

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

سید مهدی حجازی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

زینب بهروزی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

مهرداد معصومی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

E-mail: hejazi110@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵

چکیده

مسلح سازی قیر به کمک الیاف از جمله راهکارهای نسبتاً جدید در جهت بهبود خواص مکانیکی مخلوط بتن آسفالتی است. مزیت رقابتی اقتصادی، سرعت و سهولت اجرا و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی از جمله مزایای تسلیح قیر با استفاده از الیاف در مقایسه با سایر افزودنی‌ها، نظیر پلیمرهاست. اما، بحث چسبندگی قیر به مصالح سنگی از جمله پارامترهای تعیین کننده دوام روسازی است. بنابراین، هدف اصلی این مقاله، بررسی میزان چسبندگی قیر مسلح با الیاف به مصالح سنگی است. این مهم، در دو بخش نظری (مدلسازی) و آزمایشگاهی محقق گردیده است. در بخش نظری، از یک مدل مکانیکی مبتنی بر "روش تعادل نیروها" و "نظریه سرش الیافی در مواد مرکب مسلح با الیاف کوتاه" جهت محاسبه نیروی خروج سنگدانه از درون قیر مسلح با الیاف استفاده گردید. در بخش آزمایشگاهی، از الیاف پلی پروپیلن و پلی استر با طول ۱۲ میلی متر در درصدهای وزنی ۱٪، ۲٪، ۴٪ و ۸٪ به منظور تسلیح قیر ۶۰-۷۰ استفاده شد. مصالح سنگی نیز شامل دو نوع سنگدانه سیلیسی و آهکی بودند. در گام بعدی، دستگاه کشش اینسترون به منظور انجام آزمون خروج^۱ تجهیز گردید. در این آزمون، نیروی لازم برای بیرون کشیدن قطعه سنگدانه از درون قیر و یا قیر مسلح با الیاف در حالت‌های مختلف اندازه گیری شد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی نشان می دهد مدل مذکور، توانایی پیش بینی نیروی خروج را بخوبی دارد. واژه های کلیدی: قیر، مسلح سازی، الیاف، پلی پروپیلن، پلی استر، مدل مکانیکی

۱. مقدمه

هر چند قیر، درصد وزنی کمی از یک مخلوط بتن آسفالتی را در بر می‌گیرد، اما، به عنوان یک عنصر اصلی در تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی آسفالت موثر است. بر این مبنا، تقویت و مسلح سازی قیر از همان زمان ابداع آسفالت مطرح بوده است. از دیگر سوی، پدیده استفاده از الیاف جهت ارتقای خصوصیات رفتاری مواد گوناگون، ایده‌ای قدیمی است. آن‌گونه که هونگو و فیلیپس در کتاب "الیاف جدید" خود اشاره می‌کنند، ۴۰۰۰ سال قبل، بشر از الیاف به عنوان عنصری تقویت کننده در خاک رس استفاده می‌کرده است. همچنین، کاربرد الیاف در دیوار چین در ۲۰۰۰ سال قبل موید این مطلب است که دانش مهندسی نساجی از دیرباز در کنار مهندسی عمران، یاری‌گر ایشان در ارتقای عمر مفید سازه‌های گوناگون بوده است [Hongu and Philips, 1990]. در ۱۸۳۰ م، راهسازی با ابداع آسفالت، متحول گردید [Nicholls, 1998]. چهل سال گذشت تا استفاده از این محصول ابداعی، متداول گردد. مواجهه بودن با بار ترافیک و تاثیر پذیر بودن از تغییرات آب و هوایی، باعث گردید که در میان سازه‌های عمرانی، معابر آسفالتی دارای عمر مفید کمتری باشند [Saraiepour, 1981].

چاره اندیشی‌ها از اوایل ۱۹۲۰م. آغاز گردید. در ۱۹۲۶م. از پارچه-ای تار پودی، در بستر راه استفاده شد. اما نتیجه حاصل چندان موفقیت آمیز نبود [Rostami, 2006]. بایستی چهل سال می-گذشت تا در ۱۹۶۶ م. استفاده از پارچه‌های گوناگون در کارهای آسفالت‌کاری، مرسوم گردد [Marienfeld and Guram, 1999]. زوب (۱۹۵۶) قدیمی ترین تسلیح موفق بتن آسفالتی را ارائه کرد [Zube, 1956].

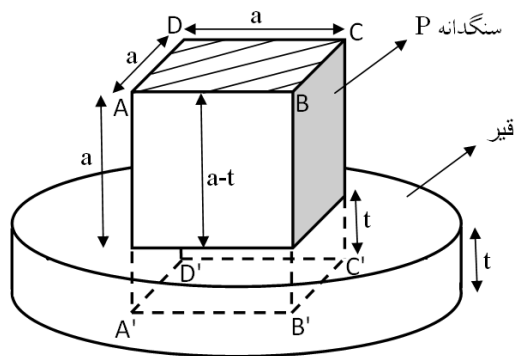
استفاده از شبکه‌های سیمی فولادی، ایده این محقق بود. شبکه‌های فولادی او در آسفالت سبب گردید تا تعداد ترک‌های انعکاسی واقع شده بر سطح راه، در مقایسه با حالت ساده کاهش یابد. در ۱۹۶۹ م. وایدل ایده به کارگیری خرده‌های لاستیک را در مسلح سازی خاک ارائه داد [Hejazi, 2006]. در فاصله ۱۹۶۰م. تا ۱۹۷۰م. کاربرد الیاف سلولزی (به عنوان مثال پنبه) و الیاف آبزتوس در بتن آسفالتی مطرح شدند: که ایده اول به دلیل تجزیه شدن تدریجی در سازه و ایده دوم به واسطه سمی بودن و مشکلات محیط زیستی

مربوطه، نامطلوب شناخته شدند [Bushing and Antrim., 1968]. در ۱۹۸۳ حلیم و همکاران [Komatsu et al. 1998] کاربرد ژئوگریدهای پلی پروپیلنی را در آسفالت، موفقیت آمیز اعلام کردند. تلاش‌های جدی برای بکارگیری الیاف گوناگون در آسفالت از دهه ۹۰ میلادی، شروع شد. براون و همکاران [Brown et al. 1990] اعلام نمودند که برخی از الیاف، دارای استحکام کششی بالاتری نسبت به قیر هستند و روی همین اصل، پتانسیل کاربرد و ارتقای سازه آسفالتی را دارند. در سال‌های اخیر که قیرهای پلیمری به بازار عرضه شدند، باور برخی بر این بود که الیاف ارزش تسلیحی خود را در آسفالت از دست خواهند داد. اما، نقطه امیدواری دیگر با مشخص شدن این نکته پدیدار گشت که طبق یافته‌های دین و همکاران [Dean and Malasheskie, 1989] مشخص گردید که الیاف در مقایسه با افزودنی‌های پلیمری، بهتر و بیشتر در کاهش نشست آسفالت موثرند. اما، در میان الیاف گوناگون، استفاده از الیاف پلی پروپیلن برای مسلح سازی مخلوط-های بتن آسفالتی متداول تر بوده است. قیمت ارزان، اختلاط پذیری مناسب با قیر و بهبود خواص مکانیکی از جمله دلایل این مساله است [Amuchi et al. 2015]. به عنوان نمونه، ابطحی و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که افزودن سه درصد الیاف پلی پروپیلن نسبت به قیر قابل مقایسه با پنج درصد پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS) از منظر بهبود خواص مارشال و مدول بر جهندگی مخلوط بتن آسفالتی است؛ در حالی که از نگاه اقتصادی، الیاف پلی پروپیلن دارای مزیت رقابتی بالاتری هستند [Abtahi et al. 2009]. الیاف پلی استر نیز به دلیل قیمت پایین، امکان تولید و بازیافت از ضایعات پلاستیکی و همچنین بهبود خواص مکانیکی قیر و آسفالت، مورد توجه محققین مختلف بوده است. یکی از مهم‌ترین مزایای کاربرد الیاف پلی استر در مسلح سازی مخلوط‌های بتن آسفالتی، کاهش ترک‌های انعکاسی گزارش شده است [Maurer et al. 1985].

از سوی دیگر، چسبندگی قیر به مصالح سنگی، یک پارامتر مهم در تعیین دوام مخلوط بتن آسفالتی است [Yoon and Tarrer, 1988] و [Youtcheff and Aurilio, 1997]. بنابراین، هدف اصلی این مقاله، بررسی عملکرد الیاف در میزان چسبندگی قیر به مصالح

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

- ۶- فرض می‌شود در حین انجام فرآیند خروج سنگدانه لیف در محدوده‌ی الاستیک خود عمل می‌کند.
- ۷- "هم راستا بودن الیاف" و "قرار گرفتن آنها به صورت عمود بر سطح جانبی سنگدانه" از جمله فرضیات مدلسازی است.



شکل ۱. شماتیک غوطه‌وری یک سنگدانه درون ماتریس قیری

اکنون، یک عدد لیف DD' در ارتفاع t' از کف ظرف، محبوس درون قیر و موازی با صفحه $A'B'C'D'$ سنگدانه در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که:

$$DD' = L_f \quad (2)$$

مطابق شکل ۲ فرض می‌شود انتهای لیف از سمت D' به کمک قیر محبوس شده بر صفحه $B'BCC'$ یعنی یک جبهه سنگدانه گیر داده شده است:

حالی که در نظر گرفته می‌شود که سنگدانه تحت یک نیروی کششی نظیر F مجبور به خروج از درون قیر مسلح با الیاف شود (نظیر آزمون خروج). اگر این نیرو سبب جابجایی سنگدانه به اندازه Δx نسبت به کف ظرف شود، لیف همانند یک تیر دو سر گیردار تحت بارگذاری کششی دچار تغییر شکل خواهد شد (شکل ۳):

برای درک بهتر موضوع، شکل ۴ به بررسی و مقایسه موقعیت لیف و سنگدانه، قبل و بعد از آزمون خروج می‌پردازد:

سنگی است. در این راستا، از آزمون خروج استفاده خواهد شد [Morales et al. 2011]. همچنین، به منظور بررسی نحوه عملکرد الیاف در افزایش یا کاهش چسبندگی از یک مدلسازی مکانیکی با بهره‌مندی از روش تعادل نیرو استفاده شده است. به عبارت دیگر، به کمک این مدل می‌توان با دانستن پارامترهای الیافی مورد استفاده برای مسلح سازی قیر، میزان چسبندگی ملات قیر-الیاف به مصالح سنگی را پیش‌بینی نمود.

۲. مدلسازی رفتار خروج سنگدانه از قیر مسلح با الیاف

الیاف

از دهه ۱۹۸۰ میلادی، آزمون خروج به عنوان یک روش بررسی میزان چسبندگی قیر به مصالح سنگی از علم مواد مرکب به مهندسی روسازی تعمیم یافت [Morales et al. 2011]. از این روش به خصوص به منظور بررسی رفتار قیرهای اصلاح شده به مصالح سنگی استفاده می‌شود [Yoon and Tarrer, 1988]. همان گونه که بیان شد یکی از اهداف این مقاله، بررسی نحوه عملکرد الیاف در میزان چسبندگی قیر مسلح شده با الیاف به مصالح سنگی است. این مهم با استفاده از یک مدل مکانیکی مبتنی بر روش "تعادل نیرو" انجام می‌شود. فرضیات این مدل عبارتند از:

۱- مطابق شکل ۱، قیر به ضخامت t سطح ظرف به حالت ایستایی رسیده است

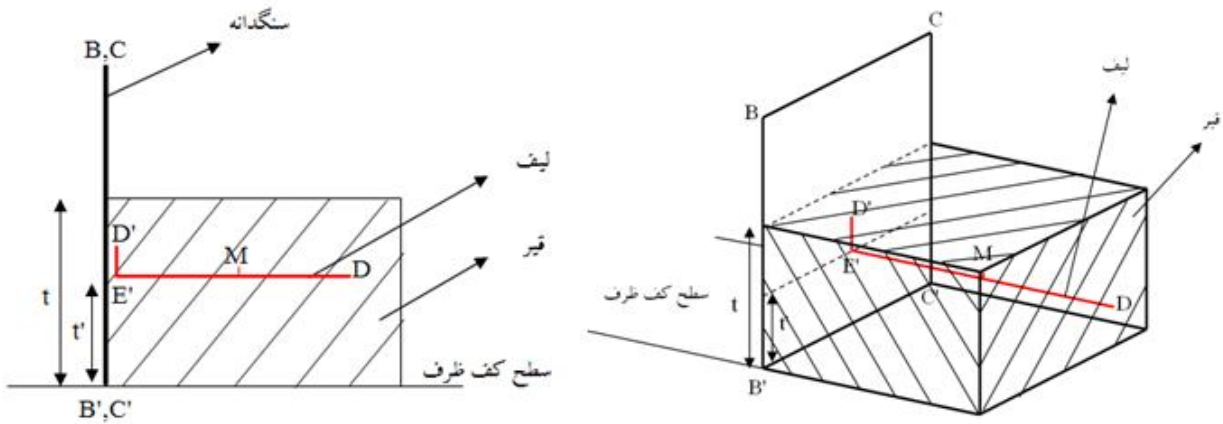
۲- سنگدانه P درون قیر به طور کامل غوطه‌ور شده است. یعنی سطح جانبی درگیر غوطه‌ور سنگدانه در قیر S عبارت است از:

$$S = 4at \quad (1)$$

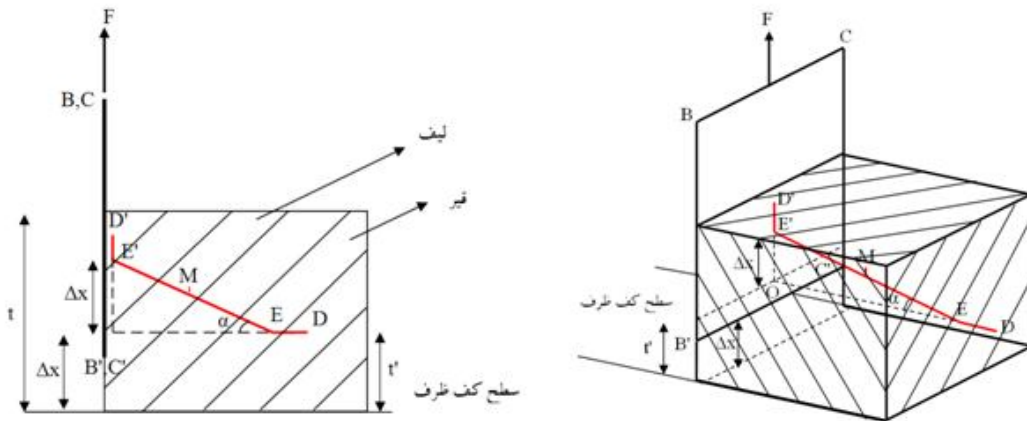
۳- سنگدانه به صورت یک مکعب به اضلاع a فرض می‌شود.

۴- فرض می‌شود سطح کف سنگدانه با ظرف در تماس است و در این ناحیه قیر حضور ندارد ($A'B'C'D'$). این فرض با تجربیات به دست آمده حین انجام آزمایش سازگار است.

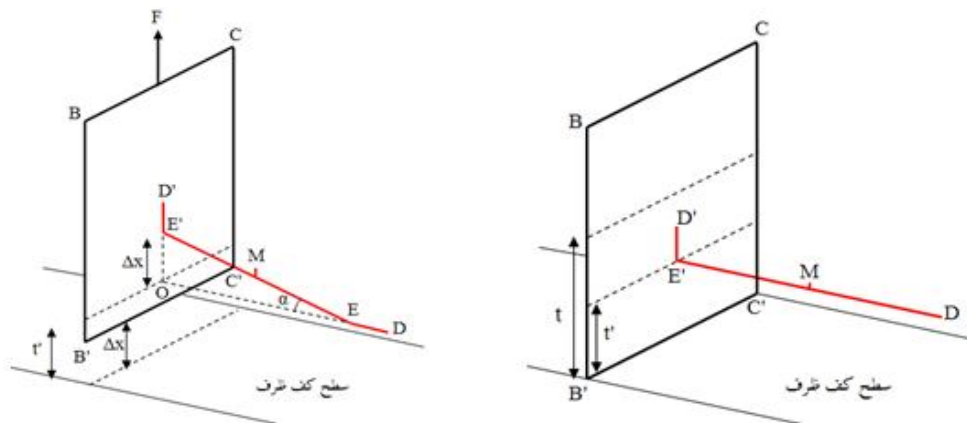
۵- الیاف مورد استفاده جهت مسلح سازی قیر، دایره‌ای شکل با قطر d_f و طول L_f و مدول الاستیک E_f هستند. قطر الیاف در طول لیف یکنواخت فرض می‌شود.



شکل ۲. نمای سه بعدی (سمت چپ) و نمای جانبی (سمت راست) از نحوه آرایش یافتگی لیف درون ماتریس قیری و نسبت به سنگدانه BCC/B'



شکل ۳. نمای سه بعدی (سمت چپ) و نمای جانبی (سمت راست) موقعیت لیف درون ماتریس قیری و نسبت به سنگدانه BCC/B' در حین آزمون خروج



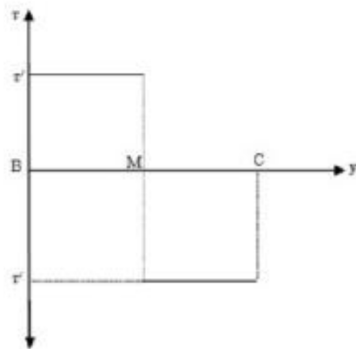
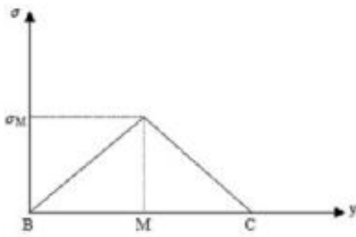
شکل ۴. موقعیت لیف و سنگدانه، قبل (سمت چپ) و بعد (سمت راست) از آزمون خروج مطابق مدل ارائه شده

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با لیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

$$(5) \quad \frac{d\sigma}{dD} = \frac{4\tau}{df}$$

از سوی دیگر، اگر فرض شود توزیع تنش کششی و برشی در طول لیف مطابق شکل ۶ باشد:

به طوری که M نقطه میانی در لیف باشد، واضح است که در این نقطه تنش کششی و القا شده به حد بیشینه خود یعنی σ_M خواهد رسید. بر این مبنای معادله (۵) به صورت زیر قابل بازنویسی است:



شکل ۶. توزیع تنش کششی و برشی بر روی لیف کوتاه تغییر شکل داده درون ماتریس قیری

$$\int_{\sigma=0}^{\sigma_a=\sigma_M} d\sigma = \int_{E_f}^M \left(\frac{4\tau}{df}\right) \times dD \quad (6)$$

از معادله ۶، σ_M به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_M = \left(\frac{4\tau}{df}\right) \times \frac{Lf}{2} \quad (7)$$

همچنین، با جایگزینی معادله (۴) در (۳) داریم:

$$(8) \quad \sigma_a = (\sec \alpha - 1) \times E_f \quad \sigma_a$$

از آنجا که:

$$\sigma_a = \sigma_M / 2 \quad (9)$$

بنابراین، با در نظر گرفتن معادلات (۷) و (۸) و (۹)، σ_M به صورت زیر قابل محاسبه است:

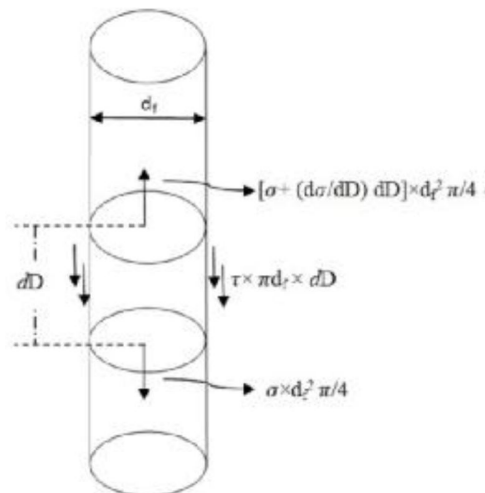
چنین فرضی مستلزم آن است که دو انتهای آزاد لیف از سمت نقاط D و D' با ماتریس قیری درگیر باشند. البته فرض می‌شود طول درگیری لیف با سنگدانه (E/D') در مقایسه با طول کل لیف ناچیز است. بنابراین، یک تنش کششی میانگین σ_a درون لیف القا می‌شود. این تنش کششی مطابق رابطه هوک متناسب با کرنش کششی ایجاد شده درون لیف ϵ_f و مدول الاستیک لیف E_f است. تاکید می‌شود که مطابق فرض ششم، فرض گردیده که لیف در محدوده الاستیک خود عمل می‌کند. پس داریم:

$$\sigma_a = \epsilon_f \times E_f \quad (3)$$

از دیگر سوی، با تامل در شکل ۳ و در نظر گرفتن $\Delta E'/OD$ ϵ_f برابر خواهد بود با:

$$\epsilon_f = \sec \alpha - 1 \quad (4)$$

شکل ۵، شرایط برقراری تعادل نیروها بر روی یک المان به طول dD را در چنین شرایطی نشان می‌دهد:



شکل ۵. بازنویسی روابط تعادل بر روی یک المان لیفی به طول dD بعد از تغییر شکل درون ماتریس قیری

در رابطه بالا τ تنش برشی ایجاد شده بین لیف و قیر است. با بازنویسی روابط تعادل نیروها در شکل بالا داریم:

در رابطه بالا، L_f بر حسب سانتی متر است. در این صورت حجم کل الیاف به کار برده شده (V_f) در کامپوزیت قیری به صورت زیر خواهد بود:

$$(15) V_f = \frac{D_f * L_f * N_f}{900000 * S_f} = \frac{m_f * N_f}{S_f}$$

بنابراین، کسر حجمی لیف (V_f) عبارت است از:

$$(16) V_f = \frac{V_f}{V_b} = \frac{V_f * S_b}{m_b}$$

که اندیس b در رابطه بالا نماینده قیر است. با ترکیب معادلات ۱۵ و ۱۶ خواهیم داشت:

$$(17) N_f = \frac{900000 V_f * m_b * S_f}{D_f * L_f * S_b}$$

با جایگذاری معادله ۱۷ در ۱۲، نیروی مقاوم یا میزان افزایش نیروی چسبندگی قیر به مصالح سنگی در اثر حضور الیاف به دست می آید:

$$(18) F_{Nt} = \frac{900000 V_f * m_b * S_f}{D_f * L_f * S_b} * \left(\frac{\pi d f^2}{4} \right) * \left(\frac{4 \tau_b L_f E_f}{d f} \right)^{0/5} (\sec \alpha - 1)^{0/5}$$

در رابطه بالا، چگالی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است.

۲. مواد مصرفی و آزمایشهای انجام شده

۲-۱ مواد مورد استفاده

در این پژوهش، دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی به منظور بررسی اثر نوع مصالح سنگی (پارامتر τ_B) بر میزان چسبندگی بین سنگدانه و قیر در آزمایش نیروی خروج، مورد استفاده قرار گرفت. این مصالح به ابعاد یکسان برش داده شد تا حجم غوطه وری سنگها در قیر یکسان و برابر باشد. قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۶۰-۷۰ محصول پالایشگاه اصفهان است. مشخصات فنی قیر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی قیر مورد استفاده در این پژوهش

وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۰۱۱
درجه نفوذ (۰/۱ mm)	۷۰
نقطه نرمی ($^{\circ}C$)	۵۰
درجه اشتعال ($^{\circ}C$)	۳۱۰
کندروانی (cSt)	۳۲۹/۵
افت وزنی (%)	۰/۲
خاصیت انگمی (mm)	۱۰۰۰

$$(10) \sigma_M = \left(\frac{4 \tau_b L_f E_f}{d f} \right)^{0/5} (\sec \alpha - 1)^{0/5}$$

از طرفی، نیروی کششی القا شده درون لیف به دو نیروی مماسی (F_t موازی با صفحه $A'B'C'D'$) و نیروی نرمال F_N قابل تجزیه است. واضح است که F_N از رابطه زیر به دست می آید:

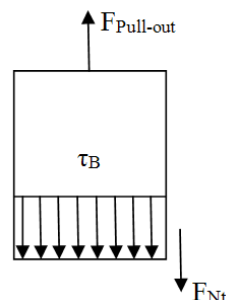
$$(11) F_N = A_f \times \sigma_M \times \sin \alpha$$

اکنون فرض می شود که N_f عدد لیف موازی با صفحه $A'B'C'D'$ قرار دارند. پس نیروی نرمال کل F_{Nt} پدید آمده به دلیل حضور این الیاف درون قیر در حین آزمون خروج عبارت است از:

$$F_{Nt} =$$

$$N_f \left(\frac{\pi d f^2}{4} \right) \left(\frac{4 \tau_b L_f E_f}{d f} \right)^{0/5} (\sec \alpha - 1)^{0/5}$$

در شرایط خروج کامل سنگدانه از درون قیر مسلح با الیاف، با بازنویسی روابط تعادلی مطابق شکل ۷ داریم:



شکل ۷. رابطه تعادلی خروج سنگدانه از درون ماتریس قیری

$$(13) F_{Pull-out} = \tau_B \times S + F_{Nt}$$

که در رابطه بالا τ_B تنش برشی پدید آمده بین قیر و سنگدانه است. S نیز از معادله ۱ قابل محاسبه است. بنابراین F_{Nt} یا افزایش نیروی خروج در اثر حضور الیاف به دست می آید. اما برای محاسبه F_{Nt} ، لازم است تعداد الیاف (N_f) بر حسب کسر حجمی لیف در کامپوزیت (V_f) و نمره لیف بر حسب دینر (D_f) به دست آید. برای این منظور، ابتدا جرم یک تک لیف (m_f) بر حسب گرم به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$(14) m_f = \frac{D_f * L_f}{900000}$$

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

طول الیاف ثابت و برابر ۱۲ میلی‌متر و همچنین دمای اختلاط برای تمام نمونه‌ها ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد [Alipour et al. 2011]. طرح آزمایشهای این پژوهش نیز در جدول ۳ تبیین شده است.

در این مطالعه، همچنین از دو نوع لیف پلی پروپیلن و پلی‌استر به منظور مسلح سازی قیر در آزمون خروج استفاده شد. جدول ۲ برخی خصوصیات این الیاف را نشان می‌دهد

جدول ۳. طرح آزمایشهای مورد استفاده در این پژوهش

شماره نمونه	کد نمونه	درصد لیف	جنس لیف	جنس سنگدانه	شماره نمونه	کد نمونه	درصد لیف	جنس لیف	جنس سنگدانه
۱	L	-	-	آهکی	۸	S/PET	۰/۴	پلی‌استر	سیلیسی
۲	L/PET	۰/۱	پلی‌استر	آهکی	۹	L/PP 0.1	۰/۱	پلی پروپیلن	آهکی
۳	L/PET	۰/۲	پلی‌استر	آهکی	۱۰	L/PP 0.2	۰/۲	پلی پروپیلن	آهکی
۴	L/PET	۰/۴	پلی‌استر	آهکی	۱۱	L/PP 0.4	۰/۴	پلی پروپیلن	آهکی
۵	S	-	-	سیلیسی	۱۲	S/PP 0.1	۰/۱	پلی پروپیلن	سیلیسی
۶	S/PET	۰/۱	پلی‌استر	سیلیسی	۱۳	S/PP 0.2	۰/۲	پلی پروپیلن	سیلیسی
۷	S/PET	۰/۲	پلی‌استر	سیلیسی	۱۴	S/PP 0.4	۰/۴	پلی پروپیلن	سیلیسی

جدول ۲. برخی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف مورد استفاده در پژوهش

مقدار		خواص
پلی پروپیلن	پلی‌استر تکسچره	
۰/۹۱	۱/۳۹	چگالی (g/cm ³)
۱۷/۳۴	۳۸/۴۴	تنش تا حد گسیختگی (cN/tex)
۱۱۸/۵	۳۱/۳	کرنش تا حد گسیختگی (%)
۷/۱	۱۰/۶	مدول اولیه (N/tex)
۳/۰۰	۲/۷۸	دنیر* لیف

* به جرم ۹۰۰۰ متر از یک لیف بر حسب گرم، دنیر لیف گفته می‌شود [Morton and Hearle, 1962].

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، قیر ۶۰-۷۰ تا دمای ۱۳۲ درجه سانتی‌گراد به طور غیرمستقیم حرارت داده شد تا کاملاً مایع گردد. سپس، الیاف به آن افزوده شد. مخلوط قیر با الیاف به صورت دستی هم زده می‌شد تا مخلوط یکنواخت و همگنی به دست آید. در گام

۲-۲ آزمون خروج سنگدانه از درون قیر

به منظور بررسی چسبندگی قیر معمولی و قیر مسلح شده با الیاف به سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی و همچنین بررسی تاثیر نوع الیاف مصنوعی به کار رفته، آزمایش خروج مورد استفاده قرار گرفت.

بعدي، سنگدانه که یک میخ فولادی به سطح بالایی آن متصل شده بود؛ درون قیر یا قیر مسلح با لیاف قرار می‌گرفت. نمونه‌ها برای ۲۴ ساعت در دمای محیط نگه داشته می‌شدند. پس از آن، آزمون خروج برای هر نمونه با استفاده از دستگاه اینسترون مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش باید تغییراتی بر روی این دستگاه صورت می‌گرفت. گیره پایینی این دستگاه توانایی گرفتن ظرف نمونه حاوی قیر را نداشت و از آنجایی که نیروسنج در فک بالایی قرار دارد، گیره پایینی باز شده و از حفره موجود در فک پایینی به عنوان تکیه‌گاهی برای لبه ظرف فلزی محتوی قیر استفاده گردید. شکل ۸ شماتیک انجام این آزمون و حالت واقعی را نشان می‌دهد. تمام آزمایش‌ها با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. فاصله بین دو فک دستگاه نیز برای تمام نمونه‌ها ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد [Hejazi et al. 2013a]. نیروی خروج نیز بر حسب نیوتون

گزارش شده است. برای هر حالت (تیمار)، آزمون ۵ مرتبه تکرار شد و نتیجه میانگین گزارش گردید.

۲-۳ آزمون خروج لیف از درون قیر

به منظور پیش‌بینی نیروی خروج در حالت قیر مسلح با لیاف، لازم است پارامتر τ یا همان تنش برشی پدید آمده بین لیف و قیر در

معادله (۱۸) برآورد گردد. بر این مبنا، آزمون خروج لیف از درون قیر مشابه آزمون خروج سنگدانه از درون قیر انجام شد. آزمون برای دو نوع لیف پلی‌استر و پلی‌پروپیلن و با طول لیف مدفون در قیر برابر ۱۰ میلی‌متر و سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه صورت پذیرفت. در شکل (۹) نمودار نیرو-جابجایی برای لیاف پلی‌پروپیلن و پلی-استر در یک حالت از این آزمون نشان داده شده است.

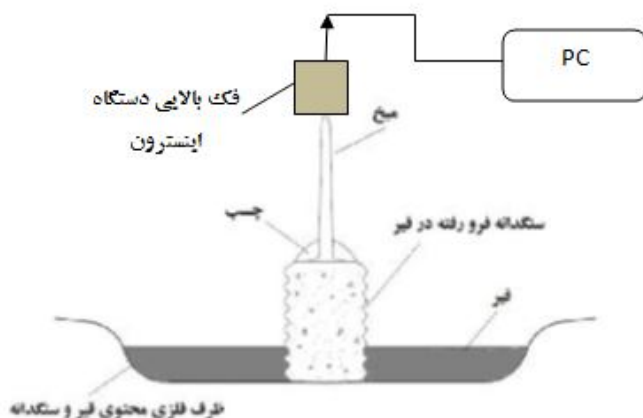
پارامتر خروجی از این آزمون، میزان تنش برشی τ بین لیف و ماتریس قیری است که در معادله (۱۸) برای پیش‌بینی میزان نیروی خروج سنگدانه از کامپوزیت قیر لیافی لازم است. آشکار است که با بازنویسی روابط تعادل نیرو در آزمون خروج لیف از قیر، τ از رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$\tau = F_p / (\pi d_f l) \quad (19)$$

که در این رابطه F_p بیشینه نیروی خروج لیف از درون قیر، یعنی نقطه بیشینه نمودار نیرو-جابجایی در آزمون، است. قطر لیف d_f نیز از معادله (۲۰) به دست می‌آید:

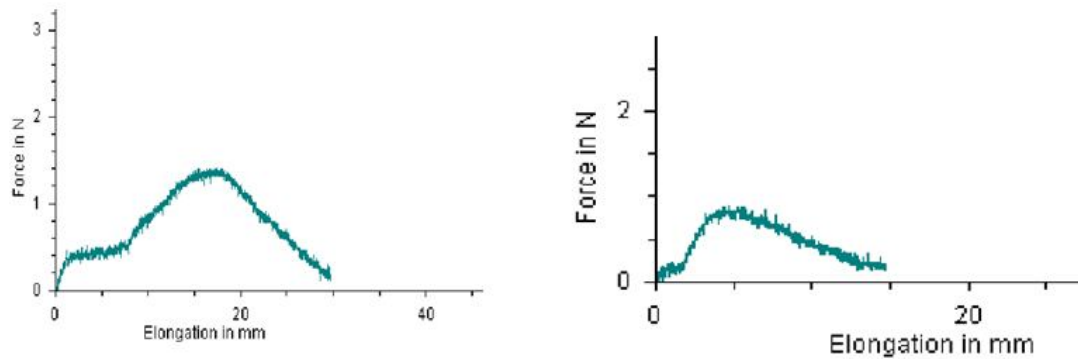
$$d_f = 0.012 \times (\text{Den} / \rho_f)^{0.5} \quad (20)$$

در معادله بالا، Den و ρ_f به ترتیب دنیتر و چگالی لیف است.

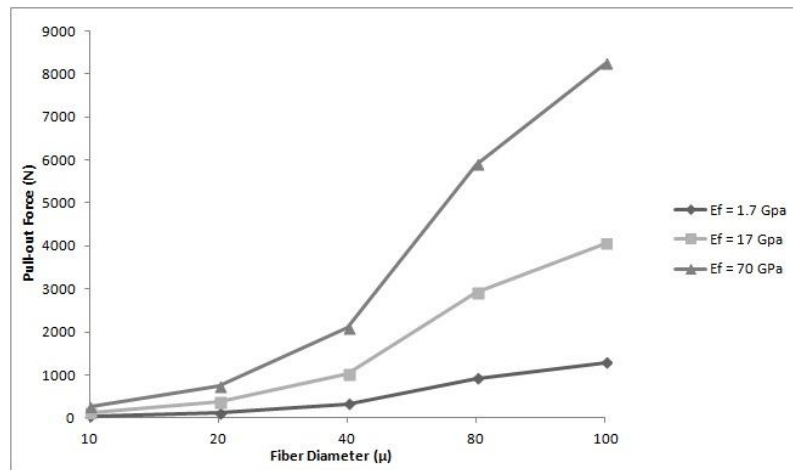


شکل ۸ شماتیک (سمت راست) و حالت واقعی انجام آزمون خروج سنگدانه از درون قیر و با قیر مسلح با لیاف

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)



شکل ۹. نمودار نیرو-جابجایی برای آزمون خروج لیف پلی پروپیلن (سمت راست) و پلی استر (سمت چپ) از قیر



شکل ۱۰. رابطه تئوری بین قطر الیاف (میکرون) با مدول‌های کشسانی مختلف و میزان افزایش نیروی خروج (نیوتن) در $N_f = 4 \times 10^5$ و $L_f =$

۳۱۲ mm

افزایش قطر لیف، انتقال نیرو از ماتریس به لیف کاهش می‌یابد و بنابراین، نیروی خروج بایستی کاهش یابد. البته با دقت در معادله (۱۸)، این مساله در ترم (جمله) دوم رابطه خود را نشان می‌دهد. جایی که پارامتر df در منحنی کسر قرار دارد. ولی، با افزایش قطر لیف، تنش کششی ایجاد شده در لیف، نیروی مقاوم بیشتری را در لیف در برابر نیروی خروج ایجاد می‌نماید (ترم نخست معادله ۱۸). نکته قابل استنباط دیگر، افزایش نیروی خروج متناسب با افزایش مدول الاستیک کشسانی لیف است. بدیهی است که افزایش مدول کشسانی، سبب ایجاد نیروی مقاوم بیشتری در لیف خواهد شد. از دیگر سوی، مطابق تئوری سرش الیاف کوتاه در کامپوزیت‌ها، افزایش

۳. نتایج و بحث

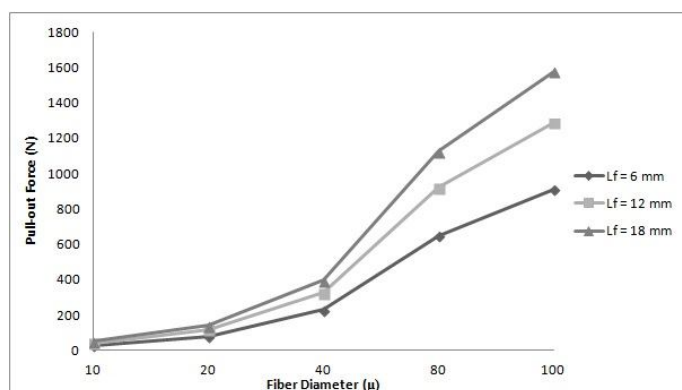
۳-۱ تحلیل پارامتری نتایج مدلسازی

نمودار شکل (۱۰) به بررسی اثر رابطه تئوری بین قطر الیاف با مدول‌های کشسانی مختلف بر روی میزان افزایش نیروی خروج می‌پردازد. این نمودار از ترسیم معادله (۱۲) در $N_f = 4 \times 10^5$ و $L_f = 12$ mm به دست آمده است.

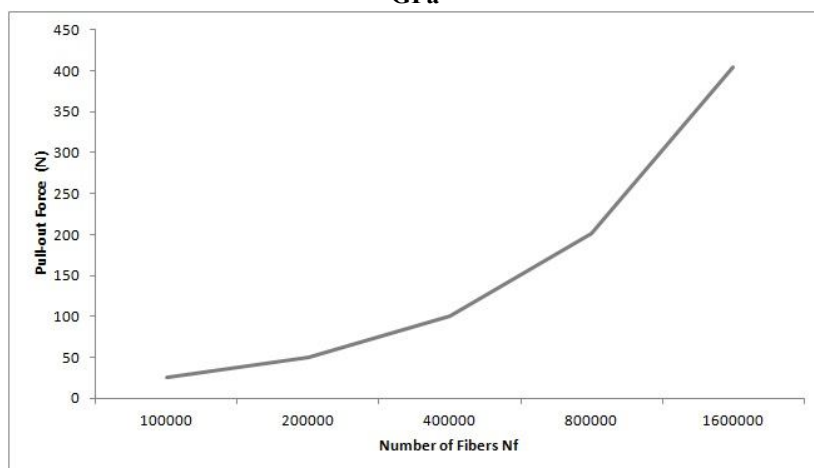
همان گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش قطر الیاف در یک مدول الاستیک کشسانی ثابت، یعنی کاهش ظرافت لیف، نیروی خروج نیز افزایش می‌یابد. این پدیده با تئوری سرش الیاف کوتاه در کامپوزیت‌ها سازگار نیست. مطابق این تئوری [Hejazi et al., 2013b]، با

واضح است که با افزایش قطر لیف در طول‌های مختلف، نیروی خروج نیز افزایش می‌یابد. توجه این مساله برای نمودار شکل (۱۰) بیان شد. همچنین، افزایش طول لیف با در نظر گرفتن ظرافت ثابت، سبب افزایش نیروی خروج می‌شود. کاهش سُرش لیف و افزایش انتقال تنش از ماتریس به لیف از جمله دلایل این مساله است که با تئوری سُرش الیاف کوتاه در کامپوزیت‌ها سازگاری دارد. ظاهر معادله (۱۸) و نمودار شکل (۱۱) نیز بیان می‌دارد که اثر طول لیف نسبت به ظرافت لیف بر افزایش نیروی خروج بیشتر است. در شکل (۱۲) به بررسی اثر تعداد الیاف مسلح کننده N_f بر افزایش نیروی خروج با فرض $L_f = 12 \text{ mm}$ ، $E_f = 1.7 \text{ GPa}$ و $df = 20 \mu$ پرداخته شده است.

مدول باعث کاهش میزان سُرش بین لیف و ماتریس خواهد شد [Hejazi et al. 2013b, Hejazi et al. 2014]. این پدیده به مفهوم همکاری بیشتر لیف با ماتریس و افزایش میزان تنش انتقالی از ماتریس به لیف است. ترم دوم معادله (۱۸) نیز همین مساله را نشان می‌دهد. همچنین، نمودار شکل (۱۰) بیان می‌دارد که اثر مدول کشسانی لیف بر افزایش نیروی خروج بیشتر از ظرافت لیف است. ظاهر معادله (۱۸) نیز مبین این مطلب است. شکل (۱۱) به بررسی رابطه تئوری بین قطر الیاف در طول‌های مختلف بر روی میزان افزایش نیروی خروج می‌پردازد. این نمودار بر اساس ترسیم معادله (۱۲) در $N_f = 4 \times 10^5$ و $E_f = 1.7 \text{ GPa}$ به دست آمده است.



شکل ۱۱. رابطه تئوری بین قطر الیاف (میکرون) در طول‌های مختلف و میزان افزایش نیروی Pull-out (نیوتن) در $N_f = 4 \times 10^5$ و $E_f = 1.7 \text{ GPa}$



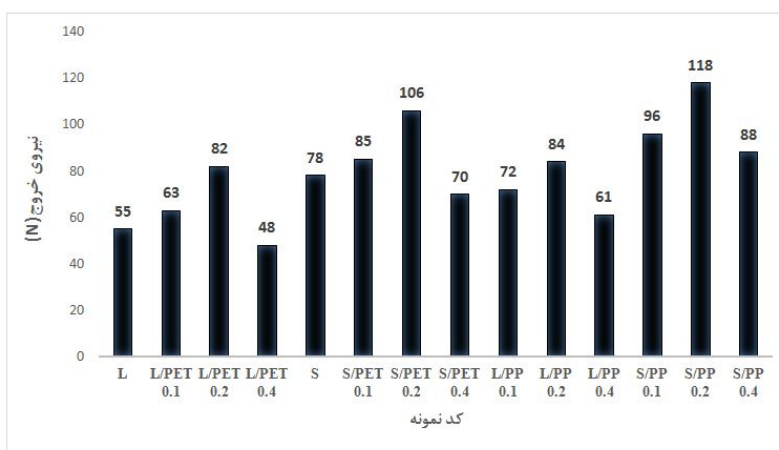
شکل ۱۲. تاثیر تعداد الیاف مسلح کننده N_f بر افزایش نیروی Pull-out با فرض $L_f = 12 \text{ mm}$ ، $E_f = 1.7 \text{ GPa}$ و $df = 20 \mu$

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه از آزمون خروج (Pull-out)

۳-۲ تحلیل نتایج آزمون خروج سنگدانه از درون قیر

در شکل (۱۳) نتایج واقعی آزمون خروج سنگدانه از درون قیر برای کلیه نمونه‌های مندرج در طرح آزمایشها (جدول ۳) نشان داده شده است. یک نگاه کلی به نمودارها و نتایج نشان دهنده‌ی این است که با افزودن الیاف به قیر خالص، میزان نیروی خروج افزایش یافته است. این پدیده با تئوری ارائه شده، همخوانی کلی دارد. از یک منظر دیگر از جمله دلایل افزایش نیروی خروج، افزایش ویسکوزیته قیر مسلح با الیاف است. با افزودن الیاف به قیر خالص، ویسکوزیته آن بیشتر می‌شود [Abtahi et al.2010]

مجدداً ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد الیاف مسلح کننده، نیروی خروج نیز افزایش می‌یابد. در واقع، تعداد الیاف مسلح کننده بیانگر کسر حجمی لیف است که رابطه آن در معادله (۱۷) به دست آمده است. نکته‌ای که در اینجا وجود دارد و مدل بالا آن را در نظر نمی‌گیرد؛ افزایش احتمال وقوع دو پدیده "گلوله گلوله شدن" و "تجمع موضعی" هم‌زمان با افزایش تعداد الیاف مسلح کننده در یک کامپوزیت الیاف کوتاه است. اثر منفی این دو پدیده در کاهش استحکام مکانیکی یک ماده مرکب توسط برخی محققین مورد توجه قرار گرفته است [Hejazi et al. 2014].



شکل ۱۳. نتایج واقعی آزمون Pull-out سنگدانه از درون قیر برای کلیه نمونه‌های مسلح با الیاف

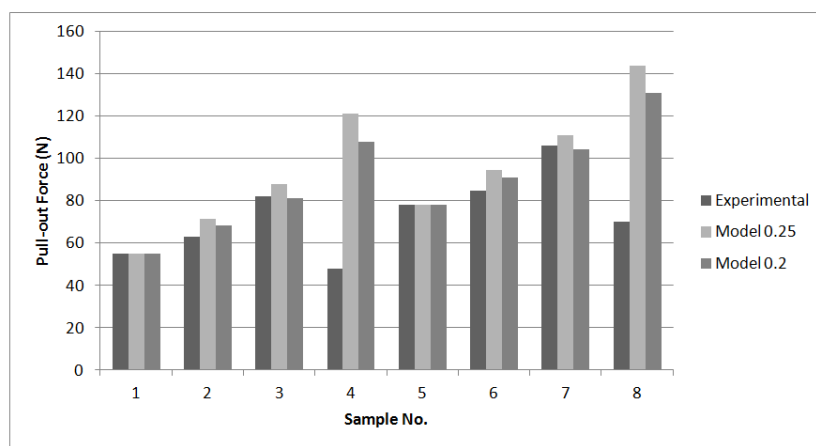
آنگاه مصالح آهکی نیروی خروج بیشتری نسبت به مصالح سیلیسی از خود نشان می‌دادند.

لازم به ذکر است محدوده ذوب الیاف پلی پروپیلن ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی گراد است. به همین دلیل الیاف پلی پروپیلن در دمای اختلاط (حدود ۱۴۰ درجه سانتی گراد) حالت چسبندگی (Tacky) دارند. این خاصیت الیاف در این دما باعث چسبندگی بیشتر لیف به ماتریس قیری می‌شود و نهایتاً انتقال تنش از ماتریس به لیف بهتر صورت می‌پذیرد. این نتیجه با دستاوردهای پژوهش‌های حجازی و همکاران سازگاری دارد [Hejazi et al. 2008]. به این مفهوم که استحکام فشاری و مدول بر جهندگی نمونه آسفالتی مسلح با الیاف پلی پروپیلن از نمونه آسفالتی مسلح با الیاف پلی استر بیشتر گزارش شده است [Hejazi et al. 2008]. البته این پدیده توسط مدل ارائه شده در قسمت قبلی نیز قابل پیش‌بینی است که در بخش

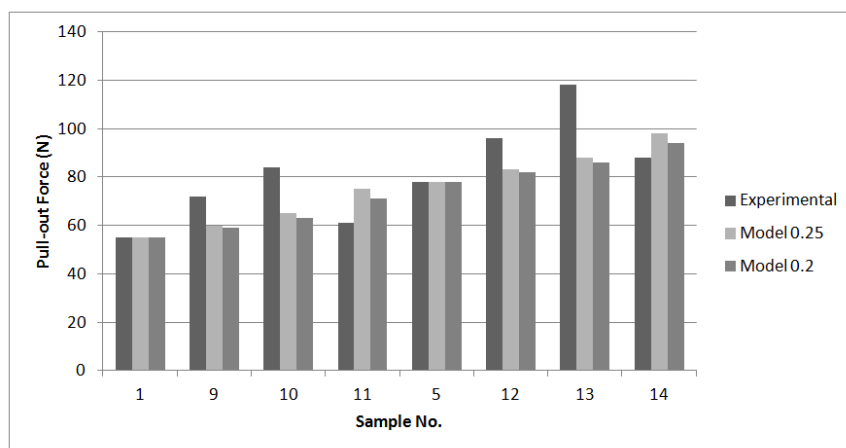
همچنین با یک نگاه کلی به نمودار شکل (۱۳) می‌توان دریافت که نیروی خروج برای سنگدانه‌های سیلیسی بیشتر از آهکی است. به نظر مصالح سیلیسی، پیوند شیمیایی محکم‌تری با قیر (پارامتر T_B در معادله (۱۸)) برقرار می‌نمایند. از سوی دیگر، همان‌طور که مشاهده می‌شود هم در نمونه‌های سیلیسی و هم در نمونه‌های آهکی، میزان نیروی خروج برای قیر مسلح با الیاف پلی پروپیلن از نیروی خروج سنگدانه از قیر مسلح با الیاف پلی استر در کسرهای وزنی مشابه بیشتر است (شکل ۱۳: مقایسه نمونه‌های کد L/PET 0.1 و 0.1، L/PP 0.1 و L/PET 0.2، L/PP 0.2 و L/PET 0.4 و 0.1، S/PP 0.2 و S/PET 0.2، S/PP 0.1 و S/PET 0.1، L/PP 0.4 و S/PET 0.4). البته به نظر می‌رسد اگر آزمون در شرایط اشباع صورت می‌پذیرفت تا شرایط عریان شدگی مهیا گردد؛

با کسر وزنی ۰/۲، بالاترین میزان نیروی خروج را داراست. این نتیجه با مدلسازی انجام شده در تناقض است. چرا که مطابق معادله (۱۸) با افزایش درصد لیف، نیروی خروج بایستی افزایش یابد. به نظر می‌رسد دلیل این امر آن است که با افزایش درصد وزنی لیاف، احتمال وقوع دو پدیده پیچیدن لیاف به یکدیگر و تجمع موضعی و نهایتاً تشکیل یک کامپوزیت نایکنواخت افزایش می‌یابد [Abtahi et al. 2011, Abtahi et al. 2010, Amuchi et al. 2015]. در نمونه های پلی استری این عامل به همراه عامل تکسچره بودن لیاف باعث افت شدید نیروی خروج شده است که این میزان از نمونه ی قیرخالص هم کمتر است.

بعدی، توضیحات مربوطه ارائه خواهد شد. اما اینکه لیف پلی استر نیروی خروج بیشتری در شکل ۹ نشان می‌دهد از آنجا ناشی می‌شود که لیف مورد استفاده تکسچره شده بوده، پس سطح درگیری بیشتری با ماتریس قیری داشته است. ولی، سایر عوامل که در مدل نشان داده شده است نظیر کرنش تا حد پارگی (گسیختگی) بالای لیف پلی پروپیلن (۱۱۸ درصد) در برابر ۳۱ درصد برای لیف پلی استر سبب شود نیروی خروج قیر مسلح با لیف پلی پروپیلن در مقایسه با قیر مسلح با لیف پلی استر بیشتر باشد. مساله‌ای که هم مدل ارائه شده و هم نتایج آزمایشگاهی موید آن است. به طور کلی، همان‌طور که مشاهده می‌شود برای دو نوع لیف، نمونه‌های مسلح



شکل ۱۴. مقایسه نتایج آزمون خروج سنگدانه از درون قیر مسلح با لیاف پلی استر با درصدهای مختلف



شکل ۱۵. مقایسه نتایج آزمون خروج سنگدانه از درون قیر مسلح با لیاف پلی پروپیلن با درصدهای مختلف

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

۳-۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، نتایج آزمون خروج سنگدانه از درون قیر مسلح با الیاف پلی‌استر و پلی‌پروپیلن در درصد‌های مختلف (جدول ۳) با خروجی‌های مدلسازی انجام شده (معادله (۱۸)) به ترتیب مقایسه شده است.

همان گونه که ملاحظه می‌شود خوشبختانه مدل ارائه شده، توانایی پیش‌بینی نیروی خروج را در حالات مختلف مورد آزمون داراست. ولی، در حالت ۰/۴ درصد الیاف پلی‌استر در دو حالت نمونه سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی (نمونه‌های کد L/PET 0.4 و S/PET 0.4) اختلاف نتایج مدل و آزمایشگاهی زیاد است. به نظر می‌رسد وقوع دو پدیده (Clumping) و گلوله گلوله شدن (Balling) دلیل این مساله باشد. اما، در خصوص الیاف پلی‌پروپیلن این پدیده مشهود نیست. به نظر می‌رسد ضریب اصطکاک الیاف با لیف که پارامتر مهم و تاثیر گذاری در میزان باز شدن الیاف کوتاه درون یک ماتریس حین فرآیند اختلاط است؛ عامل اصلی پخش یکنواخت‌تر الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به پلی‌استر درون ماتریس قیری باشد. این ضریب اصطکاک برای الیاف پلی‌پروپیلن کمتر از الیاف پلی‌استر گزارش شده است [Morton and Hearl, 1962]. به عبارت دیگر، جهت ارتقای مدل لازم است دو ضریب کاهنده که متناسب با کسر حجمی لیف است؛ در معادله (۱۸) وارد شود. این ضرایب توسط برخی محققین در حوزه کامپوزیت‌های الیاف کوتاه نیز مد نظر قرار گرفته‌اند [Hejazi et al. 2014].

لازم به ذکر است که نتایج خروجی مدلسازی در دو حالت تابع احتمال آرایش یافتگی $\eta_{\theta=0}(v_f)$ برابر ۰/۲ و ۰/۲۵ محاسبه شد. این تابع بدان مفهوم است که چه کسر وزنی از لیف موازی با سطح افق است.

۴. نتیجه‌گیری نهایی

در بخش مدلسازی این پژوهش، با استفاده از "روش تعادل نیروها"، میزان افزایش نیروی خروج (Pull-out) یک سنگدانه از درون قیر مسلح با الیاف در مقایسه با قیر معمولی پیش‌بینی شد. بر

این مبنا، مشخص گردید تعداد الیاف مسلح کننده (کسر حجمی لیف)، قطر لیف، میزان چسبندگی یا درگیری لیف با ماتریس قیری، مدول الاستیک کشسانی لیف از جمله عوامل موثر بر افزایش این نیرو هستند. در بخش آزمایشگاهی این مطالعه، میزان چسبندگی دو نوع مصالح سنگی سیلیسی و آهکی به قیر و یا قیر مسلح با الیاف بررسی گردید. همچنین، از الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌استر با طول ۱۲ میلی‌متر در درصد‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ به منظور تسلیح قیر ۶۰-۷۰ استفاده شد. میزان چسبندگی یا درگیری لیف با ماتریس قیری در هر حالت، از آزمون خروج (Pull-out) لیف از درون قیر به دست آمد.

نتایج بخش آزمایشگاهی نشان داد با افزودن الیاف به قیر خالص، میزان نیروی خروج افزایش یافته است. این پدیده با تئوری ارائه شده، همخوانی کلی دارد. نیروی خروج برای سنگدانه‌های سیلیسی بیشتر از نوع آهکی است؛ ولی، هم در نمونه سنگدانه‌های سیلیسی و هم در نمونه‌های آهکی، میزان نیروی خروج برای قیر مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن از نیروی خروج سنگدانه از قیر مسلح با الیاف پلی‌استر در کسرهای وزنی مشابه بیشتر است. محدوده ذوب الیاف پلی‌پروپیلن ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد است. به نظر می‌رسد به همین دلیل الیاف پلی‌پروپیلن در دمای اختلاط (حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد) حالت چسبندگی (Tacky) دارند. این خاصیت الیاف در این دما باعث چسبندگی بیشتر لیف به ماتریس قیری می‌شود و نهایتاً انتقال تنش از ماتریس به لیف بهتر صورت می‌پذیرد. اما، تکسچر بودن یا تموج موجود بر روی الیاف پلی‌استر سبب می‌شود که نیروی خروج تک لیف از درون ماتریس قیری برای لیف پلی‌استر بیشتر به دست آید. این نتیجه با نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف آسفالت مسلح با الیاف مطابقت دارد. به این مفهوم که استحکام فشاری و مدول بر جهندگی نمونه آسفالتی مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن از نمونه آسفالتی مسلح با الیاف پلی‌استر بیشتر گزارش شده است. البته این پدیده توسط مدل ارائه شده نیز تایید شد.

۵. پانویس‌ها

1-pull-out test

۶. مراجع

- Hejazi, S. M. (2006) "Mechanical reinforcement of asphalt-concrete by using textile materials", MSc Thesis, Isfahan University of Technology.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M. and Zadhoush, A. (2013) "Shear modeling of fiber reinforced soil composite on the base of fiber pull-out test", *Fiber and Polymer.*, 4(2), pp. 277-284.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., and Zadhoush, A. (2013) "Shear behavior of soft-matrix composites reinforced with polyethylene loop-formed fibers", *Iranian Polymer Journal*, 22, pp. 15-24.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., Malekian, V. and Mahmudi, S. (2014) "Using slippage theory to analyze shear behavior of loop-formed fiber reinforced soil composites", *Journal of Industrial Textiles*, 43(3), pp. 415-439.
- Hejazi, S. M., Baghulizadeh, A. R., Nateghi, M. and Mardani, M. (2014) "Shear modeling of polypropylene-fiber reinforced soil composite using electrical conductivity contour technique", *Journal of Industrial Textiles*, published online on March 2014.
- Hejazi, S. M., Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. and Semnani, D. (2008) "Introducing two simple models for predicting fiber reinforced asphalt concrete (frac) behavior during longitudinal loads", *Journal of Applied Polymer Science*, 109(5), pp. 2872-2881.
- Marienfeld, L. and Guram, K. (1999) "Overview of field installation procedures for paving fabrics in North America", *Geotextile and Geomembranes*, pp. 105-120.
- Maurer, D.A. (1985) "Comparison of methods to retard reflective cracking in bituminous concrete pavements using fabrics and fibers: construction and early performance report", Pennsylvania Department of Transportation, Research Project No. 83-8.
- Moraes, R., Velasquez, R. and Bahia, H. (2011) "Measuring effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test", *Transportation Research Board*, PP. 23-27, Washington, D.C.
- Morton, W. and Hearle, J. (1962) "Physical properties of textile fibers, Woodhead Publishing", London.
- Abtahi, S. M., Ebrahimi, M., Kunt, M., Hejazi, S. M. and Esfandiarpour, S. (2011) "Production of polypropylene-reinforced asphalt concrete mixtures based on dry procedure and superpave gyratory compactor", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 20, No. 10, pp. 813-823.
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. and Hejazi, S. M. (2010) "Fiber-reinforced asphalt-concrete structures- a review", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 6, pp. 871-877.
- Abtahi, S. M., Ameri, M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S.M. and Rahnama, E. (2009) "A comparative study on the use of sbs polymers and poly propylene fibers modifying asphalt concrete structures", 8th International Conference Sustainable aggregates, asphalt technology and pavement engineering, February 2009, Liverpool, UK
- Alipour, R., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., and Hejazi, S. M. (2011) "Investigation of effect of different fibers on ductility of bitumen", *Journal of Textile Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp 31-34.
- Amuchi, M., Abtahi, S. M., Kusha, B., Hejazi, S. M. and Sheikhzeinodin, H. (2015) "Reinforcement of steel-slag asphalt concrete using polypropylene fibers", *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 44, No. 4, pp. 521-544.
- Brown, F., Rowlett, D. and Boucher, L. (1990) "Asphalt modification, proceedings of the conference on the United States strategic highway research program: Sharing the Benefits", London, Thomas Telford (pub). pp.181-203.
- Bushing, H. and Antrim, J. (1968) "Fiber reinforcement of bituminous mixtures", *Association of Asphalt Paving Technology Proceedings*, Vol. 37, pp. 629-659.
- Dean, A. and Malasheskie, G. (1989) "Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking", *Transportation Research Record*, pp. 13-23.
- Hongu, T. and Philips, G. (1990) "New fibers, Ellis Harwood series in polymer science and technology", New York.

مدلسازی و بررسی چسبندگی قیر مسلح با الیاف، به سنگدانه با استفاده از آزمون خروج (Pull-out)

- Youtcheff, J. and Aurilio, V. (1997) "Moisture sensitivity of asphalt binders: evaluation and modeling of the pneumatic adhesion test results", 42nd Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, Canada, pp.180-200.
- Yoon, H. H. and Tarrer, A. R. (1988) "Effect of aggregate properties on stripping", In Transportation Research Record, TRB National Research Council, Washington, D.C., No. 1171, PP. 37-43.
- Zube, E., (1956) "Wire mesh reinforcement in bituminous resurfacing", Highway Research Record Bulletin, Vol. 131, pp. 1-18
- C, Nicholls (1998) "Asphalt surfacings" , First published, E and FN Spone, London.
- Saraiepour, M., (1981) "Asphalt-concrete", Dehkhoda Publisher, Second edition.
- Rostami, R. (2006) "The effect of fiber and production parameters on physical and mechanical properties of geotextiles made from short staple PP fibers", MSc Thesis, Isfahan University of Technology.
- Komatsu, T., Kikuta, H., Tuji, Y. and Muramatsu, E. (1998) "Durability assessment of geogrid reinforced asphalt concrete" , Geotextile and Geomembranes, Vol 16, Issue 5, pp. 257- 271.