دومین کنفرانس بین‌المللی
بتن و توسعه
۱۰-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۴، تهران، ایران

CD6-004

خصوصیات و ضوابط طرح خمشی و تقویت سازه های بتنی با الیاف پلیمری (FRP)

علی صدر ممتازی[۱]، فرید حاتمی[۲]
۱. استاد یار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

چکیده

چون مدول الاستیسیته و مقاومت کششی الیاف پلیمری با میلگردهای فولادی متفاوت است لذا نمی توان فرمول های کلاسیک در مورد مقاطع مسلح شده با FRP را به کار گرفت. با توجه به ناکافی بودن آرماتورهای فولادی در مقاطع بتن آرمه می توان این مقاطع را با الیاف FRP تقویت نمود. در این مقاله مقطعی مستطیلی که دارای مقاومت خمشی ناکافی است با صفحات FRP تقویت شده است. لنگر اسمی قابل تحمل مقطع تقویت شده در شرایط کلی که صفحه تقویتی در بخش کششی قرار دارد محاسبه شده است. در انتها ضوابط ACI در طرح مقاطع خمشی بتنی مسلح به الیاف پلیمری و نیز مقاطع تقویت شده با الیاف پلیمری آورده شده است. کارهای انجام یافته و روابط ارایه شده توسط محققین می تواند مبنای خوبی برای کارهای آتی باشد.

کلید واژه ها: (الیاف پلیمری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی الیاف،تنش حد نهایی، شکست بتن)

مقدمه

بیش از ۱۰۰ سال است که در صنعت ساختمان، از میلگرد های فولادی به عنوان تسلیح اعضای سازه های بتنی استفاده شده است.فولاد، کاربری مناسبی از خود نشان داده اما در شرایط محیطی مهاجم، به سبب مساله خوردگی فولاد، زوال سازه سریع و مصیبت بار است. برای رویارویی با این مطلب، تلاش های گسترده ای از قبیل استفاده از میلگردهای با پوشش اپوکسی و حفاظت کاتدی، صورت گرفته است. در نهایت، بهره گیری از آرماتورهای FRP، راه مناسبی در حل این معضل شناخته شده زیرا مصالح FRP حتی در محیط های حاوی کلر، خورده نمی شوند. در۲۵ سال اخیر، استفاده از مصالح جایگزین فولاد، برای بتن تحت شرایط خشن محیطی، افزایش یافته است[۱].

برای مصالح معمول مصرفی در ساختمان و ابنیه استاندارد وجود دارد. این استانداردها به ما امکان می دهند که مصالح مصرفی در پروژه های مهندسی ساختمان به خوبی تعریف شده و آزمایشات لازم بر روی آنها انجام پذیرد. تا این زمان استانداردهای لازم برای ویژگی های مصالح FRP که مورد قبول همگان باشد تدوین نشده است. یکی از کارهای انجام شده به منظور استاندارد مصالح کامپوزیتی، توسط موسسه American National Standard for Ladders (ANSI2000) می باشد[۲]. امروزه استفاده از انواع الیاف پلیمری برای کاربردهای مختلف سازه ای گسترش یافته است. این کاربردها شامل:

الف- مقاطع سازه ای برای استفاده در انواع خرپاها، قابها، دالها و پانل های عرشه پلها.

ب- میله ها، آرماتورها و شبکه ها در استفاده مجزا و یا به عنوان آرماتورهای داخلی در اعضای پیش تنیده.

ج- نوارها، تسمه ها، صفحات و پوسته ها برای استفاده مجزا و یا به عنوان آرماتورهای خارجی پیش تنیده برای اعضای بتنی، چوبی، بنایی و فلزی.

د- صفحات، پوسته ها و یا مقاطع قالب شده برای استفاده مجزا ویا به صورت مرکب در قالب بندی های درجا و تسلیح خارجی اعضای بتنی

شناخت مصالح FRP

انواع الیاف پلیمری مورد استفاده در سازه های بتنی و ساختار آنها

اگرچه انواع متفاوتی از الیاف پلیمری در سازه های بتنی مورد استفاده قرار می گیرد، می توان آنها را به دو گروه الیاف میله ای و ورقـه ای شـکل تقسـیم بندی نمود. ساختار این الیاف پلیمری شامل الیاف و ماتریس رزین می باشد. بار اعمال شده به الیاف وارد مـی شـود زیرا الیاف هستند که خصوصیات مکانیکی FRP نظیر مقاومت، مدول الاستیسیته و ... را تشکیل می دهند[۱].

ماتریس رزین ۳ وظیفه اصلی زیر را بر عهده دارد:

الف- انتقال تنش از الیافی به الیاف دیگر.

ب- نگهداری الیاف ها برای عدم جابجایی فیبرها.

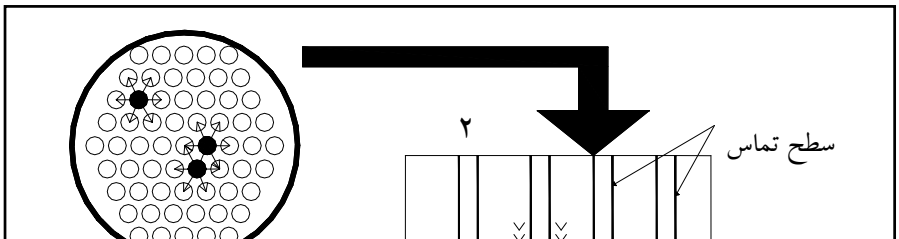
ج- محافظت از فیبرها در مقابل شرایط محیطی مهاجم.

هنگامی که الیافی بشکند، تنش تحملی الیاف شکسته، از طریق سطح تماس به ماتریس رزین منتقل می شود و سپس به دیگر فیبرها منتقل می گردد.

مقایسه خصوصیات الیاف پلیمری با میلگردهای فولادی

جدول(۱) مدول الاستیسیته (E_f) و مقاومت کششی (f_{fu}) سه نوع الیاف پلیمری شامل الیاف کربنی (CFRP)، شیشه ای (GFRP) و آرامید (AFRP) را با مدول الاستیسیته (E_s) و تنش تسلیم (f_y) میلگردهای فولادی مقایسه می نماید[۳].

به طور کلی الیاف پلیمری که در مقاطع بتنی مورد استفاده قرار می گیرند مقاومت کششی بین ۵۰۰ MPa تا ۲۰۰۰ MPa و مدول الاستیسیته ای بین ۴۰ GPa تا ۱۵۰ GPa دارند. این تفاوت ویژگی الیاف پلیمری با میلگردهای فولادی سبب می شود که طراحی مقاطع تقویت شده با الیاف پلیمری متفاوت با مقاطع بتن آرمه معمولی باشد.



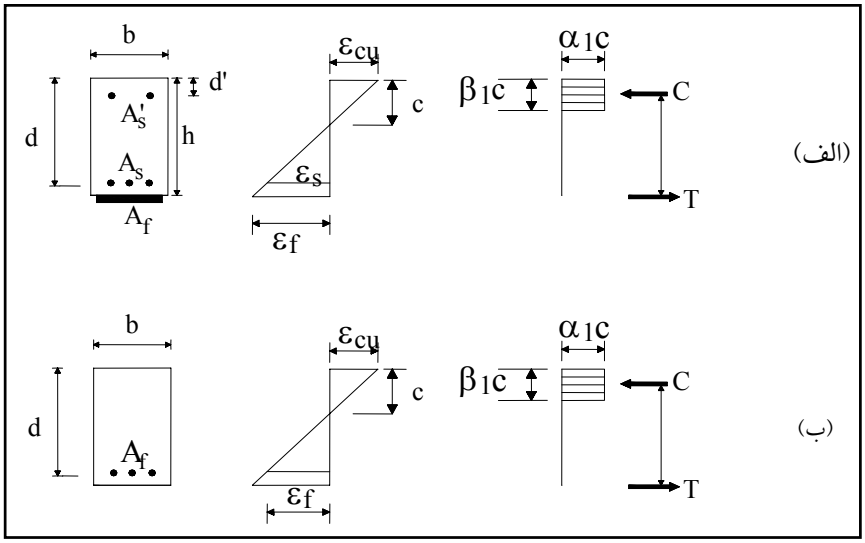
شکل۱- ساختار الیاف پلیمری (الیاف- ماتریس رزین)

جدول۱- مقایسه خصوصیات الیاف پلیمری با میلگردهای فولادی

Reinforcement	E_s یا E_f (GPa)	f_y یا f_{fu} (MPa)
Glass (GFRP)	۴۰	۵۵۰
Aramid (AFRP)	۸۰	۱۲۰۰
Carbon (CFRP)	۱۵۰	۲۰۰۰
Steel	۲۰۰	۴۰۰

مقاومت خمشی تیرهای بتنی با الیاف پلیمری

بـا اسـتفاده از تعـادل تـنش ها، روابط سازگاری کرنش و مدهای خرابی مقطع می توان ظرفیت خمشی مقطع یک تیر بتنی با الـیاف پلـیمری را از روش تحلـیل حـد نهایـی بدسـت آورد. رفـتار غـیر خطی تنش- کرنش بتن را نیز می توان با بلوک تنش مستطیلی معادل جایگزین نمود. الیاف پلیمری به دو صورت میله ای یا ورقه ای می تواند در مقطع استفاده میشود (شکل۲).



شکل۲- استفاده از الیاف میله ای و ورق پلیمری (الف) و (ب) در مقطع تیر بتنی و روش تحلیل حد نهایی

انهدام یک تیر بتنی با الیاف پلیمری در مقطع، تحت اثر لنگر خمشی، می تواند ناشی از هر یک از مدهای خرابی زیر باشد:

الف- خرد شدن بتن در ناحیه فشاری

ب- رسیدن میلگردهای فولادی به حد تسلیم به همرا خرد شدن بتن در ناحیه فشاری.

ج- جدا شدن ورق الیاف از بتن یا از بین رفتن پوشش بتنی الیاف میله ای.

د- شکست الیاف پلیمری

بـر این اساس تحقیقات گسترده ای در زمینه تعیین ظرفیت خمشی آنها صورت گرفته است[۴،۵،۶و۷]. می توان در حالت کلی لـنگر اسـمی قـابل تحمـل مقطع را برای حالت (الف) شکل(۲) به صورت زیر تعیین نمود. ارتفاع بلوک معادل را ۰/۹ فاصله تار خنثی می توان در نظر گرفت[۴].

$$C = 0.85 f'_c ab + A'_s f_y \quad (۱)$$

$$T = A_f f_{fu} + A_s f_y \quad (۲)$$

$$C = T \Rightarrow a = \frac{(A_s - A'_s) f_y + A_f f_{fu}}{0.85 f'_c b} \quad (۳)$$

$$M_n = A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - \frac{a}{2}) + A_f f_u (h - c) \quad (۴)$$

$$a = 0.9c \quad (۵)$$

جدول (۲) ابعاد مقطع و مشخصات مصالح و لنگر اسمی مقطع را نشان می دهد. افزودن ورق تقویتی FRP، سبب افزایش ۸/۵ ٪ در لنگر اسمی مقطع می شود.

جدول۲- ابعاد مقطع و مشخصات مصالح

b(cm)	h(cm)	d(cm)	d'(cm)	As(cm2)
۲۵	۴۰	۳۵	۵	۳۰
A's(cm2)	**Af(cm2)**	**f'c(MPa)**	**fy(MPa)**	**fu(MPa)**
۸	۲۰	۲۸	۴۲۰	۲۰۰

لنگر قابل تحمل با حضور ورق تقویتی FRP (KN.m)	لنگر قابل تحمل بدون حضور ورق تقویتی FRP (KN.m)
۳۸۲/۵	**۳۵۲/۵**

ضوابط ACI در طرح خمشی مقاطع بتنی با الیاف پلیمری FRP

اگـر الـیاف پلـیمری در اثر تنش های ناشی از خمش گسیخته گردد شکست عضو آنی و غیر منتظره خواهد بود. لذا لازم است محدودیـت های هشدار دهنده ای قبل از گسیختگی الیاف به صورت بزرگی خیز تیر و گشترش ترک در نظر گرفته شود. چون عضو هیچ گونه رفتار پلاستیک قبل از شکست از خود نشان نمی دهد. ازاین رو ضریب ایمنی در برابر شکست بیشتر از طراحی بتن مسلح یا فولاد معمولی است[۶و۷].

فاکتورφ

اگـر شکسـت بتـن کنـترل کننده باشد، فاکتور کاهش مقاومت (φ) ۰/۷ مناسب است. پیشنهاد می شود که اگر شکست الیاف پلـیمری کنـترل کنـنده است ضریب φ به ۰/۵ کاهش یابد. اگر پکیدن بتن بر پایه محاسبات قابل پیشبینی باشد، سازه منهدم نمـی شـود. مـثلاً اگـر مقاومـت بتن بیشتر از مقدار مشخص باشد، عضو به سبب گسیختگی الیاف پلیمری، منهدم می شود. به همیـن سـبب، و بـه منظور برقراری ارتباط خطی بین دو مقدار φ، یک مقطع کنترلی با شکست بتن به صورت مقطعی تعریف مـی شـود که نسبت تقویت آرماتور ρ_f، بزرگتر یا مساوی ۱/۴ برابر نسبت تقویت توازن، ρ_{fb} و یک مقطع کنترلی به صورت شکست الیاف FRP که در آن $\rho_{fb} > \rho_b$ می باشد تعریف می گردد[۶و۷].

حداقل تقویت

همچنین اگر الیاف پلیمری در عضو شکسته شود یک مقدار مینیمم تقویت $A_{f,\min}$، باید برای جلو گیری از ترک خوردگی بتن ($\varphi M_n \geq M_{cr}$ که M_{cr} گشتاور ترک خوردگی است) پیش بینی شود. که این مقدار مینیمم با ضرب معادله حدی موجود برای فولاد در ACI318 در عدد ۱/۸ بدست می آید (۱/۸ مقدار دو نسبت ۰/۹و ۰/۵ برای φ می باشد.) [۶و۷].

پهنای ترک

برای اعضای تقویت شده با FRP، پهنای ترک می تواند از عبارت نشان داده شده در ACI318 به اضافه یک ضریب اصلاحی، k_b، برای کیفیت پیوستگی محاسبه شود. k_b ضریبی است که درجه پیوستگی بین الیاف پلیمری و بتن اطراف را در نظر می گیرد. برای میله های FRP، با رفتار پیوستگی شبیه میله های فولادی، k_b برابر ۱ در نظر گرفته می شود. وقتی این ضریب ناشناخته است، مقدار ۱/۲ برابر تغییر شکل پذیری میله های FRP را در نظر می گیریم[۶و۷].

ضوابط ACI در تقویت خمشی مقاطع بتنی با الیاف پلیمری FRP

این دستور العمل برای محاسبه اثر مقاومت خمشی اضافه نمودن الیاف پلیمری به عنوان تقویت کننده در قسمت کششی مقطع مستطیلی می باشد. ظرفیت خمشی اسمی مطابق ACI 318 محاسبه می شود. یک فاکتور کاهنده اضافی Ψ_f به ظرفیت خمشی الیاف تقویتی FRP که ناشی از قابلیت اعتماد آن است اعمال می شود. تراز تغییر شکل در الیاف پلیمری در حد نهایی لازم است که تعیین و محدود به مقداری بالاتر و برابر $k_m\varepsilon_{fu}$ شود. k_m ضریبی کمتر از ۰/۹ می باشد. این ضریب مربوط به محدود کردن تغییر شکل در تقویت FRP برای جلوگیری از عدم پیوستگی یا ورقه ورقه شدن می باشد. این ضریب مشخص می کند که ورقه های بزرگتر از سختی محوری (یعنی مدول الاستیسیته ایجاد شده توسط سطح مقطع عرضی) بیشتر در معرض ورقه ورقه شدن هستند. این ضریب بر اساس تجربه مهندسینی می باشد که طرح سیستم های FRP را اجرا می کنند[۷و۸].

فاکتور φ

ضریب کاهش مقاومت به تغییر شکل فولاد در حد نهایی، ε_s بستگی دارد. φ برای مقاطع شکل پذیر ($\varepsilon_s \geq$ ۰/۰۰۵) ۰/۹ و برای مقاطع شکننده که هنوز فولاد به جاری شدن نرسیده است ۰/۷ می باشد. یک تبدیل خطی بین بین این دو مقدار نهایی وجود دارد[۷و۸].

تنش حدی

برای اجتناب از شکل پذیری های خمیری تقویت فولادی موجود باید از جاری شدن در ترازهای بار سرویس جلوگیری شود. تنش در فولاد در حالت سرویس باید به ۸۰٪ تنش جاری شدن محدود گردد[۷و۸].

نتیجه گیری

با توجه به تنوعی که مصالح FRP دارند، به طور وسیعی در مقاطع سازه ای مثل خرپا، قابها و ...، نوارها، تسمه ها، صفحات و یا به صورت قالب بندی درجا برای تسلیح انواع سازه ها به کار می روند. مقایسه خصوصیات این الیاف با میلگردهای فولادی نشان می دهد که طراحی مقاطع مسلح و تقویت شده با الیاف پلیمری متفاوت با مقاطع بتن آرمه فولادی می باشد. فرمول های ارائه شده با توجه به ضرایب پیشنهادی می تواند مبنای خوبی برای کارهای آینده باشد.

مراجع

1. T.Uomoto, "Durability of FRP Reinforcement as Concrete Reinforcement", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001, Vol.1, pp.85-96
2. L.C.Bank, T.R.Gentry, B.P.Thompson, J.S.Russell, "A Model Specification FRP Composites for Civil Engineering Structures", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001, Vol.1, pp.3-14
3. J.Newhook, A.Ghali, G.tadros, "Concrete flexural members reinforced with fiber reinforced polymer: Design for cracking and deformability", 2002, Can. J. Civ. Eng., Vol.29, pp.125-134
4. D.B.Tann, J.K.C.Shin, R.Delpak and E.Andreo, "Optimum Design Approach FRP Strengthening of RC Elements in Flexure", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001, Vol.1, pp.475-490
5. K.Maruyama and T.Ueda, "JSCE Recommendation for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001, Vol.1, pp.475-490
6. B.Talljesten, "Design Guidelines – A Scandinavian Approach", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001, Vol.1, pp.153-164
7. American Concrete Institute-Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP rebars, ACI 440.IR-01. Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2001
8. American Concrete Institute-Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures, ACI 440.IR-Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2001