



کد مقاله: ۱۱۰-۲

## بررسی آزمایشگاهی مقاومت چسبندگی میان بتن خود تراکم و میلگرد **GFRP** با قطرهای مختلف با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی (**Pull-out**)

سید محمد موسوی خطیر<sup>۱</sup>، مهدی دهستانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات آیت الله امل [khatir1man@yahoo.com](mailto:khatir1man@yahoo.com)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

استفاده از میلگردهای **FRP** در صنعت ساختمان سازی، از جمله روشهای نوین ترمیم و مقاومسازی در عصر حاضر محسوب میشود. ظهور بتن خودتراکم (**SCC**) نیز از پیشرفت های اثر گذار در عرصه ساختمان سازی است. از طرفی طرح اختلاط بتن و شکل سنگدانه ها و نحوه قرار گرفتن میلگردهای **FRP** درخواص مکانیکی بتن از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. در طرح اختلاط بتن خود تراکم تفاوتی اندک از بتن معمولی دیده میشود. اما بتن خود تراکم خواصی در مرحله بهره برداری از خود نشان میدهد که آن را از بتن معمولی متمایز میکند. از جمله آنها میتوان به خاصیت روانی که تحت اثر وزن خود در قالب جابجا میشود، اشاره کرد. همچنین این بتن قابلیت عبور در مقاطعی که تراکم آرماتور وجود دارد را داراست. در این تحقیق ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت چسبندگی (**Bond Strength**) با توجه به اندرکنش میان سطوح میلگرد **GFRP** با قطرهای مختلف و بتن خود تراکم صورت گرفته است که با تست بیرون کشیدگی میلگرد **GFRP** از ۱۲ نمونه استوانه ای ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر با دو طرح اختلاط در آزمایشگاه انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مقاومت چسبندگی میلگردهای **GFRP** و بتن خود تراکم کمتر از مقاومت چسبندگی میلگردهای فولادی با بتن خود تراکم میباشد. همچنین با افزایش قطر میلگرد، مقاومت چسبندگی میان بتن خود تراکم و میلگردهای **GFRP** کاهش مییابد.

**کلمات کلیدی:** بیرون کشیدگی، بتن خودتراکم، اندرکنش، مقاومت چسبندگی، میلگرد **GFRP**

### ۱- مقدمه

بتن خود تراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط اکمورا (**Okamura**) پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ برای اولین بار این نوع بتن در ژاپن ساخته شد و نتایج قابل قبولی از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن را عرضه کرد [1]. امروزه مقالات متعددی در ارتباط با توسعه بتن خود تراکم در دنیا منتشر شده است و نه تنها در کشور ژاپن، بلکه در مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی کشورهای اروپایی و کانادا و آمریکا، تحت عنوان **Self-Consolidating Concrete** موضوع بحث و بررسی و اجرای سازه های بتنی است [2]. در ایران نیز استفاده از بتن خود تراکم رایج شده است و از مزایای آن بهره گرفته می شود. در سال های اخیر مواد **FRP** به شکل های میلگرد تولید شده اند و در اعضای بتنی به جهت تقویت به جای فولاد مرسوم استفاده می شوند. این میلگردها دارای خواصی از قبیل: مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته پایین تر نسبت به فولاد، دوام بالاتر، وزن سبک و نفوذپذیری الکترومغناطیسی هستند [3]. میلگردهای **GFRP** با سطح صاف و همچنین آج دار برای بهبود چسبندگی در بتن تهیه می شود. مقاومت چسبندگی برای سازه های بتن آرمه از موضوعات مهم و بحرانی است. نیروهای بکار رفته در میان بتن و میلگردها بوسیله چسبندگی (عمل وابسته به خواص فیزیکی و شیمیایی اجسام)، اصطکاک و ظرفیت باربری (عمل های مکانیکی) انتقال پیدا می کنند [4,5].

اولین بار مطالعات در زمینه چسبندگی میان بتن و میلگرد را آبرامز انجام داد. او توانست نشان دهد که در آرماتورهای آج دار، نیروها از آرماتور به بتن اطراف به صورت فشاری و مورب منتقل میشود. کیفیت بتن و نوع بتن، قطر میلگرد، نوع بارگذاری، پوشش بتن و همچنین هر گونه تغییرات در طرح اختلاط، روش انبار کردن و نگهداری از بتن نیز از عوامل تاثیر گذار بر روی پیوستگی است [6,7,8,9].  
برای بررسی میزان مقاومت چسبندگی میلگرد با بتن، یکی از ساده ترین و ارزاترین و سریع ترین راه، آزمایش بیرون کشیدگی (Pull-Out) می باشد. [10]

در راستای تحقق هدف این تحقیق، ۱۲ تست بیرون کشیدگی با میلگردهای GFRP با قطرهای ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتری و بتن خود تراکم صورت گرفته است. اندازه این قالب ها، نمونه استوانه ای ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر بوده است. ضمن اینکه این نمونه ها تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت بصورت کنترل شونده مورد آزمایش قرار گرفته اند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

برای بدست آوردن مقاوت فشاری بتن، ۸ نمونه شاهد استوانه ای ۱۵۰×۳۰ ساخته شده و پس از ۲۸ روز نگه داری در آب توسط جک فشاری ملات شکن شکسته شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن برای هر نمونه اندازه گیری شده و میانگین آنها ملاک مقاومت فشاری دو طرح اختلاط این آزمایش می باشد که معادل 46 MPa و 44MPa است.

## ۲-۱- دانه بندی

دانه بندی های طرح اختلاط این آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- دانه بندی ثابت طرح های D1, D2

شماره الک	شن بادی (%)	شن نخودی (%)	ماسه (%)
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۹۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۲۲	۹۷	۱۰۰
۹/۵	۱۰	۷۰	۱۰۰
۴	۰	۱	۸۵
۸	۰	۰	۶۱
۱۶	۰	۰	۴۷
۳۰	۰	۰	۳۶
۵۰	۰	۰	۲۰
۱۰۰	۰	۰	۳

## ۳- نام گذاری نمونه

این تحقیق دارای دو طرح اختلاط بوده است، که ۴ دسته نمونه سه تایی با نام های *D1*، *D2* نام گذاری شده است. همچنین مصالح مورد نیاز و نسبت های وزنی آن ها نیز در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- نام طرح و مصالح مورد نیاز و نسبت های وزنی

نام طرح	مصالح	درصد	نسبت آب به سیمان
D1	سیمان آب پودر سنگ فوق روان کننده سنگ ماسه	۸ کیلوگرم ۳ لیتر ۳ کیلوگرم ۸۰ گرم ۸ کیلوگرم ۱۰ کیلوگرم	w/c=37/5%
D2	سیمان آب پودر سنگ فوق روان کننده سنگ ماسه	۷ کیلوگرم ۲٫۸ لیتر ۳ کیلوگرم ۷۰ گرم ۷ کیلوگرم ۱۰ کیلوگرم	w/c=40%

#### ۴- آزمایش های انجام شده بتن خود تراکم در این تحقیق

در این تحقیق دو آزمایش اسلامپ  $T50cm$  و جعبه  $L$  (  $L BOX$  ) جهت تهیه بتن خودتراکم انجام پذیرفت. در ادامه نحوه آزمایش، چگونگی تهیه و نتایج بدست آمده از این دو آزمایش توضیح داده شده است

#### ۴-۱- آزمایش $Slump Flow$ و آزمایش $T50cm$ (پهن شدگی اسلامپ- زمان ۵۰ سانتیمتری)

در آزمایش اسلامپ فلو ( پهن شدگی اسلامپ )، میزان پهن شدگی بتن در سطح افقی مشخص میشود و برای بتن های  $SCC$  مناسب است. در ابتدا این آزمایش در ژاپن و برای ارزیابی بتن های ترمی  $Tremie$  که در بتن ریزی زیر آب مورد استفاده قرار میگیرد بکار رفت. نحوه انجام آزمایش مانند آزمایش اسلامپ است اما بجای اندازه گیری افت و فرو نشستن مخروط بتن، قطر متوسط بتن پهن شده در سطح زمین اندازه گیری میشود و قابلیت پرکردن ( قابلیت سیلان و جریان ) را نشان میدهد.

#### ۴-۱-۱- نحوه آزمایش

۶ لیتر بتن که به روش استاندارد نمونه گیری شده است برای آزمایش لازم میباشد. سطح صفحه فلزی و درون مخروط ناقص اسلامپ را مرطوب می نمایم و مخروط را روی صفحه فلزی و در مرکز آن قرار می دهیم و با پا یا دست محکم آنرا در جهت قائم روی صفحه فشار می دهیم. سپس بتن را با سرتاس درون مخروط ناقص ریخته و بدون اینکه به آن ضربه ای بزنیم یا بلرزانیم، پر می کنیم و بدون اعمال ضربه یا لرزش بتن اضافی را با ماله یا خط کش بر می داریم و صاف می کنیم. بتن اطراف پای مخروط را کاملاً تمیز می نمایم. مخروط را بصورت قائم بالا کشیده تا بتن به سهولت و بدون مایع روان شود. در صورتیکه قصد اندازه گیری برای آزمایش  $T50cm$  ( زمان ۵۰ سانتیمتری ) باشد، همزمان با بالا کشیدن قالب مخروط ناقص، کرونومتر را بکار می اندازیم و زمان لازم برای رسیدن بتن به دایره ۵۰۰ میلیمتری را با دقت ۰/۱ ثانیه اندازه می گیریم. برای تعیین پهن شدگی اسلامپ ( اسلامپ فلو ) لازمست پس از توقف بتن روی صفحه کف، قطر نهائی و متوسط پهن شدگی را که برای دو قطر عمود بر هم بدست آمده است با تقریب  $\pm 25$  میلیمتر گزارش نمایم.

#### ۴-۱-۲- تفسیر و نتایج آزمایش

هر چه اسلامپ ( $SF$ ) بزرگتر باشد معرف قابلیت بیشتر پرکردن قالب و روان شدگی بتن تحت وزن خود میباشد. حداقل نتیجه ۶۰۰ میلیمتر برای بتن خود تراکم مورد نیاز است و توصیه شده است. معمولاً اختلاف نتیجه  $\pm 50$  میلیمتر در آزمایش های مختلف برای یک بتن قابل توجیه است. این آزمایش سریع و ساده است و کاربرد آن در دنیا وسعت زیادی پیدا نموده است. هرچند "بخوی قابلیت پرکردن" را نشان میدهد اما قابلیت عبور از بین میلگردها بدون انسداد را نمیتواند به نمایش گذارد. این آزمایش تا حدود زیادی مقاومت به جداسدگی را نشان میدهد. برای تکمیل این آزمایش سعی کرده اند که محدودیتهائی را در اطراف آن با قفس میلگرد و وسایل مشابه ایجاد نمایند و قابلیت عبور را نیز بسنجند. همزمان با این آزمایش میتوان آزمایش  $T50cm$  را با همان وسایل و امکانات ( بجز کرونوتر ) بدست آورد. زمان کمتر نشانه قابلیت روانی و سیلان بیشتر است. مؤسسه تحقیقاتی نیروژی  $BriteEu Ram[11,12]$  مقادیر ۳ تا ۱۰ ثانیه را بعنوان حدود قابل قبول در کاربردهای مهندسی عمران و ۲-۷ ثانیه را برای کاربردهای پیشرفته پیشنهاد نموده است.

لازم بذکر است در تحقیق انجام شده پرکنندگی و روانی بتن در عرض ۵ ثانیه صورت پذیرفت و بتن به مرز  $50cm$  یا  $500mm$  رسید و قطر نهائی ۶۲۰ میلیمتر بود. بتن مورد نظر جز طبقه بندی  $SF2$  قرار گرفت [12].

در شکل ۱ یکی از تصاویر این آزمایش آورده شده است.



شکل ۱- آزمایش T50 و flow slump

## ۴-۲- آزمایش جعبه (*L Box test Method*)

این آزمایش بر اساس یک طرح ژاپنی برای بتن زیر آب (ترمی) بنا نهاده شده است و توسط *Petersson* مورد استفاده قرار گرفته و تشریح شده است. این آزمایش روانی بتن را مورد ارزیابی قرار میدهد و همچنین تا حدی قابلیت انسداد بتن را در برابر میلگردها نشان میدهد. وسیله مورد نظر شامل یک جعبه با مقطع مستطیل و به شکل یک  $L$  میباشد و دارای یک بخش افقی و یک قسمت قائم است که توسط یک دریچه متحرک از یکدیگر جدا شده اند. در جلوی دریچه میلگردهائی بصورت قائم قرار دارد که پس از باز شدن دریچه بتن بخش قائم میتواند از دریچه و میلگردها عبور کرده و به بخش افقی وارد شود. با توقف جریان ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی و بتن باقیمانده بخش قائم بدست می آید و از تقسیم ایندو برهم، شیب بتن در حالت سکون را نشان میدهد و قابلیت عبور از میله ها را به نمایش میگذارد. بخش افقی میتواند در فواصل ۲۰۰ و ۴۰۰ میلیمتری دریچه علامت گذاری شود و زمانهای رسیدن بتن به این نقاط اندازه گیری گردد. این زمانها بعنوان زمان  $T40, T20$  شناخته میشود و مشخصه ای برای قابلیت پر کردن (روانی) است.

### ۴-۲-۱- نحوه آزمایش

حدود ۱۴ لیتر بتن مورد نیاز را که طبق استاندارد نمونه گیری شده است باید مورد استفاده قرار داد. ابتدا وسیله را روی سطح محکم و تراز (افقی) قرار می دهیم. مطمئن شده که دریچه کشویی بخوبی کار میکند و براحتی بالا و پائین میرود و دریچه را می بندیم. داخل قسمت قائم را آب ریخته و دریچه را باز می کنیم تا آب خارج شود و بخش افقی نیز مرطوب گردد. آب را از جعبه خارج کرده، دریچه را بسته و بخش قائم را با بتن پر می کنیم. اجازه می دهیم بمدت یک دقیقه بتن در این قسمت باقی بماند. سپس دریچه را باز کرده تا بتن به بخش افقی وارد شود. همزمان باید کرومومتر را بکار اندازیم و زمان رسیدن بتن به علامت ۲۰۰ و ۴۰۰ میلیمتری اندازه گیری نمائیم وقتی بتن از حرکت باز ماند ارتفاع  $H2, H1$  (در ابتدا و انتهای بتن) را اندازه گیری می نمائیم. نسبت  $H2/H1$  را محاسبه کرده و این نسبت را ضریب انسداد یا نسبت بلوکه شدن مینامیم. تمام آزمایش باید ظرف ۵ دقیقه انجام شود.

## ۴-۲-۲-تایج و تفسیر آزمایش

اگر بتن همچون آب جریان یابد  $H2/H1=1$  میگردد. هر چه بتن نتواند بخوبی جریان یابد و از میلگردها رد شود نسبت مزبور از ۱ فاصله میگیرد. گروه تحقیقات *EU [17]* حداقل نسبت انسداد را  $0/8$  پیشنهاد داده است این نسبت مشخصه ای برای سهولت جریان را نشان میدهد.

در این تحقیق روان شدن بتن با کرنومتر اندازه گیری شد و نسبت  $H2/H1=0.9$  محاسبه گردید. نتیجه بدست آمده در این آزمایش، بتن را در طبقه *PA 2* قرار داد. [12,13].

در شکل ۲ تصویر دیگری از این آزمایش آورده شده است.



شکل ۲- آزمایش *L-Box*

## ۵- ساخت نمونه ها

پس از بدست آوردن مقاومت فشاری بتن، ساخت نمونه ها با استفاده از قالب های استوانه ای  $15 \times 30$ ، بطوری که میلگرد در وسط آن قرار گرفته شده اند انجام شد. قطر میلگردهای *GFRP* استفاده شده در این تحقیق به ترتیب ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر می باشد و برای هر قطر، ۴ نمونه آماده شد که در مجموع ۱۲ نمونه استوانه ای تهیه گردید.

## ۶- بیرون کشیدگی (*Pull out*)

پس از عمل آوری نمونه ها و ۲۸ روز نگه داری در آب، نمونه ها تحت بارگذاری یکنواخت و یک طرفه، توسط دستگاه کشش مستقیم میلگرد که تحمل  $100 \text{ KN}$  فشار را دارد قرار گرفته شد و عمل بیرون کشیدگی میلگردهای *GFRP* از داخل بتن خود تراکم صورت پذیرفت. شکل ۳، دستگاه تست بیرون کشیدگی را در نشان میدهد.



شکل ۳ - دستگاه کشش مستقیم میلگرد

لازم به ذکر است که میلگردها در فاصله  $5d$  از طول میلگرد و استوانه های  $15 \times 30$  دارای چسبندگی بوده اند و مدفون شده بودند. پس برای میلگرد  $GFRP$  با قطر ۸ میلیمتر، چسبندگی  $5d$  از طول مدفون شده از ۳۰ سانتیمتر بوده است، یعنی ۴ سانتیمتر. به همین ترتیب برای میلگرد به قطر ۱۰ میلیمتر، ۵ سانتی متر و میلگرد ۱۲، ۶ سانتی متر چسبندگی ایجاد شده بود.

نمونه های تست آزمایش بیرون کشیدگی در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴ - نمونه های تست بیرون کشیدگی در تحقیق

با استفاده از این آزمایش، از هر تست بیرون کشیدگی، مقدار بیشینه ی نیروی بین میلگردهای  $GFRP$  با قطرهای مختلف را از بتن خود تراکم بدست آمد. همچنین با تعمیم دادن از رابطه زیر، می توان به میانگین تنش چسبندگی میلگردهای  $GFRP$  و بتن خود تراکم برای هر نمونه دست یافت.

$$\tau = \frac{P}{5\pi d^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $\tau$  تنش چسبندگی ( $N/mm^2$ )،  $p$  نیروی کششی ( $N$ )،  $d$  قطر میلگرد ( $mm$ ) و  $f'c$  مقاومت فشاری ( $MPa$ ) است.

در زیر تعدادی از تصاویر نمونه های تست بیرون کشیدگی در این آزمایش را که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته اند مشاهده می فرمائید.



شکل ۵- نمونه تست بیرون کشیدگی میلگرد GFRP



شکل ۶- نمونه تست بیرون کشیدگی GFRP

در جدول زیر نتایج بدست آمده از تست های بیرون کشیدگی ارایه شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش ها

نام نمونه ها	قطر میلگرد	$P_{max}$ (kN)	$\tau_{max}$ (MPa)	$f'_c$ (MPa)
D1	8mm	34	33.83	46
	10mm	23	14.65	
	12mm	40	17.69	
D2	8mm	20	19.90	46
	10mm	15	9.55	
	12mm	31	13.71	
D1	8mm	17	16.91	44
	10mm	14	8.91	
	12mm	35	15.48	
D2	8mm	10	9.52	44
	10mm	11	7	
	12mm	15	8.4	



در طی تست بیرون کشیدگی، مقاومت چسبندگی میان بتن خود تراکم و میلگرد *GFRP* می توان به نتایج زیر رسید که با افزایش قطر میلگرد، مقاومت چسبندگی کمتر می شود. همچنین از تحقیقات به عمل آمده در مورد چسبندگی میلگردهای *FRP* با بتن معمولی، نتیجه گیری شد که میلگردهای ساخته شده از الیاف *FRP* انعطاف پذیری یا تنش تسلیم کمتری نسبت به میلگردهای فولادی دارند. شایان ذکر است که با توجه به آزمایش های انجام شده، مقاومت چسبندگی میلگرد *GFRP* با قطرهای مختلف و بتن خود تراکم، کمتر از مقاومت چسبندگی آن با میلگردهای فولادی با قطرهای مختلف است.

## مراجع

- 1- Hajime Okamura, Masahiro Ouchi, *Self-compacting concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, 2003, 5-15.
- 2- *Self-Consolidating Concrete*, ACI 237R-07, 2007.
- 3- Francesco Focacci, Antonio Nanni, Fellow, ASCE, and Charles E. Bakis. LOCAL BOND-SLIP RELATIONSHIP FOR FRP REINFORCEMENT IN CONCRETE. (2000), JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION / FEBRUARY 2000
- 4- Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R. (1996). "Il calcolo della lunghezza di ancoraggio per barre in plastica fibro-rinforzata (FRP)." *Proc., 11th congresso CTE*, 451-461 (in Italian)
- 5- Greco, C., Manfredi, G., Pecce, M., and Realfonzo, R. (1998). "Experiment al analysis of bond between GFRP deformed rebars and concrete." *Proc., ECCM-8—Eur. Conf. on Compos. Mat., I. Crivelli Visconti, ed., Vol. 2*, 301-308
- 6- Larralde, J., and Silva-Rodriguez, R. (1993). "Bond and slip of FRP. rebars in concrete." *J. Mat. in Civ. Engrg., ASCE*, 5(1), 30-40
- 7- Malvar, L. J. (1995). "Tensile and bond properties of GFRP reinforcing. bars." *ACI Mat. J.*, 92(3), 276-2985.
- 8- Nanni, A., Al-Zaharani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Bakis, C. E., and Boothby, T. E. (1995). "Bond of FRP reinforcement to concrete—Experimental results." *Proc., 2nd Int. RILEM Symp. (FRPRCS-2)—Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Struct., L. Taerwe, ed.,* 135-145
- 9- Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S. ~1995!. "Bond of hooked glass fiber reinforced plastic ~GFRP! reinforcing bars to concrete." *ACI Mater. J.*, 92~4!, 391-400
- 10- Chaallal, O., and Benmokrane, B. (1993). "Pullout and bond of glass fibre rods embedded in concrete and cement grout." *Mat. and Struct.*, 26, 135-145
- 11- Brite Eu Ram Proposal No. BE96-3801. Brite Eu Ram Contract No. BRPR-CT96-0366. Rev. no.: 6.2000-06-30
- 12- *The European Guide lines for Self-compacting concrete Specification, production and Use*, May 2005
- 13- Okamura H., Ozawa K., *Mix Design for Self-Compacting Concrete*, *Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers*, June 25, 1995, p. 107-120