر مختلف K.

۵-۳-۶- آنالیز حساسیت بر روی نسبت تنش تسلیم فشاری دوجوره به تکمحوره

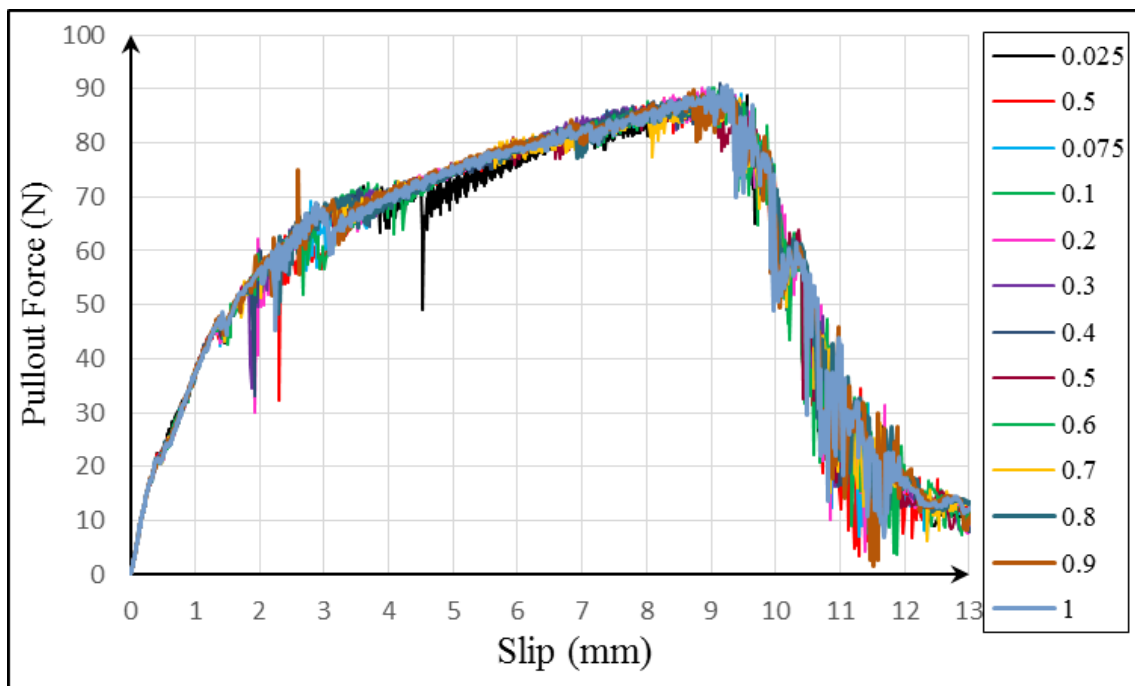
شکل ۵-۲۳ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه ضلعی گون منتظم، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی متر، طول مدفون ۱۲/۷ میلی متر، طول آزاد ۱ میلی متر و قطر معادل ۰/۵ میلی متر را نشان می دهد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می باشد. تفاوت این الیاف تنها در مقدار نسبت تنش تسلیم فشاری دوجوره به تکمحوره است که برابر ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۱۶، ۱/۲ و ۱/۴ می باشد. همان طور که در شکل مشاهده می شود با افزایش این نسبت، شروع تنزل یا پدیده ی کنده شدن ماتریس سیمانی دیرتر رخ می دهد. همچنین افزایش مقادیر این نسبت، افزایش نوسانات نمودار بیرون کشیدن را به دنبال دارد. نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۱۹ و ۵۴ درصد نوسان دارند.



شکل ۵-۲۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر نسبت تنش مختلف.

۵-۳-۷- آنالیز حساسیت بر روی خروج از مرکزیت

شکل ۵-۲۴ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه ضلعی گون منتظم، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در مقدار خروج از مرکزیت است که برابر ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات خروج از مرکزیت تأثیر چندانی بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده نداشته است. نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۲/۵ و ۲ درصد نوسان دارند.

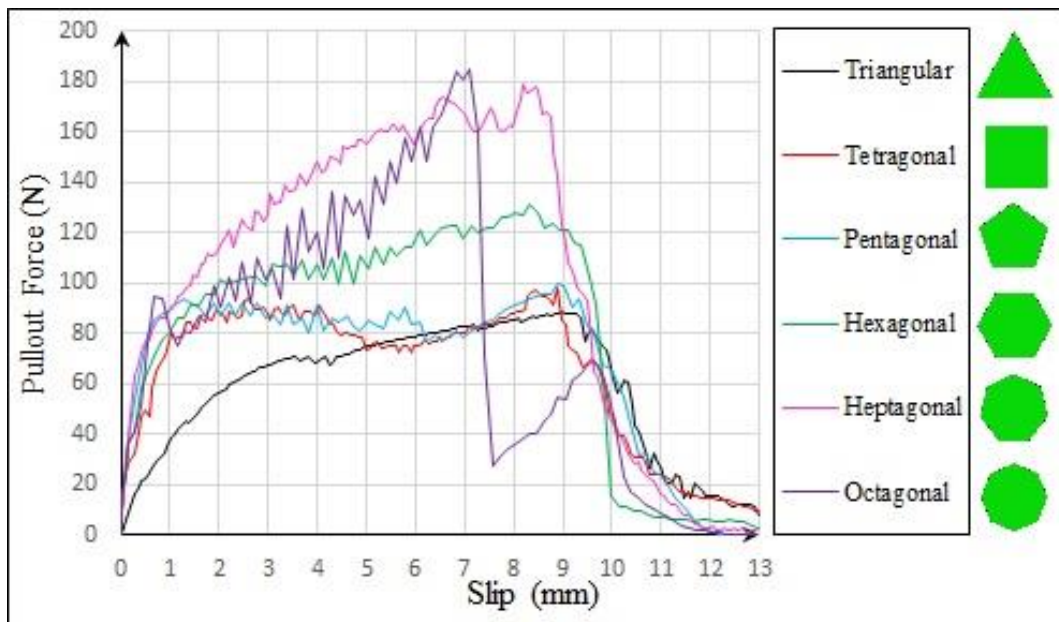


شکل ۵-۲۴: نمودار نیروی بیرون کشیدن با مقادیر خروج از مرکزیت مختلف.

۵-۴- بررسی اثر شکل سطح مقطع

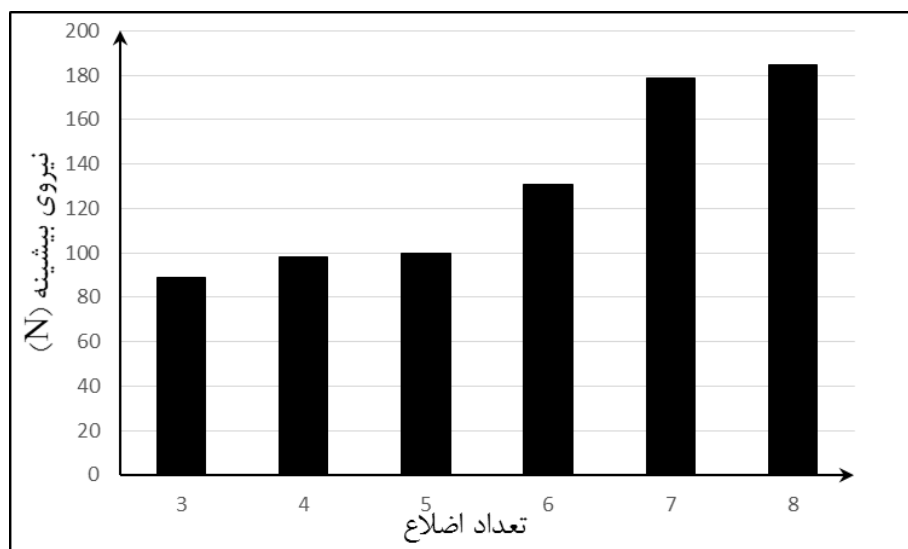
۵-۴-۱- الیاف با مقطع چندضلعی منتظم

برای بررسی اثر تعداد اضلاع در الیاف تابیده فولادی با مقاطع منتظم هندسی بر روی رفتار بیرون کشیدن، ۶ مدل ساخته شد. این مدل‌ها همگی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر هستند. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در شکل سطح مقطع آنها است که سه‌ضلعی (مثلث متساوی‌الاضلاع)، چهارضلعی (مربع)، پنج‌ضلعی، شش‌ضلعی، هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی منتظم می‌باشند. شکل ۵-۲۵ نمودار نیروی بیرون کشیدن این الیاف بر حسب لغزش را نشان می‌دهد.

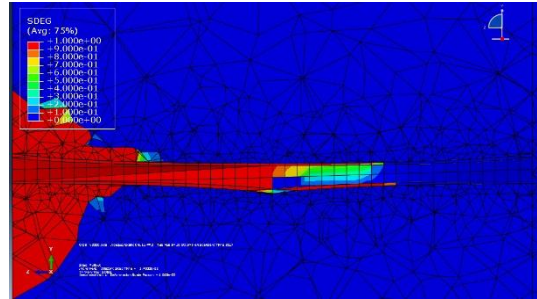
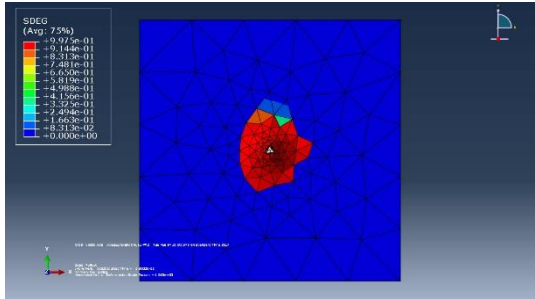


شکل ۵-۲۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چندضلعی منتظم.

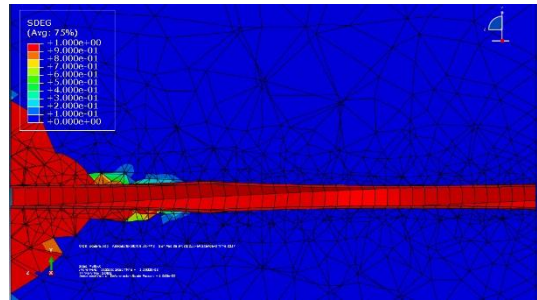
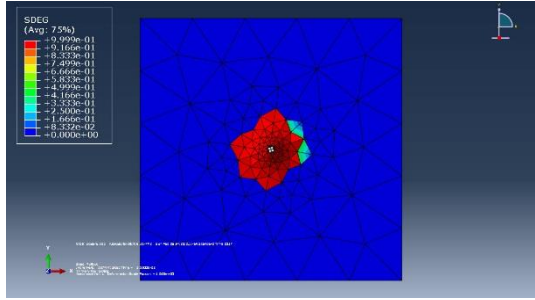
نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی حاصل از منحنی‌های نیرو-لغزش الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم به ترتیب برابر ۸۹، ۹۸، ۱۰۰، ۱۳۱، ۱۸۹ و ۱۸۵ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۲۶ قابل‌ملاحظه است، هنگامی که تعداد اضلاع مقطع از سه به هشت افزایش می‌یابد، نیروی بیرون کشیدن بیشینه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد اضلاع، توزیع تنش در ماتریس سیمانی یکنواخت‌تر می‌شود. یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش در ماتریس سیمانی منجر به کاهش تمرکز تنش در ماتریس سیمانی و خرابی کمتر ماتریس سیمانی اطراف الیاف شده و در نتیجه باعث افزایش نیروی بیرون کشیدن بیشینه می‌شود. شکل ۵-۲۷ کانتور خرابی ماتریس سیمانی اطراف الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم را نشان می‌دهد.



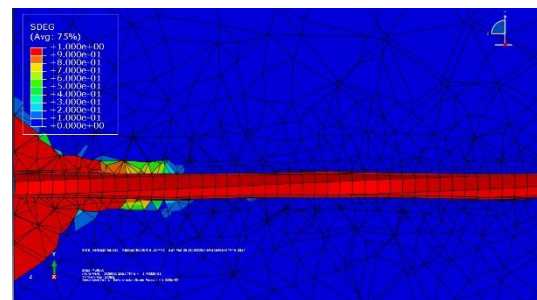
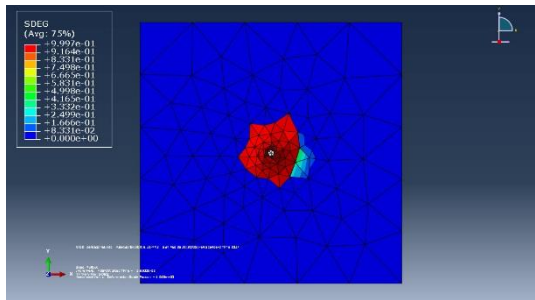
شکل ۵-۲۶: نمودار نیروی بیشینه بر حسب تعداد اضلاع.



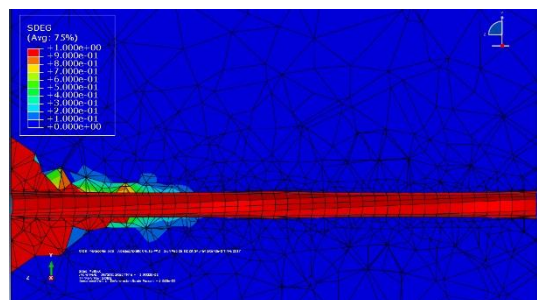
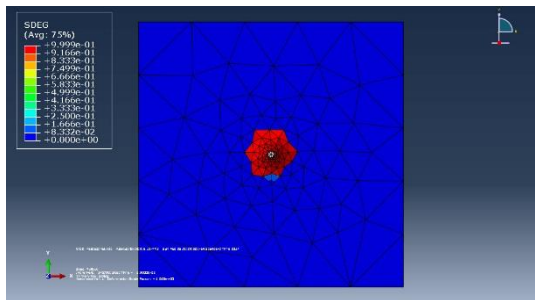
الف



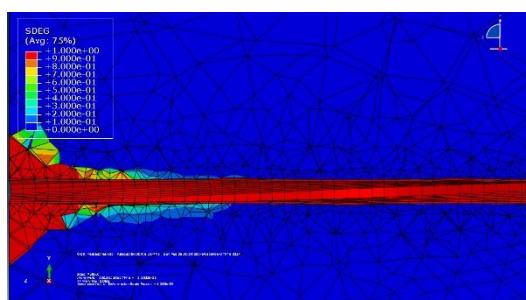
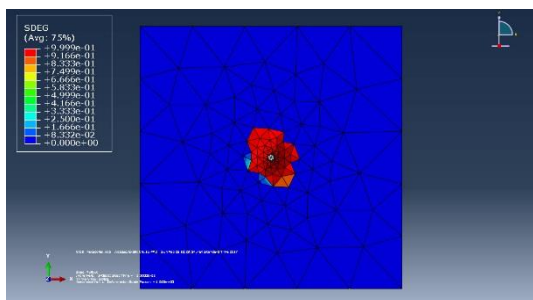
ب



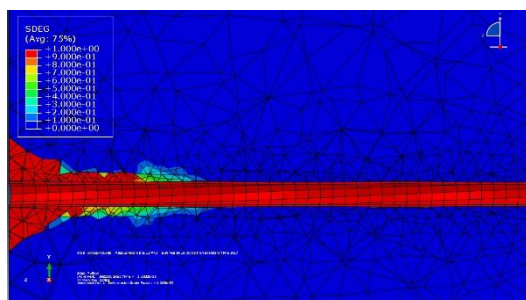
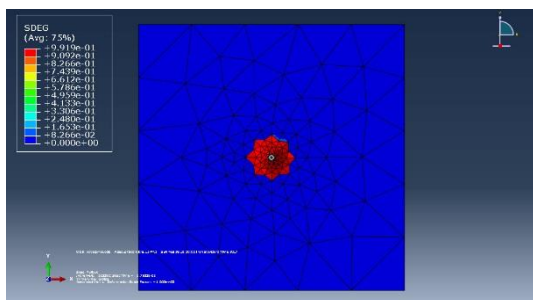
ج



د



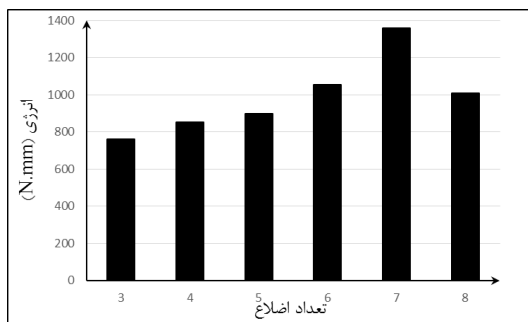
ث



ج

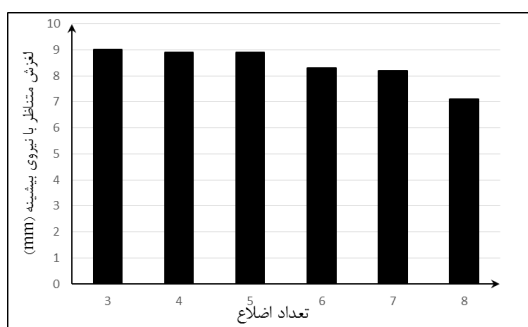
شکل ۵-۲۷: کانتور خرابی ماتریس سیمانی اطراف الیاف تابیده‌ی الف) سه‌ضلعی منتظم، ب) چهارضلعی منتظم، پ) پنج‌ضلعی منتظم، ت) شش‌ضلعی منتظم، ث) هفت‌ضلعی منتظم و ج) هشت‌ضلعی منتظم.

سطح زیر منحنی نیروی بیرون کشیدن-لغزش، معرف انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف می‌باشد که مقادیر آن برای مقاطع سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم به ترتیب برابر ۷۶۰، ۸۵۲، ۸۹۷، ۱۰۵۶، ۱۳۶۰ و ۱۰۱۱ نیوتن میلی‌متر است. همانطور که در شکل ۵-۲۸ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد اضلاع مقدار انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف تابیده افزایش می‌یابد. باین حال در مقطع هشت‌ضلعی منتظم انرژی بیرون کشیدن الیاف کاهش داشته است. هنگامی که تعداد اضلاع زیاد می‌شود، شکل مقطع به دایره میل می‌کند. از طرفی به دلیل زیاد بودن گام تابیدگی، شکل نمودار بیرون کشیدن به شکل الیاف صاف با مقطع دایره متمایل می‌شود و مقدار انرژی بیرون کشیدن آن کاهش می‌یابد.



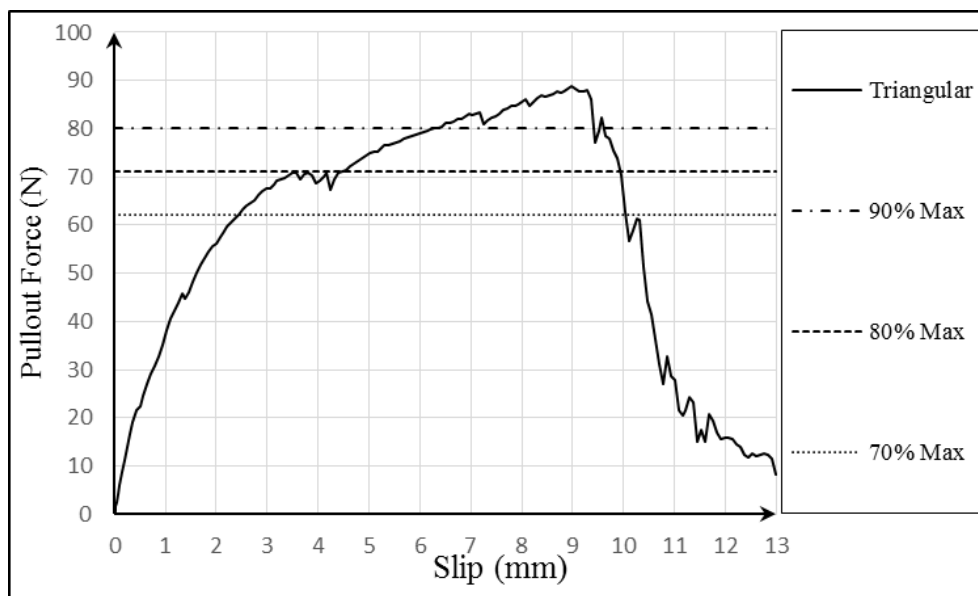
شکل ۵-۲۸: نمودار انرژی بیرون کشیدن در مقاطع چندضلعی منتظم.

لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه در الیاف تابیده بسیار بیشتر از الیاف قلاب دار و مستقیم می باشد. این ویژگی باعث می شود که منحنی نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده تا رسیدن به مقدار بیشینه سیر صعودی خود را حفظ کند. این ویژگی همچنین سبب می شود که منحنی های نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده، رفتار سخت شدگی-لغزش را دارا باشند. این رفتار منجر به افزایش چشمگیر انرژی لازم برای بیرون کشیدن این الیاف می شود. مقادیر لغزش متناظر با نیروی بیشینه ی الیاف تابیده با مقاطع سه ضلعی تا هشت ضلعی منتظم به ترتیب برابر با ۹، ۸/۹، ۸/۹، ۸/۳، ۸/۲ و ۷/۱ میلی متر می باشد. همان طور که پیش تر بیان شد، با افزایش تعداد اضلاع، شکل مقطع به دایره متمایل می شود. در نتیجه لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه کاهش می یابد. شکل ۵-۲۹ سیر نزولی لغزش متناظر با نیروی بیشینه با افزایش تعداد اضلاع را نشان می دهد.



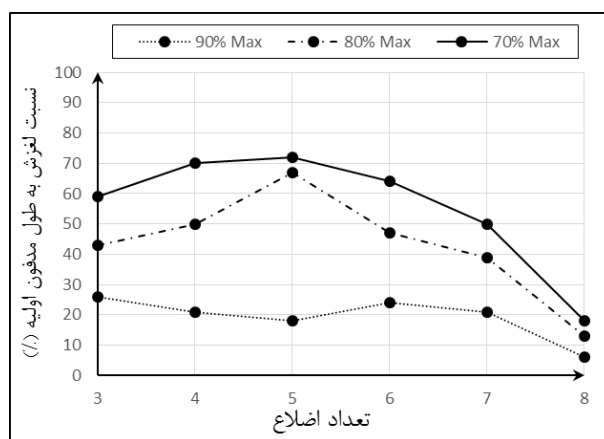
شکل ۵-۲۹: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیشینه در مقاطع چندضلعی منتظم.

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد منحنی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده این است که در طول لغزش، نیروی بیرون کشیدن را نزدیک مقدار بیشینه‌ی خود نگه می‌دارد. در نتیجه مقدار لغزشی که نیروی بیرون کشیدن در نزدیکی مقدار حداکثر خود می‌باشد، حائز اهمیت است. هر چه این مقدار لغزش نسبت به طول مدفون اولیه بیشتر باشد، کارآمد بودن الیاف را بیان می‌کند. شکل ۵-۳۰ مقدار لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه‌ضلعی منتظم بین مقدار بیشینه و ۸۰، ۹۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه‌ی خود می‌باشد را نشان می‌دهد.



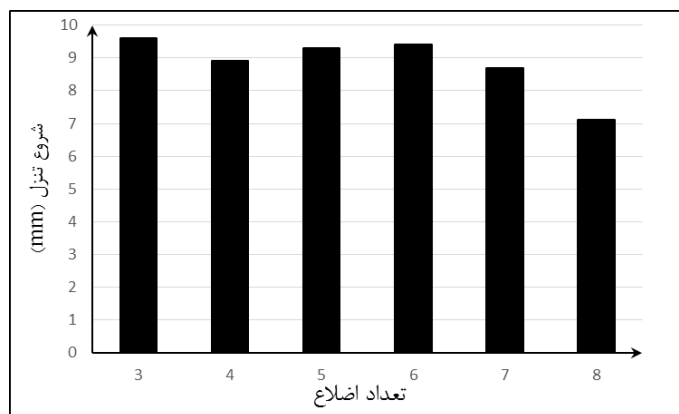
شکل ۵-۳۰: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقطع سه‌ضلعی منتظم و مقادیر ۸۰، ۹۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه

نسبت مقادیر لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود می‌باشند به ترتیب برابر ۲۶، ۲۱، ۱۸، ۲۴، ۲۱ و ۶ درصد است. همچنین نسبت مقادیر لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع منتظم سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشند به ترتیب برابر ۴۳، ۵۰، ۶۷، ۴۷، ۳۹ و ۱۳ درصد و درحالی‌که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع منتظم سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشند به ترتیب برابر ۵۹، ۷۰، ۷۲، ۶۴، ۵۰ و ۱۸ درصد می‌باشد. شکل ۵-۳۱ این مقادیر را به شکل نمودار بیان می‌کند. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقدار لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقاطع چندضلعی منتظم بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، ۲۰ درصد طول مدفون اولیه و درحالی‌که بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، ۴۵ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد. همچنین این مقدار درحالی‌که نیروی بیرون کشیدن بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، ۵۵ درصد است.



شکل ۵-۳۱: نمودار نسبت لغزش به طول مدفون اولیه بین نیروی بیرون کشیدن بیشینه و ۹۰ درصد، ۸۰ درصد و ۷۰ درصد مقدار بیشینه برحسب تعداد اضلاع در مقاطع چندضلعی منتظم.

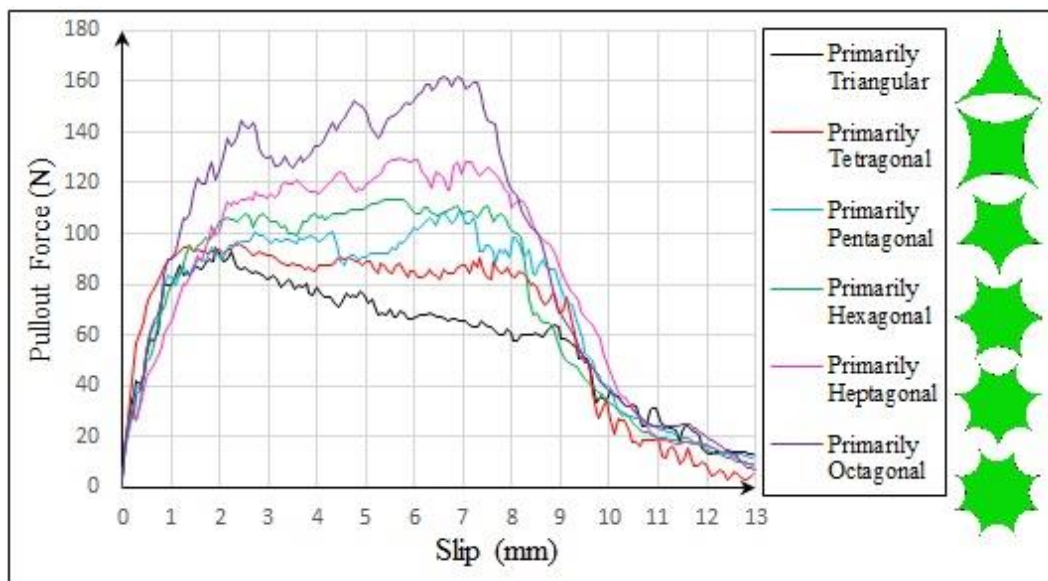
آزمایش بیرون کشیدن الیاف تابیده هنگامی به اتمام می‌رسد که یا الیاف به صورت کامل از ماتریس سیمانی بیرون کشیده شوند یا در لغزش‌های پایانی، مقداری از ماتریس سیمانی ترک خورده و کنده شود که به صورت مخروطی شکل می‌باشد. در لحظه‌ای که ماتریس سیمانی ترک می‌خورد؛ یک افت ناگهانی در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش مشاهده می‌شود. در ادامه با رشد ترک، قسمتی از ماتریس سیمانی کنده می‌شود و مقدار نیروی بیرون کشیدن به مقدار صفر می‌رسد. این پدیده مطلوب نمی‌باشد و هرچه در لغزش‌های بیشتر رخ دهد بهتر است. مقدار لغزش متناظر با افت و تنزل ناگهانی که در این پژوهش با عنوان "شروع تنزل" بیان شده است، در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه ضلعی تا هشت ضلعی منتظم به ترتیب برابر با $9/6$ ، $8/9$ ، $9/3$ ، $9/4$ ، $8/7$ و $7/1$ میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۵-۳۲ نشان داده شده است. به طور میانگین می‌توان عنوان نمود که شروع تنزل در نمودار نیرو-لغزش الیاف تابیده با مقاطع چندضلعی منتظم در لغزش $8/8$ میلی‌متر رخ می‌دهد.



شکل ۵-۳۲: نمودار شروع تنزل در مقاطع چندضلعی منتظم.

۵-۴-۲- الیاف با مقطع چندضلعی گون^۱

برای بررسی اثر تعداد اضلاع در الیاف تابیده فولادی با مقاطع چندضلعی گون بر روی رفتار بیرون کشیدن، ۶ مدل ساخته شد. این مدل‌ها همگی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر هستند. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در شکل سطح مقطع آن‌ها است که سه‌ضلعی گون، چهارضلعی گون، پنج‌ضلعی گون، شش‌ضلعی گون، هفت‌ضلعی گون و هشت‌ضلعی گون می‌باشند. شکل ۵-۳۳ نمودار نیروی بیرون کشیدن این الیاف بر حسب لغزش را نشان می‌دهد.

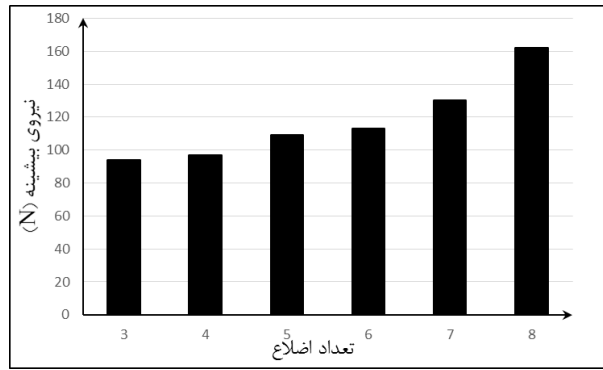


شکل ۵-۳۳: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چندضلعی گون.

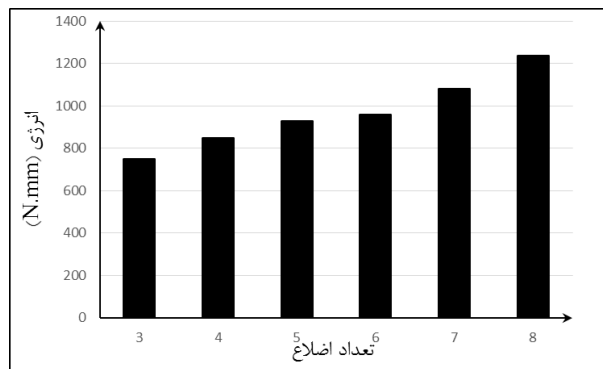
^۱ Primarily Polygonal

نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی حاصل از منحنی‌های نیرو-لغزش الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی تا هشت‌ضلعی منتظم به ترتیب برابر ۹۴، ۹۷، ۱۰۹، ۱۱۴، ۱۳۰ و ۱۶۲ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۳۴ قابل‌ملاحظه است، هرچه تعداد اضلاع بیشتر شود، نیروی بیرون کشیدن بیشینه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد اضلاع، به‌مانند مقاطع چندضلعی منتظم، توزیع تنش در ماتریس سیمانی یکنواخت‌تر می‌شود. یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش در ماتریس سیمانی منجر به کاهش تمرکز تنش در ماتریس سیمانی و خرابی کمتر ماتریس سیمانی اطراف الیاف شده و در نتیجه باعث افزایش نیروی بیرون کشیدن بیشینه می‌شود.

انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف تابیده برای مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون به ترتیب برابر با ۷۵۱، ۸۴۹، ۹۳۰، ۹۵۹، ۱۰۸۱ و ۱۲۳۹ نیوتن میلی‌متر است. شکل ۵-۳۵ انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف تابیده برای مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، افزایش تعداد اضلاع منجر به توزیع بهتر تنش در ماتریس سیمانی می‌شود و در نتیجه‌ی آن نیروی بیرون کشیدن افزایش می‌یابد. از آنجایی که انرژی بیرون کشیدن که سطح زیر منحنی نیرو-لغزش می‌باشد، افزایش تعداد اضلاع منجر به افزایش انرژی بیرون کشیدن می‌شود. همچنین هر چه تعداد اضلاع افزایش یابد، شکل مقاطع چندضلعی گون به دلیل داشتن گوشه‌های تیز، به سمت دایره متمایل نمی‌شود. از این‌رو برخلاف مقاطع چندضلعی منتظم، در تعداد اضلاع بالا کاهش انرژی بیرون کشیدن مشاهده نمی‌شود.

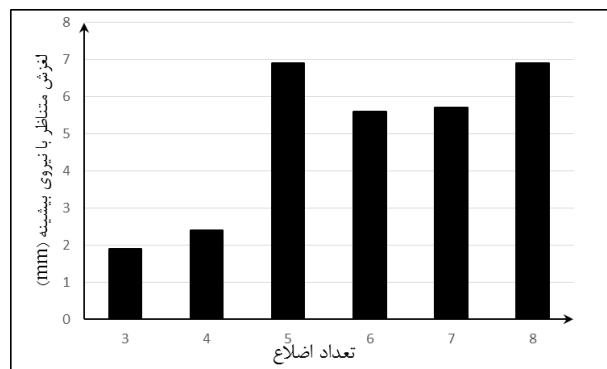


شکل ۳۴-۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف چندضلعی گون.



شکل ۳۵-۵: نمودار انرژی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف چندضلعی گون.

مقادیر لغزش متناظر با نیروی بیشینه‌ی الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون به ترتیب برابر با $1/9$ ، $2/4$ ، $6/9$ ، $5/6$ ، $5/7$ و $6/9$ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۳۶-۵ لغزش متناظر با نیروی بیشینه را نشان می‌دهد. هر چه تعداد اضلاع افزایش یابد، شکل مقاطع چندضلعی گون به دلیل داشتن گوشه‌های تیز، به سمت دایره متمایل نمی‌شود. از این رو برخلاف مقاطع چندضلعی منتظم، با افزایش تعداد اضلاع لغزش متناظر با نیروی بیشینه کاهش نمی‌یابد.



شکل ۵-۳۶: لغزش متناظر با نیروی پیشینه در مقاطع چندضلعی گون.

نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون بین مقدار پیشینه و ۹۰ درصد مقدار پیشینه خود می‌باشد به ترتیب برابر ۱۳، ۳۵، ۱۴، ۴۵، ۳۷ و ۲۰ درصد است. همچنین نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون بین مقدار پیشینه و ۸۰ درصد مقدار پیشینه می‌باشد به ترتیب برابر ۳۱، ۶۲، ۵۵، ۵۴، ۵۰ و ۳۷ درصد و درحالتی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون بین مقدار پیشینه و ۷۰ درصد مقدار پیشینه می‌باشد به ترتیب برابر ۵۰، ۶۹، ۶۵، ۵۷، ۵۷ و ۵۲ درصد می‌باشد. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقدار لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقاطع چندضلعی منتظم بین مقدار پیشینه و ۹۰ درصد مقدار پیشینه خود قرار دارد، ۳۰ درصد طول مدفون اولیه و درحالتی که بین مقدار پیشینه و ۸۰ درصد مقدار پیشینه خود قرار دارد، ۵۰ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد. همچنین این مقدار درحالتی که نیروی بیرون کشیدن بین مقدار پیشینه و ۷۰ درصد مقدار پیشینه خود قرار دارد، ۶۰ درصد است.

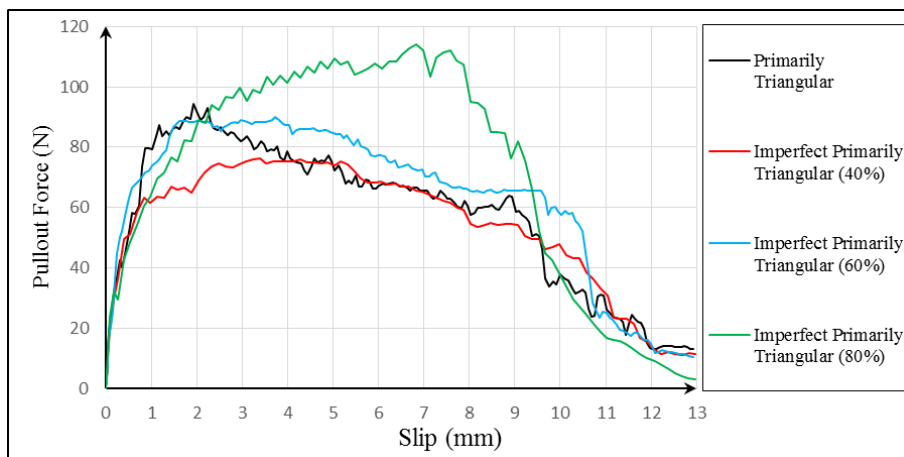
مقدار لغزش متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون تا هشت‌ضلعی گون به ترتیب برابر با ۸/۹، ۹/۱، ۸/۹، ۸/۲، ۸/۲ و ۷/۷ میلی‌متر

می باشد. به طور میانگین می توان عنوان نمود که شروع تنزل در نمودار نیرو-لغزش الیاف تابیده با مقاطع چندضلعی گون در لغزش ۸/۵ میلی متر رخ می دهد.

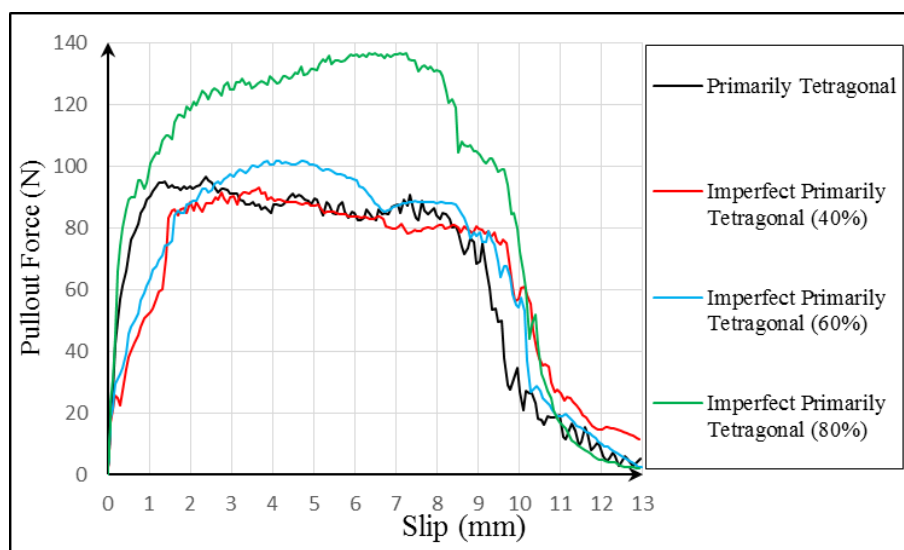
۵-۴-۳- الیاف با مقطع سه ضلعی و چهارضلعی گون ناقص^۱

برای بررسی اثر ناقص بودن در الیاف تابیده فولادی با مقاطع سه و چهارضلعی گون ناقص بر روی رفتار بیرون کشیدن، ۶ مدل ساخته شد. این مدل ها همگی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی متر، طول آزاد ۱ میلی متر، گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی متر و قطر معادل ۰/۵ میلی متر هستند. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می باشد. تفاوت این الیاف تنها در شکل سطح مقطع آنها است که سه ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی، سه ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی می باشند. شکل ۵-۳۷ به منظور مقایسه این الیاف با حالتی که ناقص نیستند، نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف سه ضلعی گون و سه ضلعی گون ناقص را بر حسب لغزش نشان می دهد. همچنین شکل ۵-۳۸ نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چهارضلعی گون و چهارضلعی گون ناقص را بر حسب لغزش نشان می دهد.

^۱ Imperfect Primarily Tetragonal

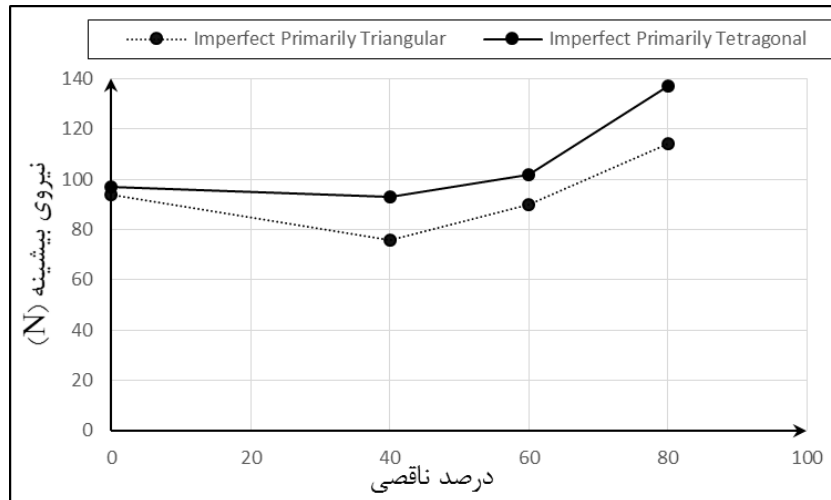


شکل ۵-۳۷: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف سه ضلعی گون و سه ضلعی گون ناقص بر حسب لغزش.



شکل ۵-۳۸: نمودار نیروی بیرون کشیدن الیاف چهارضلعی گون و چهارضلعی گون ناقص بر حسب لغزش.

نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف سه ضلعی گون، سه ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی، سه ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی چهارضلعی گون، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی به ترتیب برابر ۹۴، ۷۶، ۹۰، ۱۱۴، ۹۷، ۹۳، ۱۰۲ و ۱۳۷ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۳۹ مشاهده می‌شود، ناقص شدن الیاف سه و چهارضلعی گون، منجر به کاهش نیروی بیشینه می‌شود. باین حال با افزایش درصد ناقص بودن، نیروی بیشینه افزایش داشته است.



شکل ۵-۳۹: نیروی بیرون کشیدن بیشینه در مقاطع سه و چهارضلعی گون ناقص.

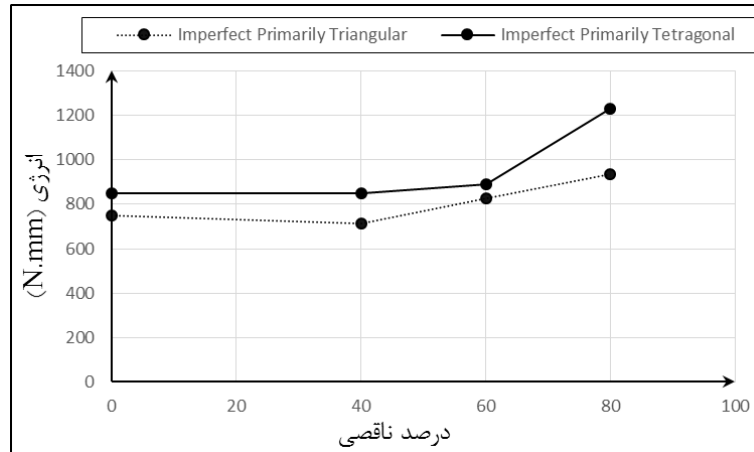
نسبت مؤثر ذاتی الیاف (FIER) سه و چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، تقریباً ۰/۷ نسبت مؤثر ذاتی الیاف سه و چهارضلعی گون می‌باشد. هنگامی که قطر معادل الیاف ثابت در نظر گرفته شود، بیشتر بودن FIER به معنی بیشتر بودن مساحت جانبی در طول واحد الیاف می‌باشد. بیشتر بودن سطح جانبی الیاف که در تماس با ماتریس سیمانی می‌باشد، منجر به بیشتر شدن نیروی بیرون کشیدن می‌شود. در نتیجه هر چه FIER الیاف بیشتر باشد، نیروی بیرون کشیدن آن نیز بیشتر می‌باشد.

هنگامی که درصد ناقص بودن کم است، به دلیل تیز گوشه بودن مقاطع چندضلعی گون ناقص، ناقص بودن تأثیر چندانی بر شکل سطح مقطع ندارد و تغییرات نیروی بیشینه وابسته به مقدار FIER می‌باشد. ولی با افزایش درصد ناقص بودن الیاف سه و چهارضلعی گون ناقص، شکل مقطع از حالت سه و چهارضلعی گون دور شده و اثر سه و چهارضلعی بودن مقطع به شدت کاهش می‌یابد. با افزایش درصد ناقص بودن، توزیع تنش در ماتریس سیمانی یکنواخت‌تر می‌باشد و منجر به افزایش نیروی بیرون کشیدن می‌شود.

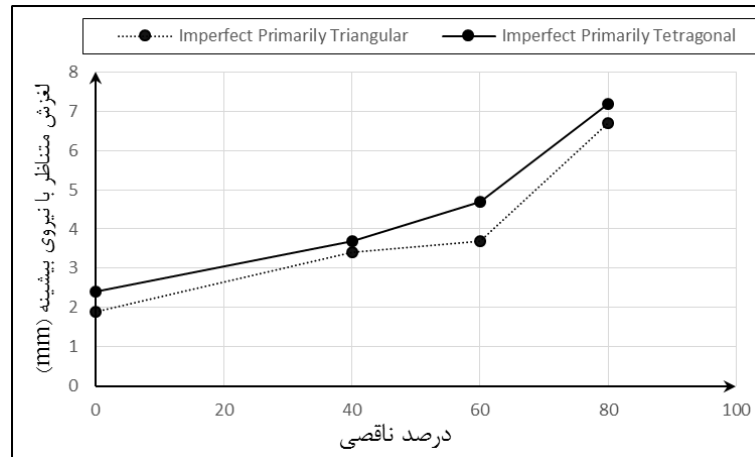
سطح زیر نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش، معرف انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف می‌باشد که مقادیر آن برای سه‌ضلعی گون، سه‌ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی،

سه‌ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی چهارضلعی گون، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی به ترتیب برابر ۷۵۱، ۷۱۲، ۸۲۷، ۹۳۶، ۸۴۹، ۸۵۱ و ۸۹۱ نیوتن میلی‌متر است. همان‌طور که در شکل ۵-۴۰ مشاهده می‌شود، افزایش درصد ناقصی منجر به افزایش انرژی بیرون کشیدن الیاف می‌شود.

مقادیر لغزش متناظر با نیروی بیشینه‌ی الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی گون، سه‌ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی و چهارضلعی گون، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی به ترتیب برابر ۱/۹، ۳/۴، ۳/۷، ۶/۸، ۲/۴، ۳/۴، ۳/۷ و ۷/۲ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۴۱ پیداست، با افزایش درصد ناقصی، لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۴۰: نمودار انرژی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف چندضلعی گون ناقص.



شکل ۵-۴۱: لغزش متناظر با نیروی بیشینه در مقاطع چندضلعی گون ناقص.

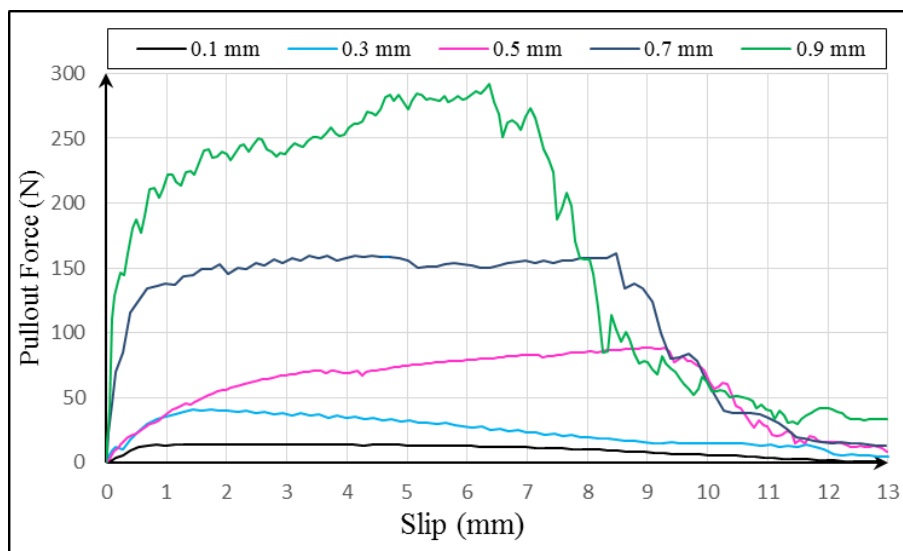
مقدار لغزش متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع سه‌ضلعی گون، سه‌ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی چهارضلعی گون، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی به ترتیب برابر ۸/۹، ۱۰، ۹/۶، ۷/۹، ۹/۱، ۹/۷، ۹/۳ و ۹/۶ میلی‌متر می‌باشد. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود که شروع تنزل نمودار نیرو-لغزش الیاف تابیده با مقاطع سه و چهارضلعی گون ناقص به ترتیب در لغزش ۹/۲ و ۹/۵ میلی‌متر رخ می‌دهد.

نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف با مقاطع سه‌ضلعی گون، سه‌ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی، سه‌ضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی، چهارضلعی گون، چهارضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی، چهارضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی و چهارضلعی گون ناقص ۸۰ درصدی بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود می‌باشد به ترتیب برابر ۱۳، ۳۱، ۳۴، ۳۱، ۳۵، ۴۱، ۳۲ و ۴۸ درصد است. این نسبت برای حالتی که نیروی بیرون کشیدن الیاف بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۳۱، ۵۴، ۴۸، ۴۷، ۶۲، ۶۵، ۵۶ و ۵۶ درصد؛ و برای حالتی که بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۵۰، ۶۷، ۷۲، ۵۷، ۶۹، ۶۷، ۶۴ و ۶۹ درصد است.

به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقادیر لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با مقاطع سه‌ضلعی گون ناقص بین مقدار بیشینه و ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، به ترتیب ۳۰، ۵۰ و ۶۵ درصد طول مدفون اولیه و برای الیاف چهارضلعی گون ناقص به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۶۵ درصد می‌باشد.

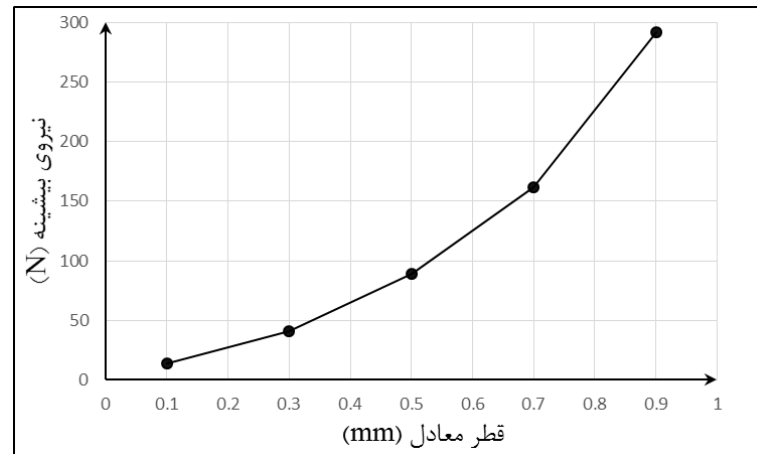
۵-۵- بررسی اثر قطر معادل

برای بررسی اثر قطر معادل الیاف تابیده فولادی ۵ مدل ساخته شد. این مدل‌ها همگی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر و گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر می‌باشند و شکل سطح مقطع این الیاف به‌صورت سه‌ضلعی منتظم است. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در قطر معادل آن‌ها است که اندازه آن‌ها ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۵-۴۲ نمودار نیروی بیرون کشیدن این الیاف را برحسب لغزش نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۲: نمودار نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش با قطرهای معادل مختلف.

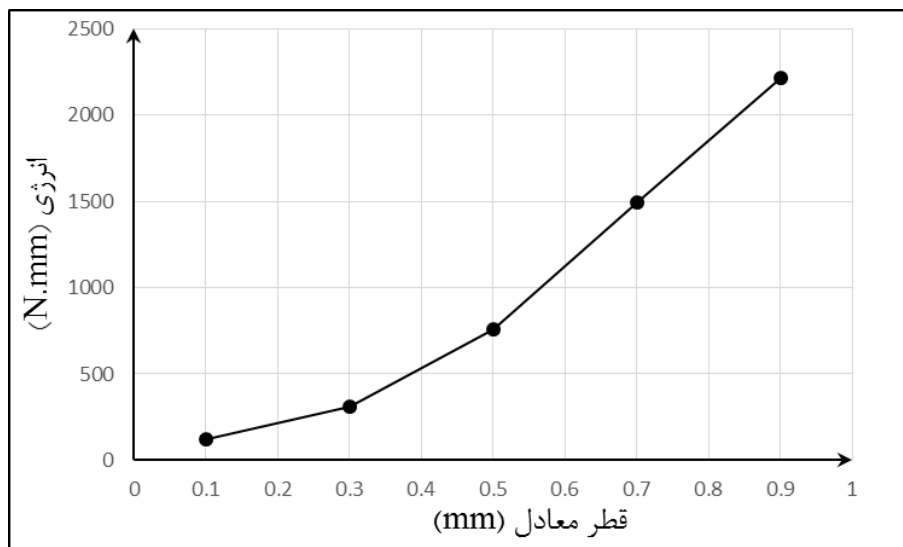
نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۴، ۴۱، ۸۹، ۱۶۲ و ۲۹۲ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۴۳ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر معادل الیاف، نیروی بیرون کشیدن افزایش می‌یابد. مساحت سطح مقطع الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر به ترتیب ۹، ۲۵، ۴۹ و ۸۱ برابر مساحت سطح مقطع الیاف تابیده با قطر معادل ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد ولی نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی آن‌ها به ترتیب ۳، ۶، ۱۲ و ۲۱ برابر نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده با قطر معادل ۰/۱ میلی‌متر است. به عبارت دیگر، تنش نرمال بیشینه در سطح مقطع الیاف با قطر معادل کمتر، بیشتر است. در نتیجه، هر چه قطر معادل الیاف کمتر باشد، بیشتر می‌توان از ظرفیت مقطع استفاده نمود و الیاف با قطر معادل کوچک‌تر، کارایی بیشتری دارند.



شکل ۵-۴۳: نمودار نیروی بیشینه بر حسب قطر معادل.

انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۲۵، ۳۱۱، ۷۶۰، ۱۴۹۴ و ۲۲۱۴ نیوتن میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۴۴ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر معادل الیاف، انرژی بیرون کشیدن افزایش می‌یابد.

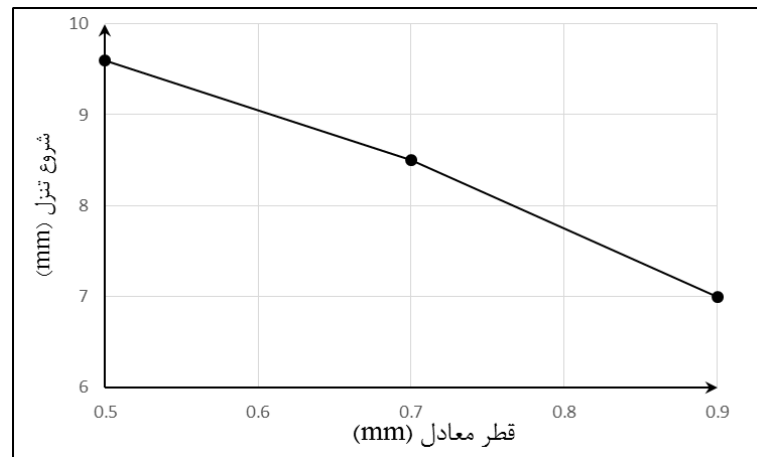
رشد ترک در عضوهای بتنی با باز شدن و بیشتر شدن عرض ترک همراه است. حال اگر این اعضا دارای الیاف باشند، بیشتر شدن عرض ترک مستلزم بیرون کشیده شدن الیاف از دو وجه ترک می‌باشد. انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف به‌مراتب بیشتر از حالتی است که در عضو بتنی، الیافی وجود ندارد. مساحت سطح مقطع الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر به ترتیب ۹، ۲۵، ۴۹ و ۸۱ برابر مساحت سطح مقطع الیاف تابیده با قطر معادل ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد ولی انرژی بیرون کشیدن آن‌ها به ترتیب ۲/۵، ۶، ۱۲ و ۱۸ برابر انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده با قطر معادل ۰/۱ میلی‌متر است. به‌عبارت‌دیگر، انرژی بیرون کشیدن الیاف با قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر برابر است با انرژی بیرون کشیدن ۶ عدد الیاف با قطر معادل ۰/۱ میلی‌متر. در صورتی که مساحت آن ۲۵ برابر می‌باشد. در نتیجه، هر چه قطر معادل الیاف کمتر باشد، بیشتر می‌توان از ظرفیت مقطع استفاده نمود و الیاف با قطر معادل کوچک‌تر، کارایی بهتری دارند.



شکل ۵-۴۴: نمودار انرژی بیرون کشیدن بر حسب قطر معادل.

مقادیر متناظر با نیروی بیشینه‌ی الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر ۲/۶، ۱/۷، ۹، ۸/۵ و ۶/۴ میلی‌متر می‌باشد. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود که لغزش متناظر با نیروی بیشینه‌ی الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر، ۵/۶ میلی‌متر می‌باشد.

همانطور که پیش‌تر بیان شد، پدیده‌ی کنده شدن ماتریس سیمانی در لغزش‌های پایانی آزمایش بیرون کشیدن که به‌صورت افت ناگهانی در نمودار نیرو-لغزش ظاهر می‌شود، مطلوب نمی‌باشد. این پدیده در الیاف با قطر معادل ۰/۱ و ۰/۳ میلی‌متر دیده نشد. از این‌رو، استفاده از الیاف با قطر معادل کوچک‌تر توصیه می‌شود. شکل ۵-۴ کاهش مقادیر لغزش متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده با افزایش قطر معادل را نشان می‌دهد. این مقادیر برای قطرهای معادل ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ به ترتیب برابر ۹/۶، ۸/۵ و ۷ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۵-۴: نمودار شروع تنزل برحسب قطر معادل.

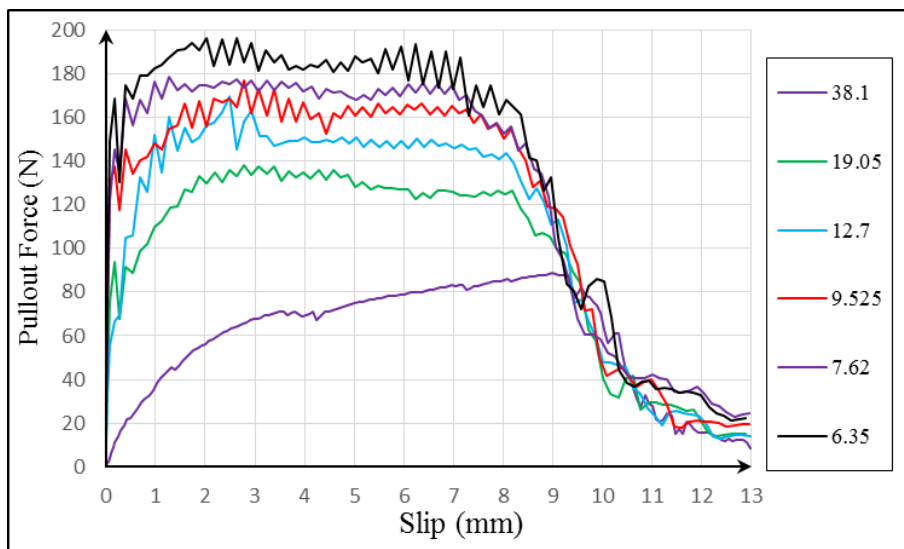
نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود می‌باشد به ترتیب برابر ۴۳، ۱۷، ۲۶، ۵۶ و ۲۰ درصد است. این نسبت برای حالتی که نیروی بیرون کشیدن الیاف بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۵۴، ۳۱، ۴۳، ۶۶ و ۴۶ درصد؛ و برای حالتی که بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۶۱، ۴۱، ۵۹، ۶۹ و ۵۴ درصد است. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقادیر لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با قطرهای معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۸۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، به ترتیب ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد.

۵-۶- بررسی اثر گام تابیدگی

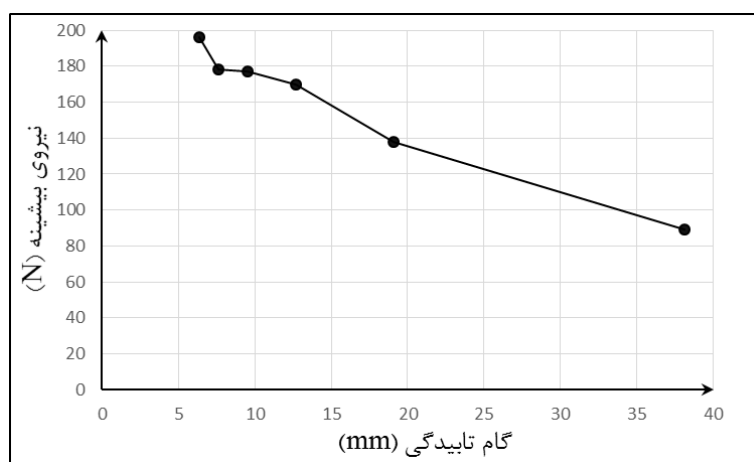
برای بررسی اثر گام تابیدگی الیاف تابیده فولادی ۶ مدل ساخته شد. این مدل‌ها همگی دارای طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر می‌باشند و شکل سطح مقطع این الیاف به صورت سه‌ضلعی منتظم است. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در گام تابیدگی آن‌ها است که اندازه آن‌ها ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۵-۴۶ نمودار نیروی بیرون کشیدن این الیاف را برحسب لغزش نشان می‌دهد.

هنگامی که الیاف تابیده‌ی فولادی از ماتریس سیمانی بیرون کشیده می‌شوند، در سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی دو نوع تنش از سطح الیاف به سطح ماتریس سیمانی منتقل می‌شود. این دو تنش، تنش فشاری ناشی از باز شدن تابیدگی‌های الیاف و تنش برشی ناشی از اصطکاک و لغزش الیاف بر روی سطح ماتریس سیمانی می‌باشد. از این‌رو، نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده شامل دو جزء نیروی بیرون کشیدن مکانیکی و اصطکاکی می‌شود. کاهش گام تابیدگی یا به‌عبارت‌دیگر افزایش تابیدگی الیاف

تابیده، افزایش نیروی فشاری در سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی را به دنبال دارد. افزایش نیروی فشاری در سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی منجر به افزایش نیروی بیرون کشیدن مکانیکی الیاف می‌شود. از طرفی، نیروی بیرون کشیدن اصطکاکی وابسته به ضریب اصطکاک و نیروی فشاری در سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی دارد. ضریب اصطکاک ثابت می‌باشد. در نتیجه، افزایش نیروی فشاری در سطح تماس بین الیاف و ماتریس باعث افزایش نیروی بیرون کشیدن اصطکاکی می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی سوجیوورا کول [۹] نشان داده است، در گام‌های تابیدگی کمتر از ۹/۵۲۵ میلی‌متر، تنش فشاری در سطح تماس مشترک الیاف و ماتریس سیمانی به حداکثر مقاومت فشاری ماتریس سیمانی می‌رسد و نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده افزایش چندانی نداشته است. نیروی بیرون کشیدن پیشینه‌ی الیاف تابیده با گام تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر به ترتیب برابر ۸۹، ۱۳۸، ۱۷۰، ۱۷۷، ۱۷۸ و ۱۹۶ نیوتن می‌باشد که در شکل ۵-۴۷ نشان داده شده است.

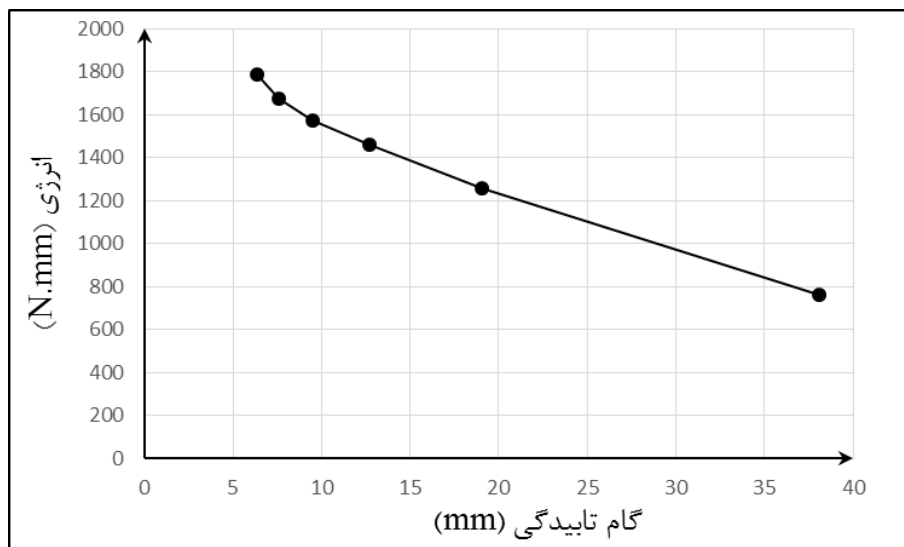


شکل ۴۶-۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن بر حسب لغزش با تابیدگی‌های مختلف.



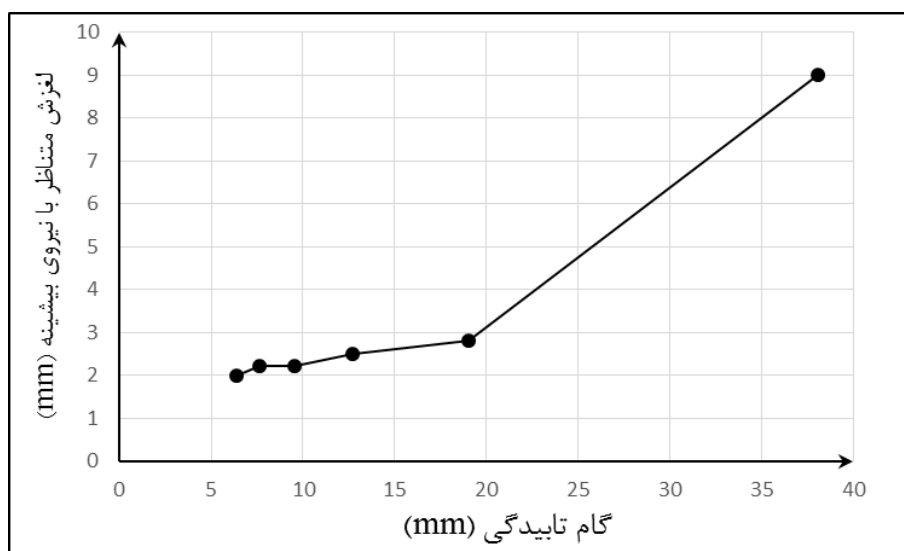
شکل ۴۷-۵: نمودار نیروی بیشینه بر حسب گام تابیدگی.

شکل ۴۸-۵ مقادیر انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف تابیده از ماتریس سیمانی را در گام‌های تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. این مقادیر به ترتیب برابر با ۷۶۰، ۱۲۵۹، ۱۴۳۶، ۱۵۷۷، ۱۶۷۴ و ۱۷۸۹ نیوتن میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴۸-۵ مشاهده می‌شود، با کاهش گام تابیدگی، انرژی بیرون کشیدن تقریباً به صورت تابعی خطی افزایش یافته است.



شکل ۵-۴۸: نمودار انرژی بیرون کشیدن بر حسب گام تابیدگی.

مقادیر لغزش متناظر با نیروی بیشینه‌ی الیاف تابیده با گام‌های تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۹، ۲/۸، ۲/۵، ۲/۲، ۲/۲ و ۲ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۴۹ پیداست، با افزایش گام تابیدگی، لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه افزایش می‌یابد.



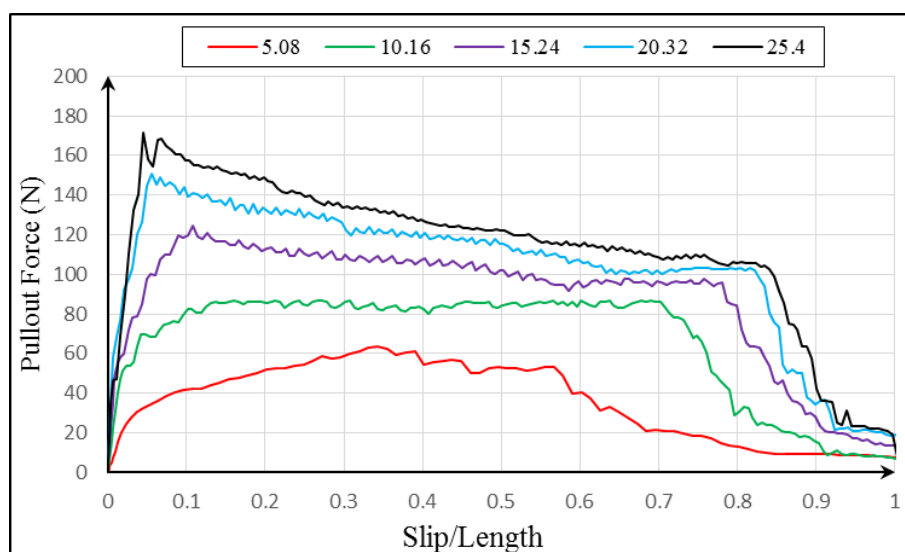
شکل ۵-۴۹: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیشینه بر حسب گام تابیدگی.

مقادیر لغزش متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تابیده برای گام‌های تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۸/۲، ۸/۱، ۸/۲، ۹/۶، ۸/۵ و ۸ میلی‌متر و به‌طور میانگین برابر ۸/۴ میلی‌متر می‌باشد.

نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با گام‌های تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود می‌باشد به ترتیب برابر ۲۶، ۵۲، ۱۳، ۴۸، ۵۶ و ۵۱ درصد است. این نسبت برای حالتی که نیروی بیرون کشیدن الیاف بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۴۳، ۶۰، ۵۷، ۶۳، ۶۵ و ۶۴ درصد؛ و برای حالتی که بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۵۹، ۶۸، ۶۴، ۶۹، ۶۹ و ۶۷ درصد است. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقادیر لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با گام‌های تابیدگی ۳۸/۱، ۱۹/۰۵، ۱۲/۷، ۹/۵۲۵، ۷/۶۲ و ۶/۳۵ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۶۵ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد.

۵-۷- بررسی اثر طول مدفون

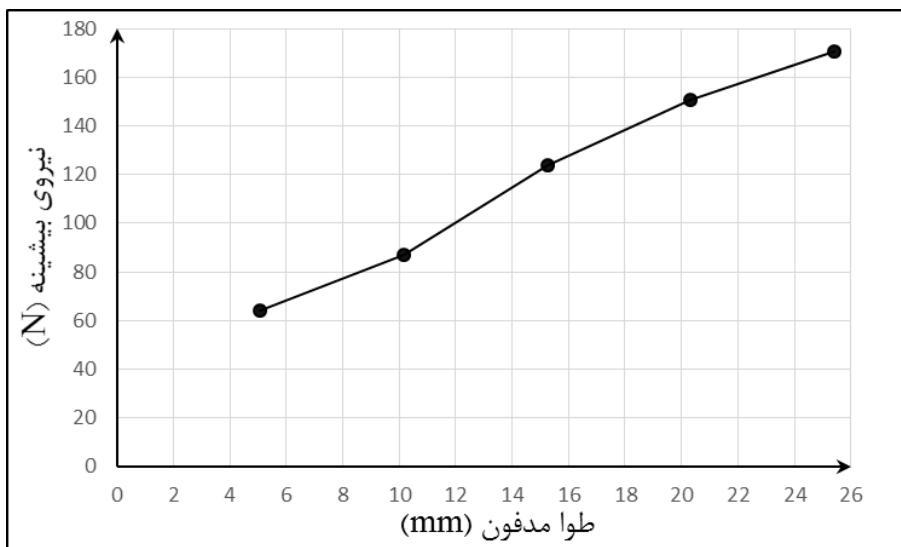
برای بررسی اثر طول مدفون الیاف تابیده فولادی ۵ مدل ساخته شد. این مدل‌ها همگی دارای گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، طول آزاد ۱ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر می‌باشند و شکل سطح مقطع این الیاف به‌صورت سه‌ضلعی منتظم است. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد. تفاوت این الیاف تنها در آن‌ها است که اندازه آن‌ها ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۵-۵ نمودار نیروی بیرون کشیدن این الیاف را برحسب نسبت لغزش به طول مدفون نشان می‌دهد.



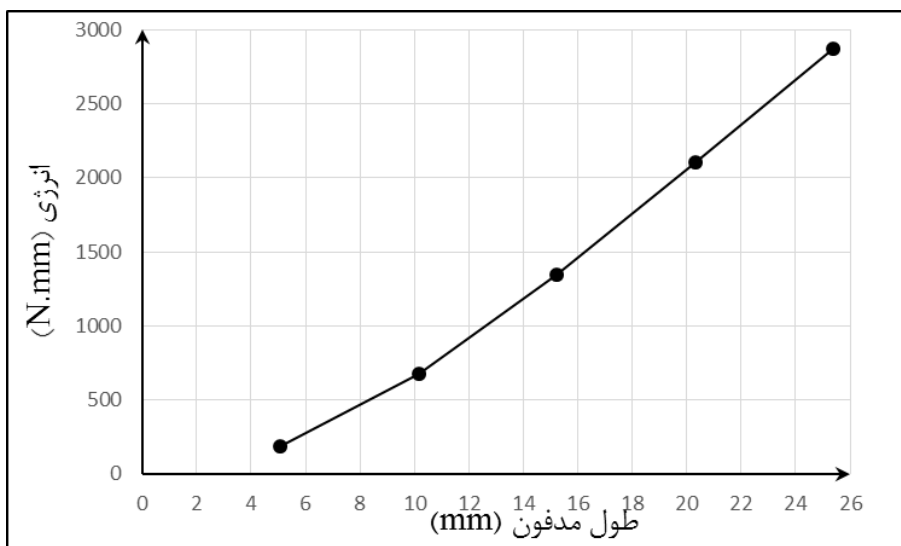
شکل ۵-۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن حسب نسبت لغزش به طول مدفون.

افزایش طول مدفون الیاف، افزایش سطح جانبی الیاف را به همراه دارد. در نتیجه سطح تماس الیاف و ماتریس سیمانی افزایش می‌یابد. افزایش سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی علاوه بر بالا بردن ظرفیت باربری، تنش برشی ایجاد در سطح تماس را نیز کاهش می‌دهد. شکل ۵-۵ نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده با طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر ۶۴، ۸۷، ۱۲۴، ۱۵۱ و ۱۷۱ نیوتن می‌باشد. مطابق با شکل ۵-۵، با افزایش طول مدفون، نیروی بیرون کشیدن بیشینه به صورت تابعی خطی افزایش می‌یابد.

شکل ۵-۵۲ انرژی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده با طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر ۱۸۴، ۶۷۷، ۱۳۴۲، ۲۱۰۴ و ۲۸۷۲ نیوتن میلی‌متر می‌باشد. به مانند نیروی بیرون کشیدن بیشینه، افزایش طول مدفون، منجر به افزایش انرژی بیرون کشیدن شده است که به صورت تابعی خطی می‌باشد.

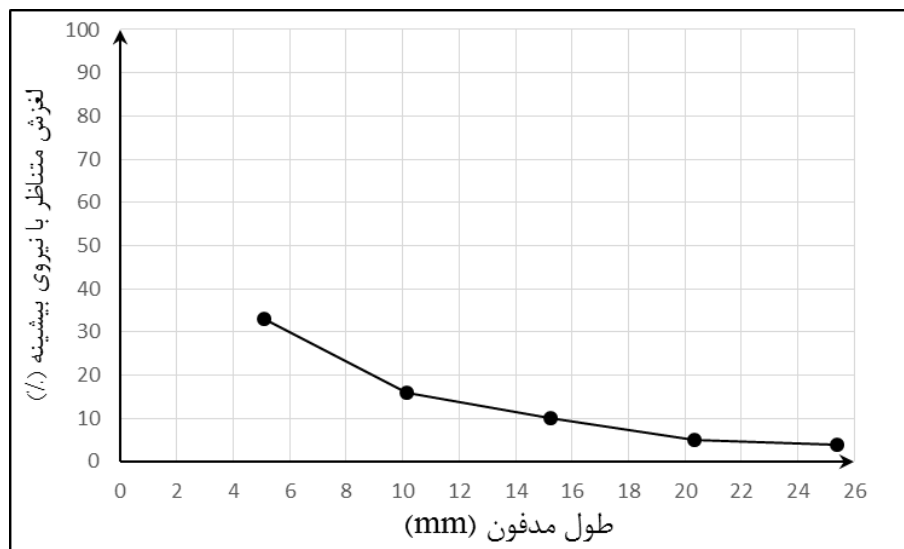


شکل ۵-۵۱: نمودار نیروی بیرون کشیدن بیشینه برحسب طول مدفون.



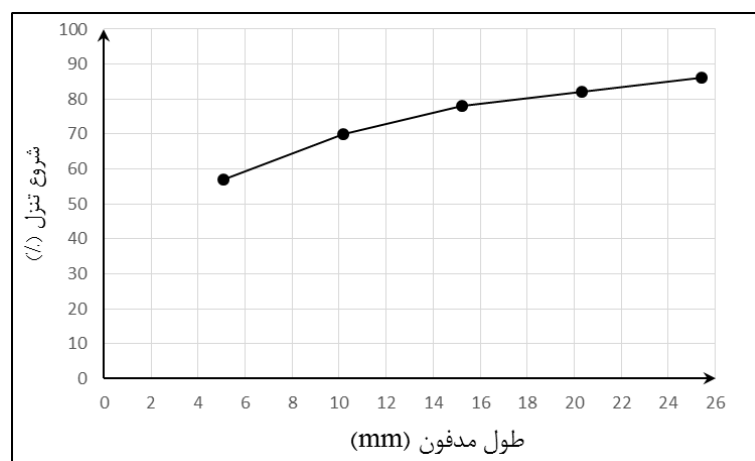
شکل ۵-۵۲: نمودار انرژی بیرون کشیدن برحسب طول مدفون.

مقادیر لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده با طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۳۳، ۱۶، ۱۰، ۵ و ۴ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۵۳ پیداست، با افزایش طول مدفون، نسبت لغزش به طول مدفون اولیه‌ی متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۳: نمودار لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه طول مدفون.

شکل ۵-۴ نسبت مقادیر لغزش به طول مدفون اولیه‌ی متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تاییده را نشان می‌دهد. این مقادیر برای طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۵۷، ۷۰، ۷۸، ۸۲ و ۸۴ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد. افزایش طول مدفون، افزایش نسبت مقادیر لغزش به طول مدفون اولیه‌ی متناظر با شروع تنزل در نمودار نیروی بیرون کشیدن-لغزش الیاف تاییده را در پی دارد.



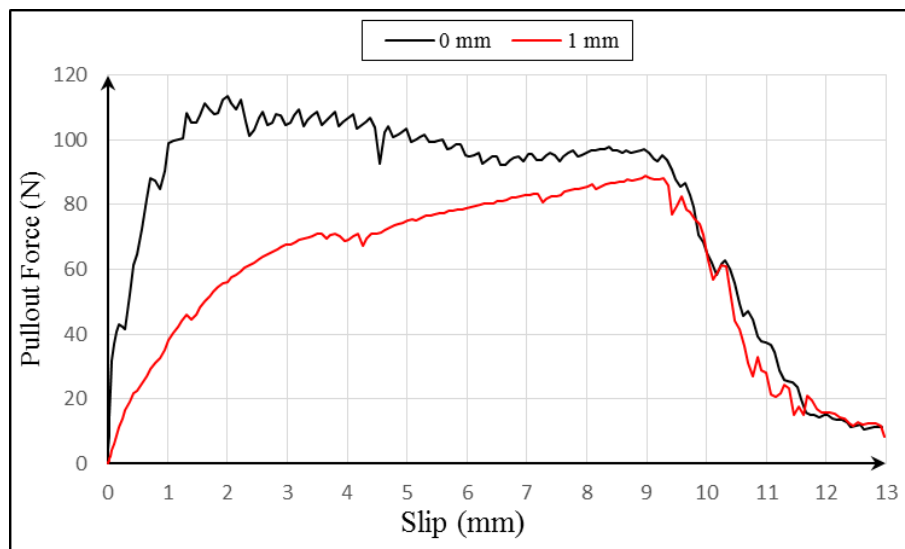
شکل ۵-۴: نمودار نسبت لغزش به طول مدفون اولیه‌ی متناظر با شروع تنزل برحسب طول مدفون.

نسبت مقدار لغزش به طول مدفون اولیه‌ای که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۹۰ درصد مقدار بیشینه خود می‌باشد به ترتیب برابر ۱۳، ۶۱، ۱۴، ۱۲ و ۹ درصد است. این نسبت برای حالتی که نیروی بیرون کشیدن الیاف بین مقدار بیشینه و ۸۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۳۷، ۶۷، ۴۸، ۳۵ و ۲۵ درصد؛ و برای حالتی که بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد، به ترتیب برابر ۴۵، ۷۲، ۷۵، ۵۸ و ۵۱ درصد است. به‌طور میانگین می‌توان عنوان نمود، مقادیر لغزشی که نیروی بیرون کشیدن الیاف تابیده با طول‌های مدفون ۵/۰۸، ۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴، ۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ میلی‌متر بین مقدار بیشینه و ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد مقدار بیشینه خود قرار دارد، به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد طول مدفون اولیه می‌باشد.

۵-۸- بررسی اثر طول آزاد

هنگامی که یک عضو بتنی مسلح به الیاف، تحت تنش کششی قرار می‌گیرد و شروع به ترک خوردن می‌کند، ابعاد عرض ترک صفر می‌باشد. در این لحظه الیاف هنوز بیرون کشیده نمی‌شود. ولی با افزایش بار، ترک شروع به رشد کردن می‌کند. این رشد و گسترش ترک مستلزم افزایش عرض ترک می‌باشد؛ بنابراین از لحظه‌ی شروع بیرون کشیده شدن الیاف از دو وجه ترک، طول آزاد صفر میلی‌متر می‌باشد. در آزمایش‌های بیرون کشیدن الیاف، تلاش بر این است که طول آزاد برابر صفر قرار گیرد ولی معمولاً به‌طور ناخواسته طول آزاد مقادیری بین صفر تا ۳ میلی‌متر را دارد و جزئی از خطاهای آزمایشگاهی به حساب می‌آید. از این‌رو برای بررسی اثر طول آزاد بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده و شبیه‌سازی واقعی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی، دو مدل ساخته شد که الیاف تابیده مقطع سه‌ضلعی منتظم، دارای گام تابیدگی ۳۸/۱ میلی‌متر، طول مدفون ۱۲/۷ میلی‌متر و قطر معادل ۰/۵ میلی‌متر می‌باشند. مقاومت فشاری ماتریس سیمانی و کششی الیاف به ترتیب ۴۴ و ۲۴۱۲ مگا پاسکال می‌باشد.

شکل ۵-۵۵ نمودار نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش الیاف تابیده‌ی فولادی به طول آزاد صفر و ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد. نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی آن‌ها به ترتیب برابر با ۱۱۴ و ۸۹ نیوتن و انرژی بیرون کشیدن آن‌ها به ترتیب برابر با ۱۰۴۵ و ۷۶۰ نیوتن میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶۵-۵۹ نیز مشاهده می‌شود، درحالتی که طول آزاد برابر صفر میلی‌متر است، نسبت به حالتی که طول آزاد صفر میلی‌متر می‌باشد، نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن به ترتیب ۲۸ و ۳۷/۵ درصد افزایش داشته است.



شکل ۵-۵۵: نمودار نیروی بیرون کشیدن برحسب لغزش با طول آزاد صفر و ۱ میلی‌متر.

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به شرایط، خصوصیات و فرضیات در نظر گرفته شده در این پژوهش، نتایج حاصل عبارتند

از:

(۱) نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع چندضلعی منتظم، با افزایش تعداد اضلاع مقطع از چهار ضلع به هشت ضلع، نسبت به سه‌ضلعی منتظم ۱۰ تا ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش در مقاطع چندضلعی‌گون ۵ تا ۷۰ درصد می‌باشد. همچنین افزایش درصد ناقصی در الیاف سه‌ضلعی‌گون ناقص و چهارضلعی‌گون ناقص موجب افزایش نیروی بیرون کشیدن بیشینه تا ۵۰ درصد می‌شود.

(۲) انرژی بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی با مقاطع چندضلعی منتظم، با افزایش تعداد اضلاع مقطع از چهار ضلع به هشت ضلع، نسبت به سه‌ضلعی منتظم ۱۰ تا ۸۰ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش در مقاطع چندضلعی‌گون ۱۵ تا ۶۵ درصد می‌باشد. همچنین افزایش درصد ناقصی در الیاف سه‌ضلعی‌گون ناقص و چهارضلعی‌گون ناقص به ترتیب موجب افزایش انرژی بیرون کشیدن تا ۳۰ و ۴۵ درصد می‌شود.

(۳) لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه در الیاف چندضلعی منتظم با افزایش تعداد اضلاع مقطع از سه ضلع به هشت ضلع، کاهش و در الیاف چندضلعی‌گون افزایش می‌یابد. لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه در الیاف سه‌ضلعی‌گون ناقص و چهارضلعی‌گون ناقص، با افزایش درصد ناقصی، افزایش می‌یابد.

(۴) افزایش قطر معادل موجب افزایش چشم‌گیر نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن می‌شود. به‌طوری‌که وقتی قطر معادل الیاف ۳ و ۹ برابر می‌شود نیروی بیرون کشیدن بیشینه ۳ و ۲۱ برابر و انرژی بیرون کشیدن ۲/۵ و ۱۸ برابر می‌شود. ولی تنش نرمال بیشینه در سطح مقطع کاهش

می‌یابد. در واقع هر چه قطر معادل الیاف کمتر باشد، کارایی مقطع بالاتر می‌رود. همچنین افزایش قطر معادل الیاف، کاهش لغزش متناظر با شروع تنزل را به همراه دارد.

۵) با کاهش گام تابیدگی، نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن الیاف افزایش می‌یابد، به طوری که با $0/5$ و $0/17$ برابر شدن گام تابیدگی، نیروی بیرون کشیدن بیشینه $1/5$ و $2/2$ برابر و انرژی بیرون کشیدن $1/6$ و $2/3$ برابر می‌شود. ولی کاهش گام تابیدگی موجب کاهش لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه می‌شود.

۶) افزایش طول مدفون الیاف، افزایش نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن را به دنبال دارد که تقریباً به صورت تابعی خطی می‌باشد. هنگامی که طول مدفون الیاف 2 و 5 برابر می‌شود، نیروی بیرون کشیدن بیشینه $1/4$ و $2/7$ برابر و انرژی بیرون کشیدن $3/7$ و $15/6$ برابر می‌شود. از دیگر اثرهای افزایش طول مدفون الیاف می‌توان به کاهش لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه و افزایش لغزش متناظر با شروع تنزل اشاره نمود.

۷) پارامترهای مؤثر بر رفتار شبه پلاستیک یا سخت‌شدگی لغزش شامل کاهش طول مدفون، افزایش گام تابیدگی، افزایش قطر معادل، افزایش درصد ناقصی الیاف چندضلعی گون ناقص، افزایش تعداد اضلاع چندضلعی گون و چندضلعی منتظم می‌شود که تمامی این پارامترها موجب بهبود رفتار شبه پلاستیک یا رفتار سخت‌شدگی لغزش می‌شوند.

۸) نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن الیاف بدون طول آزاد که به منظور شبیه‌سازی رفتار الیاف تابیده‌ی فولادی در صفحه ترک می‌باشد، نسبت به حالتی که طول آزاد الیاف 1 میلی‌متر می‌باشد، به ترتیب 30 و 40 درصد افزایش دارد که دلیل آن نزدیک شدن صفحه‌ی بارگذاری به ماتریس سیمانی می‌باشد.

۹) یکی از رفتارهای منحصربه‌فرد الیاف تابیده این است که در نیروی بیرون کشیدن را در طول ۷۰ تا ۹۰ درصد لغزش، نزدیک مقدار بیشینه‌ی خود نگه می‌دارد. در مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش مشاهده گردید که به‌طور میانگین نیروی بیرون کشیدن در طول ۶۱ درصد کل لغزش، بین مقدار بیشینه و ۷۰ درصد مقدار بیشینه‌ی خود قرار دارد. این مقدار برای الیاف چندضلعی منتظم، چندضلعی‌گون، سه‌ضلعی‌گون ناقص و چهارضلعی‌گون ناقص به ترتیب برابر ۵۶، ۵۸، ۶۵ و ۶۷ درصد می‌باشد که عملکرد بهتر الیاف چهارضلعی‌گون ناقص را در این زمینه بیان می‌کند.

۱۰) در الیافی که شکل سطح مقطع آن‌ها منجر به خرابی کمتر ماتریس سیمانی می‌شود، بهبود رفتار بیرون کشیدن الیاف را به همراه دارد. در واقع می‌توان تنها با انتخاب صحیح و دقیق شکل سطح مقطع و بدون تغییر در جنس مصالح و دیگر خصوصیات هندسی الیاف، به رفتار دلخواه رسید. این رفتار دلخواه می‌تواند افزایش نیروی بیرون کشیدن بیشینه، افزایش انرژی بیرون کشیدن، افزایش لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه، افزایش لغزش متناظر با شروع تنزل یا عدم وقوع پدیده‌ی کنده شدن ماتریس سیمانی و بهبود رفتار سخت‌شدگی لغزش باشد. در صورتی که نیروی بیرون کشیدن بیشینه حائز اهمیت باشد، الیاف تابیده‌ی فولادی با مقطع هشت‌ضلعی منتظم که نیروی بیرون کشیدن بیشینه‌ی آن ۱۸۵ نیوتن می‌باشد، پیشنهاد می‌شود. در صورتی که انرژی بیرون کشیدن مورد نظر باشد، الیاف تابیده‌ی فولادی با مقطع هفت‌ضلعی منتظم که مقدار انرژی آن ۱۳۶۰ نیوتن میلی‌متر است، توصیه می‌شود. اگر لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه اهمیت داشته باشد، الیاف تابیده‌ی فولادی با مقطع سه‌ضلعی منتظم که مقدار لغزش آن ۹ میلی‌متر است، پیشنهاد می‌شود. در صورتی که لغزش متناظر با شروع تنزل از اهمیت بالایی برخوردار باشد، الیاف تابیده‌ی فولادی با مقطع سه‌ضلعی‌گون ناقص ۴۰ درصدی با مقدار لغزش متناظر با شروع تنزل ۱۰ میلی‌متر توصیه می‌شود. ولی

الیاف تابیده‌ی فولادی با مقطع هفت‌ضلعی منتظم به‌طور میانگین رفتار خوبی از لحاظ نیروی بیرون کشیدن بیشینه، انرژی بیرون کشیدن، لغزش متناظر با نیروی بیرون کشیدن بیشینه، شروع تنزل و نزدیک بودن مقادیر نیروی بیرون کشیدن به مقدار بیشینه‌ی خود دارد. همچنین رفتار سخت‌شدگی لغزش که بسیار اهمیت دارد، در این الیاف مشاهده می‌شود.

جدول ۶-۱: شکل سطح مقطع پیشنهادی

رفتار دلخواه	شکل سطح مقطع پیشنهادی
نیروی بیرون کشیدن بیشینه	هشت‌ضلعی منتظم
انرژی بیرون کشیدن بیشینه	هفت‌ضلعی منتظم
لغزش متناظر با نیروی بیشینه	سه‌ضلعی منتظم
لغزش متناظر با شروع تنزل	سه‌ضلعی گون ناقص ۴۰ درصدی
در مجموع	هفت‌ضلعی منتظم

(۱۱) در صورت ایجاد شرایط تماسی بهتر بین سطوح الیاف و ماتریس سیمانی که منجر به افزایش ضریب اصطکاک بین سطوح شود، می‌توان بسته به شرایط، شاهد افزایش چشم‌گیر نیروی بیرون کشیدن بیشینه و انرژی بیرون کشیدن بود.

پژوهش، نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از:

(۱) مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی توسط مدل خرابی پلاستیک بتن.

۲) مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ی فولادی چندضلعی منظم، چندضلعی گون، سه‌ضلعی گون ناقص و چهارضلعی گون ناقص.

۳) بررسی اثر قطر معادل الیاف تابیده بر روی رفتار بیرون کشیدن به صورت عددی.

در انتها پیشنهادهایی به منظور درک بهتر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده برای علاقه‌مندان در این زمینه، ارائه می‌گردد:

۱) بررسی اثر خصوصیات سطح تماس بین الیاف و ماتریس سیمانی بر روی رفتار بیرون کشیدن.

۲) بررسی اثر مقاومت ماتریس سیمانی و الیاف تابیده بر روی رفتار بیرون کشیدن

۳) بررسی اثر نرخ بارگذاری بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده در شرایطی که رفتار مصالح به نرخ بارگذاری وابسته باشند.

۴) بررسی اثر مقاومت ماتریس سیمانی بر روی رفتار بیرون کشیدن الیاف دوتایی و گروهی تابیده‌ی فولادی.

۵) مدل‌سازی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده‌ای که انتهای آن قلاب‌دار باشد.

۶) بررسی رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده غیر فولادی مانند بازالت.

پیوست

برای استخراج خصوصیات هندسی مقاطع چندضلعی منتظم، شکل پ-۱ که به‌طور نمونه مقطع الیاف سه‌ضلعی منتظم را نشان می‌دهد، ارائه شده است که توسط یک دایره احاطه شده می‌باشد و اضلاع آن به طول d است. همان‌طور که در شکل پ-۱ مشاهده می‌شود، مساحت هر چندضلعی منتظم برابر است با مساحت مثلث‌های الساقینی که زاویه رأس آن‌ها α رادیان، قاعده آن‌ها d ، ارتفاع آن‌ها h و تعداد آن‌ها n می‌باشد. با توجه به شکل پ-۱، روابط α ، θ و h به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha = \frac{2\pi}{n} \quad (\text{پ-۱})$$

$$\theta = \pi - \alpha = \frac{n-2}{n} \pi \quad (\text{پ-۲})$$

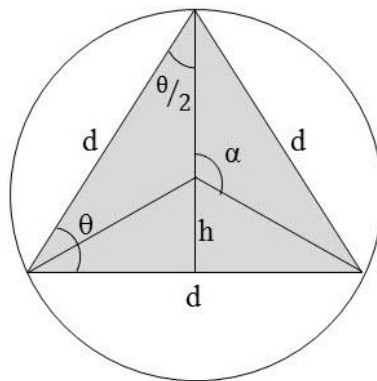
$$h = \frac{d}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{پ-۳})$$

و در نتیجه مساحت سطح هاشورخورده در شکل پ-۱ از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$A = n \times \frac{hd}{2} = \frac{nd^2}{4} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{پ-۴})$$

که n تعداد اضلاع چندضلعی منتظم می‌باشد. رابطه‌ی بین طول اضلاع چندضلعی منتظم (d) و قطر

معادل مقطع (d_e) به‌صورت زیر می‌باشد:



شکل پ-۱: مقطع سه‌ضلعی منتظم.

$$A = n \times \frac{hd}{2} = \frac{nd^2}{4} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\pi d_e^2}{4} \Rightarrow \frac{d_e}{d} = \sqrt{\frac{\tan(\theta/2)}{\alpha/2}} \quad (\text{پ-۵})$$

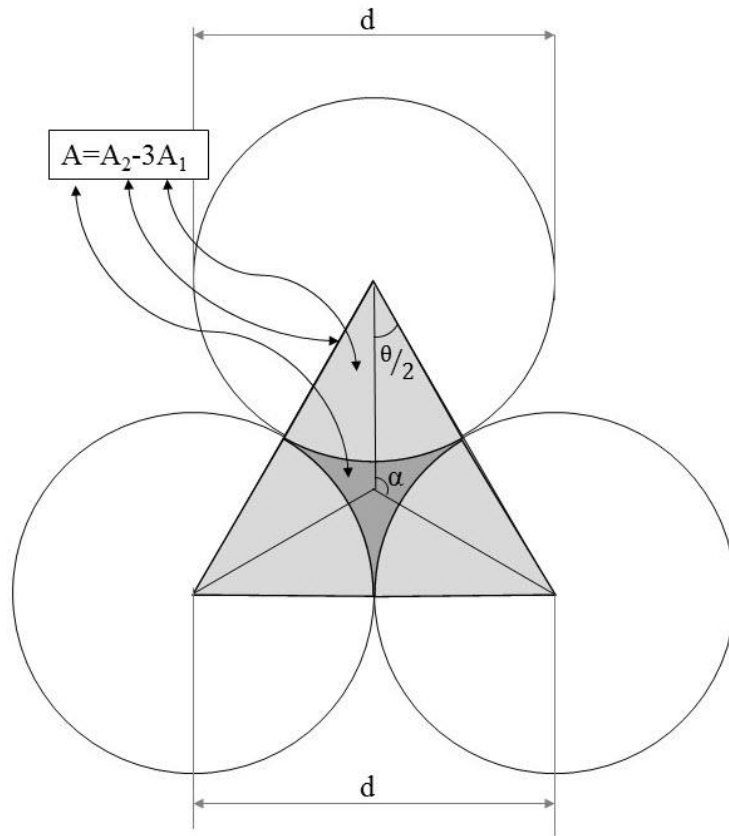
اصطکاک بین الیاف و ماتریس سیمانی یکی از عوامل مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن الیاف تابیده می‌باشد که وابسته به ضریب اصطکاک و سطح تماس جانبی الیاف و ماتریس می‌باشد. ضریب اصطکاک معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود ولی سطح جانبی الیاف می‌تواند متغیر باشد. در اینجا پارامتری بی‌بعد به نام نسبت مؤثر ذاتی الیاف تعریف می‌شود. این نسبت از تقسیم مساحت جانبی در طول واحد الیاف به مساحت مقطع آن حاصل می‌شود.

$$\text{FIER} = \frac{\Psi \times 1}{A} \quad (\text{پ-۶})$$

که در این رابطه Ψ و A به ترتیب محیط و مساحت مقطع الیاف می‌باشد. هدف از تعریف این نسبت، ارائه‌ی پارامتری مؤثر بر رفتار بیرون کشیدن که فقط به شکل مقطع الیاف وابسته باشد. رابطه‌ی زیر این نسبت را در مقاطع چندضلعی منتظم بیان می‌کند:

$$\text{FIER} = \frac{\Psi}{A} = \frac{nd}{\frac{\pi d_e^2}{4}} = \frac{4}{d \tan(\theta/2)} \quad (\text{پ-۷})$$

شکل پ-۲ مقطع الیاف سه‌ضلعی‌گون را نشان می‌دهد که از مماس شدن سه دایره با قطر d پدید آمده است. علت بررسی نمودن این نوع مقطع، بیشتر بودن پارامتر FIER این مقاطع نسبت به مقاطع چندضلعی منتظم می‌باشد. با توجه به شکل پ-۲، روابط α و θ به صورت زیر تعیین می‌شود:



شکل پ-۲: مقطع سه ضلعی گون.

$$\alpha = \frac{2\pi}{n} \quad (\text{پ-۸})$$

$$\theta = \pi - \alpha = \frac{n-2}{n} \pi \quad (\text{پ-۹})$$

همان طور که در شکل پ-۲ قابل مشاهده است، مقطع الیاف سه ضلعی گون با رنگ خاکستری تیره نشان داده شده است. به طور کلی، مساحت مقطع چندضلعی گون (A) برابر است با مساحت یک چندضلعی منتظم با طول اضلاع d (A_2)، بدون در نظر گرفتن قسمت هایی که در شکل ۴-۳ با رنگ خاکستری روشن (nA_1) نشان داده شده است. در واقع A_1 مساحت قطاعی از دایره با زاویه θ رادیان و به شعاع $d/2$ می باشد. در نتیجه داریم:

$$A_2 = \frac{nd^2}{4} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{پ-۱۰})$$

$$A_1 = \frac{\theta}{8} d^2 \quad (\text{پ-۱۱})$$

$$A = A_2 - nA_1 = \frac{nd^2}{4} \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - \left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (\text{پ-۱۲})$$

همچنین رابطه‌ی بین قطر دایره‌های مماس (d) و قطر معادل مقطع (d_e) و رابطه‌ی نسبت مؤثر ذاتی الیاف به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d_e}{d} = \sqrt{\frac{\tan(\theta/2) - (\theta/2)}{\alpha/2}} \quad (\text{پ-۱۳})$$

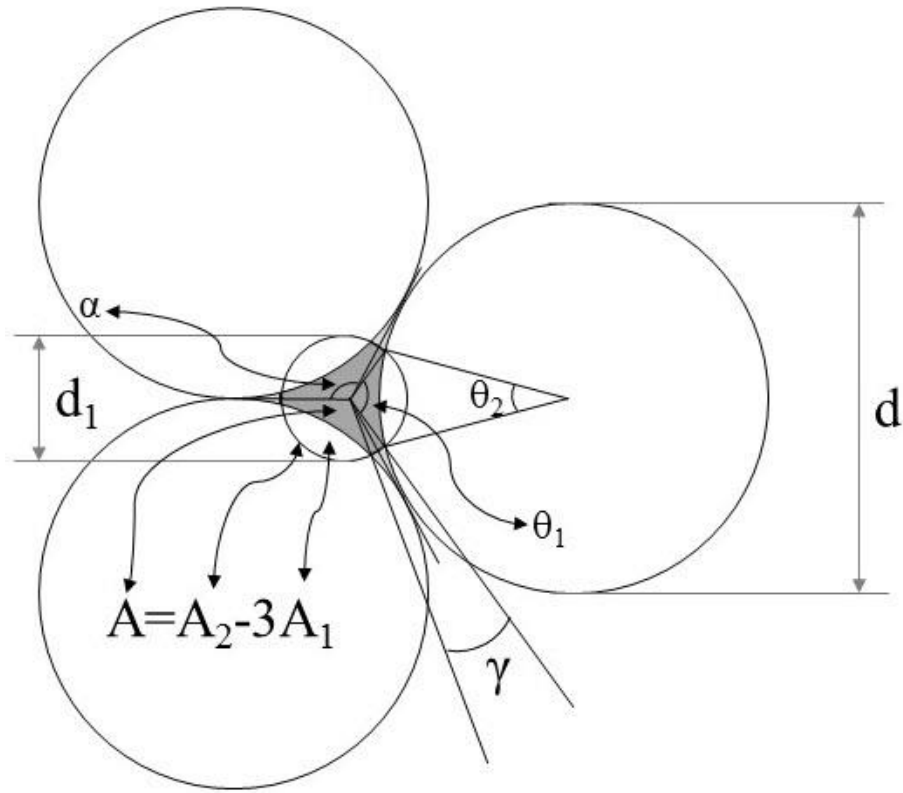
$$\text{FIER} = \frac{\Psi}{A} = \frac{nd\frac{\theta}{2}}{A} = \frac{2\theta}{d[\tan(\theta/2) - (\theta/2)]} \quad (\text{پ-۱۴})$$

شکل پ-۳ برای نمونه مقطع الیاف سه‌ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی را نشان می‌دهد که از مماس شدن سه دایره با قطر d و قطع کردن گوشه‌های تیز سه‌ضلعی گون توسط دایره‌ای به قطر d_1 پدید آمده است. مقاطع چندضلعی گون ناقص نسبت به مقاطع چندضلعی گون، FIER کمتری دارند. باین حال به دلیل نداشتن گوشه‌های تیز، تمرکز تنش کمتری در ماتریس سیمانی ایجاد می‌کنند. با توجه به شکل پ-۳، رابطه‌ی α بر حسب θ_1 و γ به صورت زیر تعیین می‌شود:

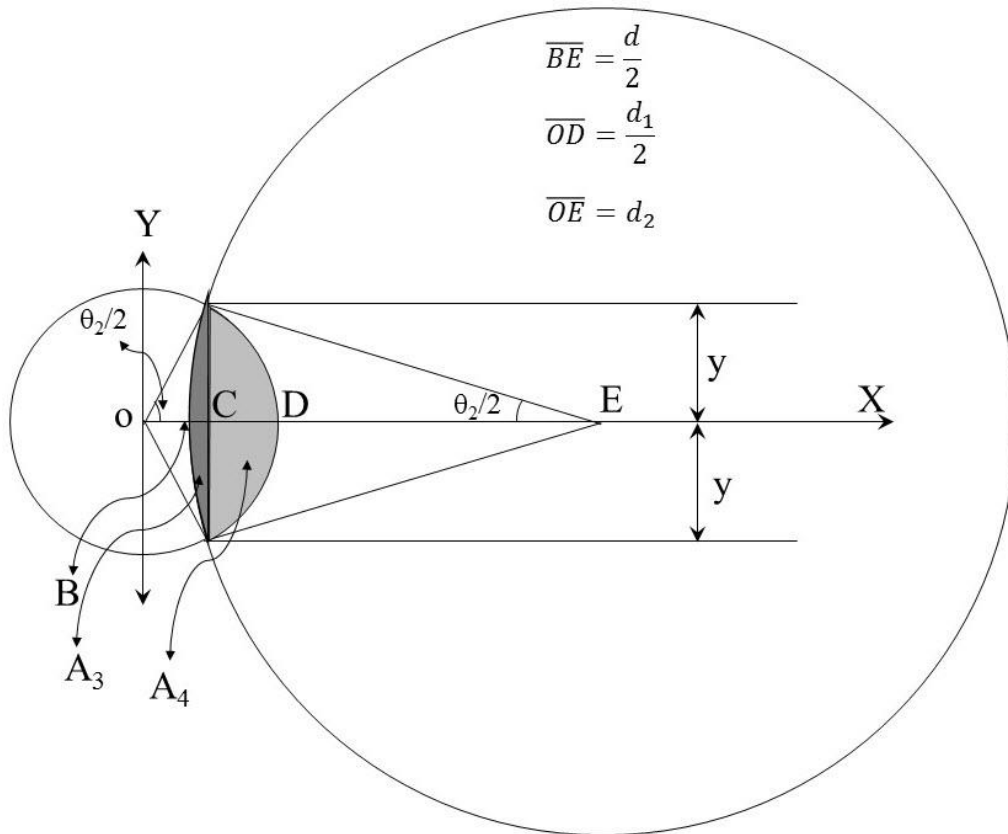
$$\alpha = \frac{2\pi}{n} = \theta_1 + \gamma \quad (\text{پ-۱۵})$$

سطح مقطع الیاف، به مساحت دایره‌ی به قطر d_1 (A_2) و سطح مشترک دایره‌های به قطر d و d_1 (A_1) وابسته است. شکل پ-۴ نحوه‌ی محاسبه A_1 را نشان می‌دهد. مساحت الیاف (A) به مقادیر d ، d_1 و d_2 وابسته‌اند که مجهول می‌باشند. به همین دلیل ضرایب k_1 و k_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$k_1 = \frac{d_1}{d} \quad , \quad k_2 = \frac{d_2}{d} \quad (\text{پ-۱۶})$$



شکل پ-۳: مقطع سه ضلعی گون ناقص ۶۰ درصدی.



شکل پ-۴: نحوه‌ی محاسبه‌ی A_1 .

در ادامه مقادیر OC و CE که مساحت A_1 به آن وابسته است، با استفاده از رابطه‌ی (پ-۱۶) و برابر

قرار دادن معادله دایره‌های به قطر d و d_1 با یکدیگر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 &= \frac{d_1^2}{4} \\ (x - d_2)^2 + y^2 &= \frac{d^2}{4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow x = \left(\frac{k_1^2 - 1 + 4k_2^2}{8k_2} \right) d = OC \quad (\text{پ-۱۷})$$

$$CE = d_2 - OC = \left(\frac{1 - k_1^2 + 4k_2^2}{8k_2} \right) d \quad (\text{پ-۱۸})$$

مقادیر θ_1 ، θ_2 و γ با نوشتن روابط مثلثاتی سینوس و کسینوس با توجه به شکل پ-۴ به صورت

زیر می‌باشند:

$$\theta_1 = 2 \cos^{-1} \left[\frac{2(\overline{OC})}{k_1 d} \right] \quad (\text{پ-۱۹})$$

$$\theta_2 = 2 \cos^{-1} \left[\frac{2(\overline{CE})}{d} \right] \quad (\text{پ-۲۰})$$

$$y = \frac{k_1 d}{2} \sin \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \quad (\text{پ-۲۱})$$

با داشتن مقادیر α ، θ_1 ، θ_2 و y برحسب k_1 و k_2 ؛ روابط سطح مقطع الیاف (A)، نسبت قطر معادل به قطر دایره‌های مماس $\left(\frac{d_e}{d}\right)$ و FIER برحسب k_1 و k_2 به دست می‌آیند. ابتدا مساحت سطح مقطع الیاف (A) توسط رابطه‌های پ-۲۲ تا پ-۲۸ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A = A_2 - nA_1 \quad (\text{پ-۲۲})$$

$$A_1 = A_3 + A_4 \quad (\text{پ-۲۳})$$

$$A_2 = \frac{\pi k_1^2 d^2}{4} \quad (\text{پ-۲۴})$$

$$A_3 = \frac{\theta_2 d^2}{8} - (\overline{CE})y \quad (\text{پ-۲۵})$$

$$A_4 = \frac{\theta_1 d_1^2}{8} - (\overline{OC})y \quad (\text{پ-۲۶})$$

$$A_1 = \frac{\theta_2 d^2}{8} + \frac{\theta_1 k_1^2 d^2}{8} - k_2 dy \quad (\text{پ-۲۷})$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1^2 + \left[\alpha k_2 \sin \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right\} = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad (\text{پ-۲۸})$$

و با ساده سازی رابطه‌ی پ-۲۸، نسبت قطر معادل به قطر دایره‌های مماس $\left(\frac{d_e}{d}\right)$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d_e}{d} = \sqrt{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1^2 + \left[\alpha k_2 \sin \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right\}} \quad (\text{پ-۲۹})$$

با توجه به شکل پ-۳، مقدار زاویه γ برابر است با:

$$\gamma = \alpha - \theta_1 \quad (\text{پ-۳۰})$$

و با توجه به شکل پ-۳ محیط مقطع پندضلعی گون ناقص به صورت زیر می باشد:

$$\Psi = \frac{nd}{2} (\theta_2 - k_1 \gamma) \quad (\text{پ-۳۱})$$

مقدار FIER نیز از تلفیق روابط پ-۲۸ و پ-۳۱ تعیین می شود:

$$\text{FIER} = \frac{\Psi}{A} = \left(\frac{4}{\alpha d} \right) \frac{(\theta_2 - k_1 \gamma)}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1^2 + \left[\alpha k_2 \sin \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] k_1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right\}} \quad (\text{پ-۳۲})$$

شکل پ-۵ نحوه ی محاسبه ی مقادیر k_1 و k_2 و درصد ناقص بودن الیاف چندضلعی گون ناقص را

نشان می دهد. با توجه به شکل پ-۵، در حالت کلی مقدار k_2 به صورت زیر می باشد:

$$\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) = \frac{d/2}{d_2} = \frac{d}{2k_2 d} \Rightarrow k_2 = \frac{1}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (\text{پ-۳۳})$$

درحالتی که d_1 به حداکثر مقدار خود می رسد، داریم:

$$\cot \left(\frac{\alpha}{2} \right) = \frac{d_{1\max}/2}{d/2} \Rightarrow k_{1\max} = \cot \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (\text{پ-۳۴})$$

و درحالتی که d_1 به حداقل مقدار خود می رسد، داریم:

$$d_2 = \frac{d}{2} + \frac{d_{1\min}}{2} \Rightarrow k_{1\min} = 2k_2 - 1 \quad (\text{پ-۳۵})$$

همان طور که ملاحظه می شود تنها مجهولی که باقی مانده است، مقدار k_1 می باشد که بایستی

مقداری بین مقدار حداقل و حداکثر خود انتخاب شود. درحالتی که مقدار حداکثر را اختیار کند، شکل

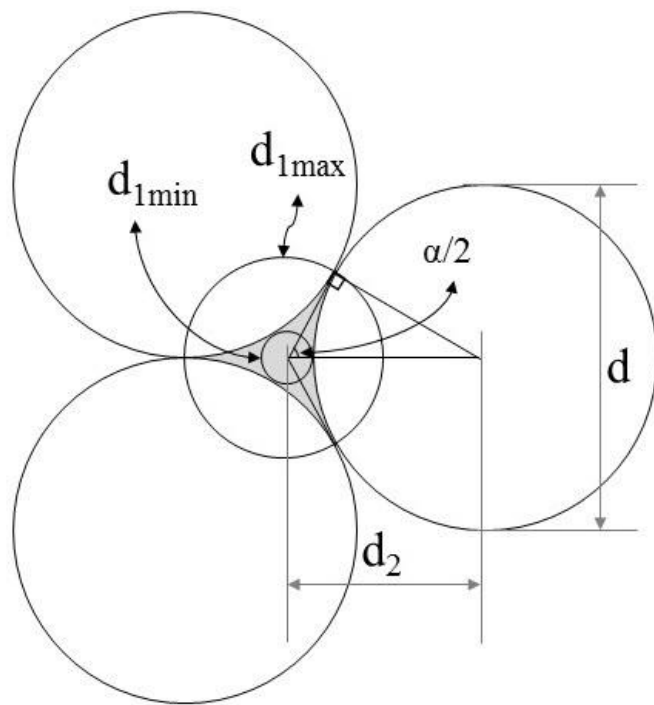
مقطع به صورت چندضلعی گون خواهد شد که در این حالتی درصد ناقصی (i) صفر درصد می باشد.

همچنین اگر مقدار حداقل را اختیار کند، شکل مقطع به صورت دایره خواهد شد که در این حالت

درصد ناقصی (i) ۱۰۰ درصد می باشد. در نتیجه توسط رابطه ی زیر با انتخاب درصد ناقصی مناسب،

مقدار k_1 مشخص می شود.

$$k_1 = \left(\frac{100-i}{100} \right) k_{1\max} + \left(\frac{i}{100} \right) k_{1\min} \quad (\text{پ-۳۶})$$



شکل پ-۵: مقطع سه ضلعی گون ناقص صفر و ۱۰۰ درصدی.

منابع

- [1] Mindess S., Young, J. F., Darwin, D. (2002), “*Concrete*” (2nd ed.). Prentice Hall.
- [2] Naaman A. E. (1985) “Fiber reinforcement for concrete”, *ACI Concrete International*, **7**, 3, pp. 21–25.
- [3] Naaman A. E., (2000) “Fiber Reinforcement for Concrete: Looking Back, Looking Ahead”, In Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete (FRC), pp. 65-86, Cachan, France.
- [4] Naaman A. E. and Reinhardt H. (2003) “High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-4): International RILEM Report,” *Material and Structures*, **36**, pp. 710-712.
- [5] Richard P., Cheyrezy M., and Roux N. (1996) “Metal fiber concrete compositions for molding concrete elements, elements obtained and curing process”, Saint Quentin Yvelines, France.
- [6] Johnston C. D. (2001) “*Fiber-Reinforced Cements and Concretes*” (1st ed.), Gordon and Breach Publishers, Amsterdam.
- [7] Cunha V. M. C. F., Barros J. A. O. and Sena-Cruz J. M. (2010) “Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete”. *J. of Materials in Civil Engineering*, **22**, 1, pp. 1.
- [8] Naaman A. (2003) “Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites”, *J. of Advanced Concrete Technology*, **1**, 3, pp. 241–252.
- [9] Sujivorakul C., (2002), PhD. thesis, “Development of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Using Twisted Polygonal Steel Fibers”, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- [10] Kim D., El-Tawil S. and Naaman A. E. (2007) “Correlation between single fiber pullout behavior and tensile response of FRC composites with high strength steel fiber”, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5), pp. 67-76, Mainz, Germany.
- [11] Kim D.J., El-Tawil S. and Naaman A.E. (2008) “Loading Rate Effect on Pullout Behavior of Deformed Steel Fibers” *ACI Materials Journal*, **105**, 6, pp.576-584.

- [12] Guerrero P. and Naaman A. E. (2000) “Effect of Mortar Fineness and Adhesive Agents in Pullout Response of Steel Fibers”, *ACI Materials Journal*, 97, 1, pp. 12-22.
- [13] Kim J.J., Kim D.J., Kang S.T. and Jang H.L. (2012) “Influence of Sand to Coarse Aggregate ratio on the Interfacial Bond Strength of Steel Fiber in Concrete for Nuclear Power Plant”, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, 252, pp. 1-10.
- [14] Menzel C. A. (1952) “proposed standard deformed bar for reinforcing concrete. In Studies of bond between concrete and steel: a compilation of five papers. Chicago, IL: Portland Cement Association, Research and Development Laboratories; pp. 11–64.
- [15] Cheng Y.L. and Mobashert B. (1997) “Finite Element Simulation of Fiber Pullout Toughening in Fiber Reinforced Cement Based Composites”, *Journal of Advanced Cement Based Materials*, 7, pp. 123-132
- [16] Naaman, A. (1999) “Optimized geometries of fiber reinforcements of cement, ceramic and polymeric based composites.
- [17] Yang Q.S., Qin Q.H. and Peng X.R. (2003) “Size Effect in Fiber Pullout Test”, *Journal of Composite Structures*, 61, pp. 193-198.
- [18] Kyriaki G.S., Mistakidis E., Pantiusa D. and Zygomas M. (2010) “Numerical Modelling of the Pullout of Hooked Steel Fibers from High Strength Cementitious Matrix Supplemented by Experimental Results”, *Journal of Construction and Building Materials*, 24, pp. 2486-2506.
- [19] Chin C.S. and Xiao R.Y. (2012) Experimental and Nonlinear Finite Element Analysis of Fiber Cementitious Matrix Bond Slip Mechanism H.W. Reinhardt, and A.E. Naaman (Eds.) HPCFRCC 6, pp. 145-152, G.J. Parra-Montesinos
- [20] Ellis B. D., McDowell D. L. and Zhou M. (2014) “Simulation of single fiber pullout response with account of fiber morphology”, *Cement & Concrete Composites*, 48, pp. 42-52
- [21] Ellis B.D., (2013), PhD. thesis, “Multiscale modeling and design of Ultra-High-Performance concrete, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [22] ABAQUS Theory Manual 6.11.

- [23] Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. and Jensen, J. J. (1987), “Mechanical Properties of High Strength Concrete and Application to Design”, Proceedings of the Symposium: Utilization of High-Strength Concrete, Stavanger, Norway’, Tapir, Trondheim, pp. 149-159.
- [24] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-08, 2008.
- [25] CEB-FIP, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1998.
- [26] Ollivier J. P., Maso J. C. and Bourdette B. (1995) “Interfacial Transition Zone in Concrete”, *Advn Cem Bas Mat*, 2, pp. 30-38.
- [27] Cohen M. D., Lee T. F. F. and Goldman A. (1995) “A method for estimating the dynamic moduli of cement paste-aggregate interfacial zones in mortar”, Microstructure of cement-based systems/bonding and interface in cementitious materials, Materials research society symposium proceedings, Pittsburgh, PA, pp. 407–412.
- [28] Baltay P. and Gjelsvik A. (1990) “Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress”, *J Mat Civ Eng.*, 2, 1, pp. 46–49.

Abstract

Single fiber pull-out test from cementitious matrix has been used to study the post-cracking behavior of fiber reinforced concrete. In this project, the effects of different geometrical properties of twisted steel fiber on the behavior of fiber pull-out from cementitious matrix has been investigated by FE analysis (ABAQUS). Properties such as: equivalent diameter, pitch, cross sectional shape and embedded length have been considered in this study. For simulating the mechanical behavior of steel fiber and cementitious matrix, nonlinear isotropic and kinematic hardening model and concrete damage plasticity model were used, respectively. Stress-strain relation which is offered by Thorenfeldt, Tomaszewicz and Jensen were used for uniaxial compressive behavior of cementitious material. Uniaxial tensile behavior of cementitious material was considered as bilinear. Isotropic Coulomb friction law and basic Coulomb friction model, which is available in ABAQUS, were used to simulate the frictional behavior between fiber and interfacial transition zone (ITZ). Pull-out force-slip curves for twisted steel fibers showed, when the cross sectional shape of twisted steel fiber changes from triangular to octagonal, the slip-hardening behavior is improved. In addition, by changing the shape of primarily polygonal cross section of twisted fibers, which the sides are concave; from primarily triangular to primarily octagonal the slip-hardening behavior is retrieved. In twisted steel fibers with imperfect primarily triangular and tetragonal cross sectional shape that their difference with primarily triangular and tetragonal cross sectional shape are in sharp corner, when the imperfection percentage increases from 60% to 80%, the pull out behavior changes from slip-softening to slip-hardening. Other factors that cause improvement in slip-hardening behavior is increase in the pitch and the equivalent diameter of fibers. Obtained results from suggested model are in good agreement with the test results and showed adequate accuracy.

Keywords: pull out behavior of fiber, twisted steel fiber, slip-hardening behavior, concrete damage plasticity model



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

**Effect of Cross Section on the Behavior of Twisted Fibers
Pull-out**

By: Pooriya Bakhshi Qalibaf Toosi

Supervisor:

Dr. Farshid Jandaghi Alaei

Advisor

Dr. pooyan Broumand

September 2017