



دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

تحلیل رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده توسط نوارهای کامپوزیتی
CFRP با استفاده از تکنیک NSM

توسط:

حمید یدالهی عمران

استاد راهنما:

دکتر محمدزمان کبیر

پاییز 1386



بسمه تعالی
فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
معاونت پژوهشی

تاریخ:.....
پیوست:.....

| | | | |
|---|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| نام و نام خانوادگی: حمید یدالهی عمران | دانشجوی: آزاد | بورسیه | معادل |
| شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۴۰۱۱ | دانشکده: مهندسی عمران و محیط زیست | رشته تحصیلی: مهندسی سازه | |
| نام و نام خانوادگی استاد راهنما: دکتر محمدزمان کبیر | | | |
| عنوان پایان نامه به فارسی: تحلیل رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده توسط نوارهای کامپوزیتی CFRP با استفاده از تکنیک NSM | | | |
| عنوان پایان نامه به انگلیسی: Study of Near Surface Mounted (NSM) Technique for Strengthening of RC Beams Using CFRP Strips | | | |
| نوع پروژه: | کارشناسی ارشد دکترا | کاربردی | بنیادی |
| | | توسعه‌ای | نظری |
| تاریخ شروع: ۱۳۸۵/۷/۱ | تاریخ خاتمه: ۱۳۸۶/۱۲/۰۵ | تعداد واحد: ۶ | سازمان تامین کننده اعتبار: ----- |
| واژه‌های کلیدی به فارسی: مقاوم سازی، الیاف کامپوزیت، عملکرد خمشی، عملکرد برشی، چسب، تیر بتن مسلح | | | |
| واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Strengthening, Composite Fiber, Flexural, Shear, Bond, RC Beams | | | |
| نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه: استاد راهنما: دانشجو: | | | |
| امضاء استاد راهنما: | | تاریخ: | |
| نسخه ۱: معاونت پژوهشی نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی | | | |

فهرست مطالب

فصل اول. مقدمه 1 تا 19

- 1-1- نیاز به مقاوم سازی..... 1
- 2-1- مهمترین دلایل ترمیم و تقویت سازه..... 3
- 3-1- اجزای تشکیل دهنده FRP..... 3
- 4-1- برخی از انواع فایبر ها..... 4
- 1-4-1- الیاف کربن..... 4
- 2-4-1- الیاف شیشه..... 5
- 3-4-1- الیاف آرامید..... 5
- 5-1- اشکال مختلف FRP در مهندسی عمران..... 5
- 1-5-1- انواع پوشش های FRP بر اساس نحوه تولید..... 7
- 6-1- مهمترین روشهای ترمیم سازه بتنی..... 8
- 7-1- انواع تقویت خمشی با FRP..... 10
- 8-1- مزایا و معایب روش NSM..... 11
- 1-8-1- برخی از مزایای FRP نسبت به فولاد در مقاوم سازی NSM..... 11
- 2-8-1- تعدادی از مزایای روش NSM در مقایسه با روش EB..... 11
- 9-1- تاریخچه روش NSM..... 13
- 10-1- نحوه اجرای تکنیک NSM..... 15
- 11-1- مصالح مورد استفاده در روش NSM..... 17
- 1-11-1- مسلح کننده های FRP..... 17
- 2-11-1- پرکننده های شیار..... 19

فصل دوم. مطالعات پیشینان 20 تا 36

- 1-2- رفتار اتصال..... 20
- 1-1-2- روش های انجام آزمایش اتصال..... 21

- 22-1-2- مددهای گسیختگی اتصال در روش NSM.....
- 25-3-1-2- مدل های اتصال در روش NSM.....
- 30-2-2- مقاوم سازی خمشی.....
- 31-1-2-2- مددهای گسیختگی خمشی تیرهای مقاوم سازی شده.....
- 32-2-2-2- انواع مددهای شکست خمشی ناشی از جداشدگی.....

فصل سوم. مطالعه تحلیلی و حل ریاضی عملکرد تیغه های NSM در تیر های بتن مسلح 37 تا 68

- 37-1-3- تعیین نمودار بار - تغییر شکل تیر مقاوم سازی شده به روش NSM.....
- 37-1-1-3- مقدمه.....
- 39-2-1-3- نحوه تعیین نمودار بار - تغییر شکل.....
- 51-2-3- تعیین تابع تنش برشی.....
- 51-1-2-3- تعیین معادله دیفرانسیل تنش برشی.....
- 56-2-2-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت خمش سه نقطه ای در ناحیه قطع FRP.....
- 58-3-2-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت خمش چهار نقطه ای در ناحیه قطع FRP.....
- 60-4-2-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت بار گسترده در ناحیه قطع FRP.....
- 62-3-3- تعیین تابع تنش برشی در محل ترک خوردگی.....
- 63-1-3-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت خمش سه نقطه ای در ترک خوردگی.....
- 65-2-3-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت خمش چهار نقطه ای در ترک خوردگی.....
- 66-3-3-3- تعیین تابع تنش برشی برای تیر تحت بار گسترده در ترک خوردگی.....

فصل چهارم. مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود 69 تا 79

- 69-1-4- مقایسه نمودار بار - تغییر شکل با نتیجه آزمایش (Teng et al., 2006).....
- 71-2-4- مقایسه نمودار بار - تغییر شکل با نتیجه آزمایش (Barros and Fortes, 2005).....
- 75-3-4- مقایسه نمودار بار - تغییر شکل با نتیجه آزمایش (Taljsten et al., 2003).....
- 76-4-4- مقایسه تنش برشی در نقطه قطع نوار CFRP.....

فصل پنجم. مدل سازی عددی تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده به روش NSM توسط ANSYS 80 تا 97

- 80-1-5- المان های مورد استفاده.....
- 80-1-1-5- المان Solid 65.....

| | | |
|---------|------------------------------------|-------------|
| 81..... | Solid 45 | 2-1-5-المان |
| 82..... | Link8 | 3-1-5-المان |
| 83..... | مشخصات هندسی تیرهای مدلسازی شده | 2-5 |
| 87..... | مشخصات مصالح مورد استفاده در نمونه | 3-5 |
| 87..... | بتن | 1-3-5 |
| 87..... | آرماتور فولادی | 2-3-5 |
| 88..... | CFRP | 3-3-5-نوار |
| 88..... | EPOXY | 4-3-5-چسب |
| 89..... | نحوه مدلسازی | 4-5 |

فصل ششم. بررسی نتایج عددی و مقایسه آن با نتایج تحلیلی و مطالعات پارامتری 98 تا 124

| | | |
|----------|---|-----|
| 98..... | ابعاد نمونه و مشخصات مصالح | 1-6 |
| 100..... | مطالعه و مقایسه نمودار بار - تغییر شکل حاصل از حل تحلیلی و عددی | 2-6 |
| 105..... | مطالعه و مقایسه تنش برشی حاصل از حل تحلیلی و عددی | 3-6 |
| 115..... | مقایسه تنش برشی و نرمال در روش NSM و EB | 4-6 |
| 118..... | مقایسه جایگذاری نامتقارن شیار مقاوم سازی با حالت متقارن | 5-6 |
| 121..... | نحوه تعیین بار نهایی و مد گسیختگی با در نظر گرفتن جداشدگی | 6-6 |

فصل هفتم. نتیجه گیری 126 تا 128

| | | |
|----------|--|-----|
| 126..... | نتایج حاصل از مقایسه نمودار بار - تغییر شکل | 1-7 |
| 127..... | نتایج حاصل از مقایسه تنش برشی توسط حل تحلیلی و عددی | 2-7 |
| 127..... | نتایج حاصل از مقایسه تنش برشی و نرمال در روش NSM و EB | 3-7 |
| 128..... | نتایج حاصل از مقایسه جایگذاری نامتقارن شیار با حالت متقارن | 4-7 |
| 128..... | نتایج حاصل از نحوه تعیین بار نهایی با در نظر گرفتن جداشدگی | 5-7 |

| | |
|----------|-------|
| 129..... | مراجع |
|----------|-------|

لیست علامتها

| | |
|-------------------------------|--|
| A_c | مساحت مقطع بتنی |
| A_{eff} | مساحت مقطع موثر |
| A_f | سطح مقطع FRP |
| A_s | سطح مقطع آرماتورهای فولادی کششی |
| A'_s | سطح مقطع آرماتورهای فولادی فشاری |
| A_{trc} | مساحت مقطع مقاوم نشده تبدیل یافته تیر بتنی |
| b | عرض مقطع تیر بتنی |
| c | عمق تار خنثی |
| C_c | نیروی فشاری در بتن |
| C_s | نیروی محوری در آرماتور فولادی فشاری |
| $C_1 \text{ \& } C_2$ | ثوابت معادلات دیفرانسیل تنش برشی در ناحیه قطع FRP |
| $C_{1cr} \text{ \& } C_{2cr}$ | ثوابت معادلات دیفرانسیل تنش برشی در ناحیه ترک خوردگی |
| d_f | عمق تا مرکز سطح آرماتورهای CFRP |
| d_s | عمق تا مرکز سطح آرماتورهای فولادی کششی |
| d'_s | عمق تا مرکز سطح آرماتورهای فولادی فشاری |

| | |
|-----------|--|
| E_a | مدول الاستیسیته چسب اپوکسی |
| E_c | مدول الاستیسیته بتن |
| E_f | مدول الاستیسیته نوار CFRP |
| EI | سختی خمشی تیر |
| E_s | مدول الاستیسیته آرماتور فولادی |
| f_{au} | مقاومت کششی چسب اپوکسی |
| f_c | مقاومت فشاری بتن (نمونه استوانه ای) |
| f_{fu} | مقاومت کششی نوار CFRP |
| f_r | مقاومت کششی بتن |
| f_y | تنش تسلیم آرماتور فولادی |
| G_a | مدول برشی چسب اپوکسی |
| h | ارتفاع مقطع تیر بتنی |
| h_f | پهنای نوار CFRP |
| I_{cr} | ممان اینرسی مقطع ترک خورده |
| I_{eff} | ممان اینرسی موثر مقطع |
| I_f | ممان اینرسی نوار CFRP |
| I_{gt} | ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته ترک نخورده تیر |
| I_{trc} | ممان اینرسی مقطع مقاوم نشده تبدیل یافته تیر بتنی |
| L | نصف طول جایگذاری نوار NSM |

| | |
|-------------------|---|
| L_{cr} | فاصله بین محل ترک تا نقطه قطع نوار CFRP |
| l_n | طول دهانه آزاد تیر |
| l_0 | فاصله بین نقطه قطع نوار CFRP تا تکیه گاه مجاور |
| L_p | فاصله بین محل اثر بار متمرکز تا نقطه قطع نوار CFRP |
| M | ممان |
| M_c | ممان وارده به مقطع بتن مسلح تنها |
| M_{cr} | ممان ترک خوردگی مقطع |
| M_f | ممان وارده به نوار FRP |
| M_{total} | ممان وارده به مقطع |
| M_u | ظرفیت خمشی مقطع |
| M_y | ممان متناظر با تسلیم میلگرد فولادی کششی در مقطع |
| n | نسبت مدول الاستیسیته آرماتور فولادی به بتن |
| N_c | نیروی محوری روی مقطع بتنی |
| n_f | نسبت مدول الاستیسیته نوار CFRP به بتن |
| N_f | نیروی محوری نوار CFRP |
| N_s | نیروی محوری در آرماتور فولادی کششی |
| P | بار متمرکز |
| $P_{c-debonding}$ | بار متناظر با جداسازی در اثر کسختگی برشی بتن در محل قطع نوار CFRP |
| P_{cfrrup} | بار متناظر با گسیختگی نوار CFRP |

| | |
|-------------------|--|
| P_{cons} | بار متناظر با خردشدگی بتن فشاری در مقطع مقاوم شده |
| P_{conuns} | بار متناظر با خردشدگی بتن فشاری در ناحیه مقاوم نشده از طول تیر |
| P_{cr} | بار متناظر با ترک خوردگی (مجموع بارهای متمرکز وارد بر تیر) |
| $P_{i-debonding}$ | بار متناظر با جداشدگی در اثر کسپختگی برشی بتن در ترک خوردگی |
| P_{sy} | بار متناظر با تسلیم میلگرد طولی کششی |
| q | بار گسترده |
| R | نسبت سختی خمشی مقطع بتنی به سختی خمشی نوار CFRP |
| R_A | عکس العمل تکیه گاهی |
| t_a | ضخامت چسب روی پهنای نوار CFRP |
| t'_a | ضخامت چسب روی ضخامت نوار CFRP |
| t_f | ضخامت نوار CFRP |
| u | بردار تغییر مکان در جهت طول تیر |
| u_c | تغییر مکان افقی بتن اطراف چسب |
| u_f | تغییر مکان افقی FRP |
| V_a | ضریب پواسن چسب اپوکسی |
| V_c | ضریب پواسن بتن |
| V_f | ضریب پواسن نوار CFRP |
| V_s | ضریب پواسن آرماتور فولادی |
| V_{total} | برش وارده به مقطع |

| | |
|-----------------|--|
| w | بردار تغییر مکان در جهت عرض تیر |
| x | فاصله از نقطه قطع نوار CFRP به طرف وسط دهانه |
| x_1 | فاصله بین تکیه گاه و مقطعی که در آن ممان وارده برابر با ممان ترک خوردگی مقطع می گردد |
| x_2 | فاصله بین تکیه گاه و مقطعی که در آن ممان وارده برابر با ممان تسلیم مقطع می گردد |
| x_3 | فاصله بین تکیه گاه و مقطعی که در آن نیاز است تا تغییر شکل محاسبه گردد |
| \bar{y}_{C_c} | فاصله محل اثر C_c از تار خنثی |
| y_{eff} | مرکز سطح موثر |
| \bar{y}_{gt} | مرکز سطح مقطع ترک نخورده تیر |
| y_{trc} | مرکز سطح مقطع مقاوم نشده تبدیل یافته تیر بتنی |
| ϵ_{au} | کرنش نهایی کششی چسب اپوکسی |
| ϵ_c | کرنش بتن در دورترین تار فشاری |
| ϵ_{cu} | کرنش نهایی فشاری بتن |
| ϵ_f | کرنش نوار CFRP |
| ϵ_{fu} | کرنش نهایی کششی نوار CFRP |
| ϵ_o | کرنش نقطه اوج بتن در نمودار تنش-کرنش |
| ϵ_s | کرنش آرماتور فولادی کششی |
| ϵ'_s | کرنش آرماتور فولادی فشاری |
| ϵ_y | کرنش تسلیم آرماتور فولادی |
| τ_a | تنش برشی بین وجهی در ناحیه قطع نوار CFRP |

| | |
|-------------------|--|
| τ_{acr} | تنش برشی بین وجهی در ناحیه ترک خورده |
| τ_{amax} | تنش برشی نهایی مجاز چسب اپوکسی |
| τ_{au} | مقاومت برشی چسب اپوکسی |
| $\tau_{c-crack}$ | تنش برشی نهایی مجاز بتن در ناحیه ترک خورده میانی |
| $\tau_{c-cutoff}$ | تنش برشی نهایی مجاز بتن در ناحیه قطع نوار CFRP |
| σ_f | تنش در نوار CFRP |
| Δ | تغییر شکل تیر |
| φ | انحنای |
| γ | کرنش برشی در چسب |

فصل اول

مقدمه

1-1- نیاز به مقاوم سازی

بتن یک مصالح ساختمانی با مقاومت فشاری بالاست که در کشش ضعیف است. یک سازه بدون آرماتور، هنگامی که با یک بار نسبتاً کوچک مواجه شود ترک خورده و می شکند. شکست در اکثر موارد ناگهان و به صورت یک رفتار ترد اتفاق می افتد. برای افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری نیاز است تا سازه مسلح شود. این کار اکثراً توسط میلگردهای فولادی انجام می گردد که قبل از بتن ریزی در سازه قرار می گیرند. از آن جهت که سازه بتنی عمر طولانی دارد خواسته‌ها و تقاضاها از سازه معمولاً با زمان تغییر می کند. سازه ممکن است مجبور باشد در آینده بار بزرگتری تحمل کند و یا با استانداردهای جدیدی مطابقت کند. در موارد حاد، یک سازه ممکن است نیاز به تعمیر به خاطر تصادف داشته باشد. دلیل دیگر خطاهای ایجاد شده در طول طراحی یا فاز ساخت می باشد. تا آنجا که سازه، قبل از اینکه بتوان از آن استفاده نمود، نیاز به مقاوم سازی داشته باشد.

در دهه گذشته، بحث رو به زوال گذاشتن بناهای اساسی یک موضوع مهم و بحرانی در آسیا، امریکا و اروپا بوده است. برای مثال از بین رفتن عرشه‌ها و ستون‌های پل‌ها به دلایل کهنه‌گی و عوامل خوردنده محیطی، می تواند موجب تنزل این بناها به بناهای اولیه ضعیف و فاقد اهمیت شود. بیشتر هزینه‌های مرتبط با

تعمیر و بازسازی چنین اعضای سازه ای، نتیجه از دست دادن تولید و در حالت کلی اقتصاد مرتبط با زمان و منابع است، که توسط تأخیر و اشتباه ایجاد می شود. برای اینکه سازه سطح عملکرد و بهره دهی خود را در طی زمان حفظ کند، نیاز است تا در فواصل زمانی از پیش تعیین شده تعمیر شود. در مواردی که سطح عملکرد بالاتری نیاز باشد بهسازی لازم است.

سطح عملکرد به معنی ظرفیت باربری، پایایی، عملکرد یا زیبایی ظاهری است. بهسازی به معنی مقاوم سازی، افزایش پایایی و تغییر عملکرد یا بهبود زیبایی ظاهری می باشد (Taljsten et al., 2003).

نگهداری، تعمیر و مقاوم سازی سازه های بتنی قدیمی به طور فزاینده ای رواج یافته است. مشکلاتی در تشخیص روش مناسب برای یک موضوع واقعی وجود دارد. انتخاب یک روش تعمیر یا روش مقاوم سازی نامناسب حتی عملکرد سازه را بدتر می کند. در مقایسه با ساختن یک سازه جدید، مقاوم سازی یک سازه موجود اغلب پیچیده تر است، به این علت که، شرایط سازه ای قبلاً کار گذاشته شده است. به علاوه، همیشه دست یافتن به سطوحی که نیاز به مقاوم سازی دارد آسان نیست، اغلب محدودیت فضا نیز وجود دارد. روش های قدیمی از قبیل، انواع مختلف لایه های مسلح، کابل های شاتکریت یا پس کشیده قرار داده شده در خارج سازه، معمولاً احتیاج به فضای زیادی دارند.

در سال های اخیر روش تعمیر توسط چسباندن صفحه نشان داد که برای بسیاری از مسائل مقاوم سازی موجود در صنعت ساختمان سازی این روش قابل اجراست. شیت ها و صفحات نازک نیاز به فضای زیادی ندارد و به عنوان عضو مرکب تقویت کننده، مورد استفاده قرار می گیرد. چسبی که برای چسباندن پوشش ها یا لمینیت (Laminate) به سطح بتن استفاده می شود یک چسب اپوکسی دو ترکیبه است.

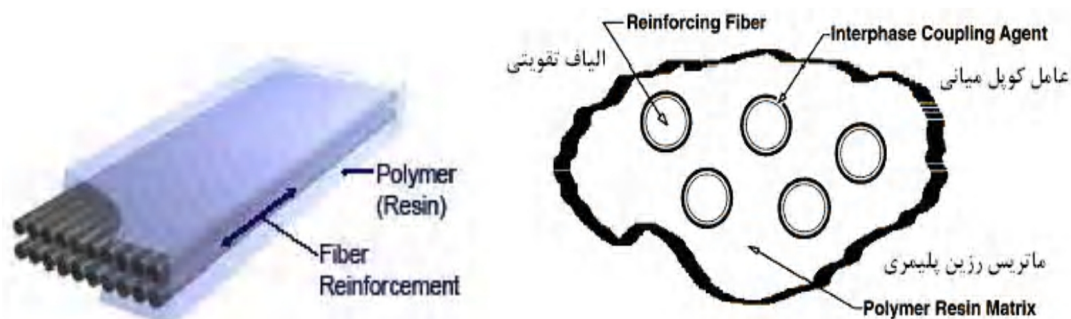
سازه قدیمی و مصالح جدید چسبیده به آن یک عضو سازه ای ایجاد می کنند که مقاومت و سختی بزرگتری نسبت به سازه اولیه دارد. بیشتر موارد رایج برای مقاوم سازی سازه ها برای مقاوم سازی خمشی و تعیین مقدار آن است اما مقاوم سازی برشی نیز اغلب نیاز است. اکثر روش های رایج شامل قرار دادن شیت ها یا لمینیت ها، به صورت پوشش خارجی، بر روی سطح بتنی سازه است. با این وجود، قرارگیری تیغه های کامپوزیتی در پوشش بتنی سازه تحت روش جایگذاری نزدیک سطح، Near Surface Mounted (NSM)، قابل اجرا و مناسب می باشد.

2-1- مهمترین دلایل ترمیم و تقویت سازه

- افزایش ظرفیت باربری سازه به علت تغییر کاربری و یا افزایش بار.
- بازنگری و به روز شدن آیین‌نامه‌های طراحی.
- خطا در فاز طراحی و فاز ساخت.
- خوردگی و یا گذشت زمان.
- آسیب‌های محیطی مثل زلزله.
- مشکلات اجرایی در آرماتورگذاری و مشکلات معماری.

3-1- اجزای تشکیل دهنده FRP

ماده Fiber Reinforced Polymer (FRP) از دو جزء اساسی تشکیل می‌شود: فایبر (الیاف) و ماتریس (رزین یا ماده چسباننده) (شکل 1-1). فایبر اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم است و جزء اصلی باربر در ماده FRP محسوب می‌شود. بسته به نوع فایبر قطر آن در محدوده 1 تا 100 میکرومتر می‌باشد (Jones, 1999). ماتریس اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، ماتریس با مقاومت کم به صورت چشم‌گیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت، نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی، اثر نمی‌گذارد.



شکل 1-1- اجزای تشکیل دهنده ماده کامپوزیت (الیاسیان، 2003)

ماتریس را می توان از مخلوط های ترموست ویا ترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس های ترموست با اعمال حرارت سخت شده، و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی آید. در حالی که، رزین های ترموپلاستیک را می توان با اعمال حرارت مایع نمود و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. به عنوان نمونه هایی از رزین های ترموست می توان به پلی استر، وینیل استر و اپوکسی، و نمونه هایی از رزین های ترموپلاستیک به پلی وینیل کلرید (PVC)، پلی اتیلن و پلی پروپیلن (PP)، اشاره نمود. در جدول 1-1 خصوصیات چند نوع از رزین های ترموست آمده است.

جدول 1-1- خصوصیات مصالح ماتریس (Nordin, 2003)

| Material | Density [kg/m ³] | Tensile strength [MPa] | Tensile modulus [GPa] | Failure strain [%] |
|-----------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Polyester | 1000-1450 | 20-100 | 2,1-4,1 | 1,0-6,5 |
| Epoxy | 1100-1300 | 55-130 | 2,5-4,1 | 1,5-9,0 |

فایبر ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب با نام های GFRP, CFRP, AFRP, VFRP شناخته می شود.

1-4-4- برخی از انواع فایبر ها

1-4-4-1- الیاف کربن

الیاف کربن دارای مدول الاستیسیته 200 - 800 Gpa و کرنش نهایی 0.3% - 2.5% می باشد (Nordin, 2003). این الیاف آب جذب نمی کند و در برابر بسیاری از محلول های شیمیایی مقاوم است. الیاف کربن بسیار خوب در برابر فرسودگی مقاومت می کند، زنگ نمی زند، خزش و وارفتگی از خود نشان نمی دهد و از لحاظ الکتریکی رسانا است.

1-4-2- الیاف شیشه

الیاف شیشه به طور قابل ملاحظه ای ارزان تر از الیاف کربن و آرامید است. بنابراین، در بسیاری از کاربردها رایج است برای مثال در صنعت کشتی سازی و قایق سازی. مدول الاستیسیته الیاف شیشه بین 70-85 GPa و کرنش نهایی آن، بسته به کیفیت الیاف، بین 2%-5% می باشد (Nordin, 2003). الیاف شیشه به رطوبت حساس است اما با انتخاب مناسب ماتریس می توان از الیاف محافظت نمود. فایبرهای شیشه در چهار دسته طبقه بندی می شود (جعفرزاده، 1381):
S-Glass , Z-Glass , A-Glass , E-Glass

1-4-3- الیاف آرامید

آرامید اسم اختصار Aromatic Polyamide است. مدول الاستیسیته الیاف آرامید 70-200 GPa و کرنش نهایی آن، بسته به کیفیت الیاف، بین 1.5%-5% می باشد (Nordin, 2003). آرامید دارای انرژی شکست بالاست. بنابراین، در ساخت کلاه های ایمنی، در صنایع نظامی و غیره کاربرد دارد. الیاف آرامید به دماهای بالا، رطوبت و اشعه ماوراء بنفش حساس است از این رو در مهندسی عمران کاربرد وسیع ندارد. نوع تجاری شناخته شده الیاف آرامید کولار (Kevlar) است اما انواع دیگری هم وجود دارد از جمله: SVM, Technora, Twaron. چهار نوع کولار وجود دارد که از بین آنها کولار 49 برای مسلح کردن بتن، تولید و طراحی شده است. در شکل 1-2، نمودار تنش کرنش برای الیاف های مختلف و در جدول 1-2، مشخصات نمونه ای از فابریک ها مقایسه شده است.

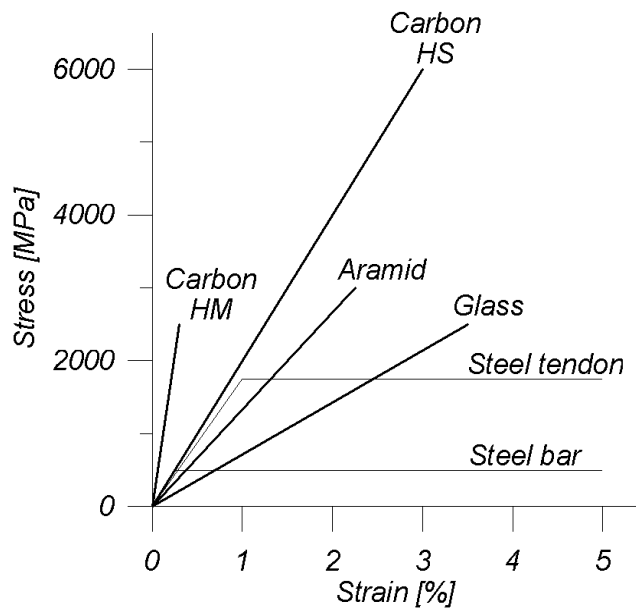
1-5- اشکال مختلف FRP در مهندسی عمران

- پوشش های FRP
- میله ها و مقاطع FRP

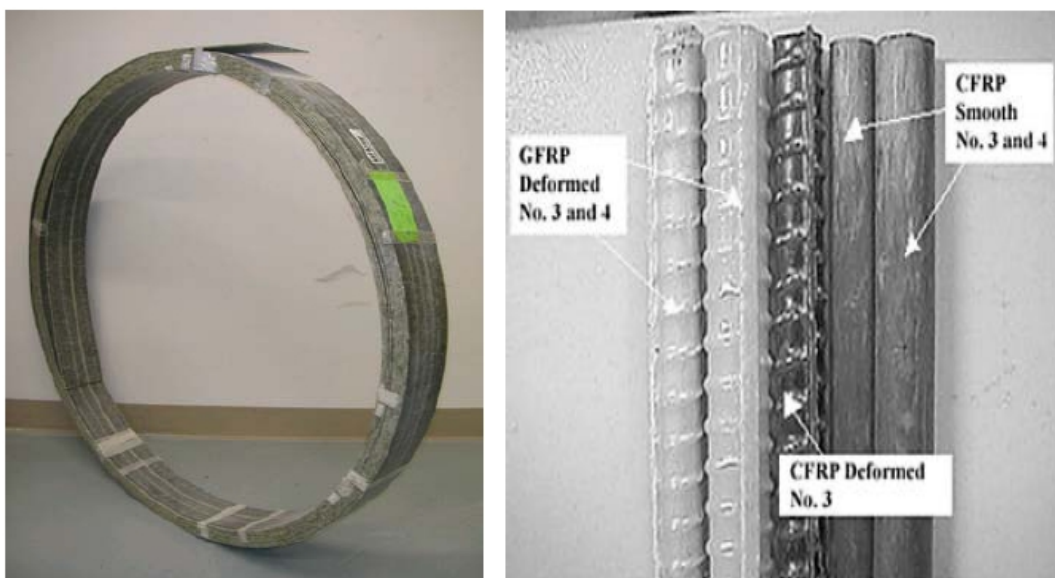
جدول 1-2- مشخصات نمونه ای از فابریک ها (Wabo®MBrace, 2003)

Fabrics

| Wabo MBrace Fiber Reinforcement | Product Architecture | Nominal Thickness | Ultimate Tensile Strength | Tensile Modulus of Elasticity | Rupture Strain |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|
| CF 130 High Strength Carbon Fiber | 9 oz. Unidirectional fabric | 0.0065 in/ply (0.165 mm/ply) | 550 ksi (3800 MPa) | 33,000 ksi (227 GPa) | 1.67% |
| CF 160 High Strength Carbon Fiber | 18 oz. Unidirectional fabric | 0.0130 in/ply (0.330 mm/ply) | 550 ksi (3800 MPa) | 33,000 ksi (227 GPa) | 1.67% |
| CF 530 High Modulus Carbon Fiber | 9 oz. Unidirectional fabric | 0.0065 in/ply (0.165 mm/ply) | 510 ksi (3500 MPa) | 54,000 ksi (373 GPa) | 0.94% |
| EG 900 E-glass Fiber | 27 oz. Unidirectional fabric | 0.0139 in/ply (0.353 mm/ply) | 220 ksi (1520 MPa) | 10,500 ksi (72.4 GPa) | 2.10% |
| AK 60 Aramid Fiber | 18 oz. Unidirectional fabric | 0.0110 in/ply (0.279 mm/ply) | 290 ksi (2000 MPa) | 17,400 ksi (120 GPa) | 1.67% |



شکل 1-2- خصوصیات فیبرها و آرماتورهای فولادی مختلف (Nordin, 2003)



شکل 1-3- اشکال مختلف FRP (Bank, 2004) و (De Lorenzis and Nanni, 2001)

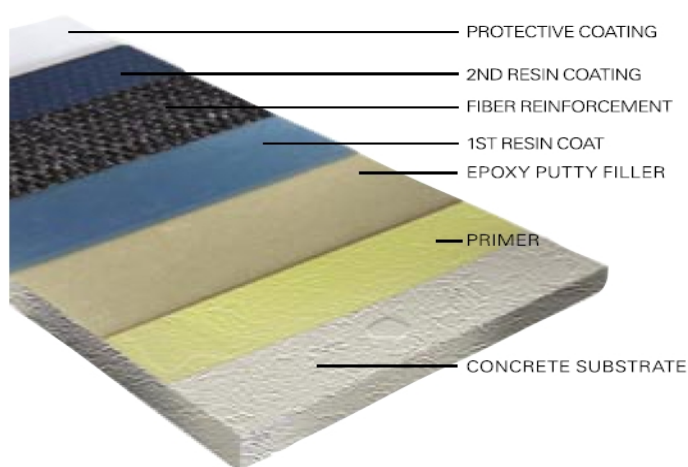
1-5-1- انواع پوشش های FRP بر اساس نحوه تولید

- پوشش دست ساز و درجا در محل
 - ورقه های پیش ساخته کامپوزیتی
 - ورقه های Pultrusion : که در این فرآیند ورقه های ساخته شده از محفظه حرارتی عبور داده شده و در این حین تحت کشش قرار می گیرند.
- در شکل 1-4 اشکال مختلف پوشش و در جدول 1-3 مشخصات نمونه ای از لمینیت ها آمده است.

جدول 1-3- مشخصات نمونه ای از ورقه های پیش ساخته (Wabo®MBrace, 2003)

Laminates

| Wabo Mbrace S&P Laminates | Product Architecture | Nominal Thickness | Ultimate Tensile Strength | Tensile Modulus of Elasticity | Rupture Strain |
|---------------------------|---|-------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|
| 10/1.4 | Pre-fabricated Carbon/Epoxy | 0.055 in (1.4 mm) | 390 ksi (2690 MPa) | 23,000 ksi (160 GPa) | 1.67% |
| 50/1.4 | Pre-fabricated Carbon/Epoxy 2 inch wide | 0.055 in (1.4 mm) | 390 ksi (2690 MPa) | 23,000 ksi (160 GPa) | 1.67% |
| 100/1.4 | Pre-fabricated Carbon/Epoxy 4 inch wide | 0.055 in (1.4 mm) | 390 ksi (2690 MPa) | 23,000 ksi (160 GPa) | 1.67% |



(b) پوشش دست ساز



(a) ورقه های پیش ساخته

شکل 1-4- انواع پوشش های FRP (Wabo®MBrace, 2003)

1-6- مهمترین روش های ترمیم سازه بتنی

- استفاده از پوشش و غلاف فولادی
 - استفاده از صفحات پوششی یا غلاف FRP
 - استفاده از لایه پوشش بتنی با ملات مسلح (زره پوش بتنی)
 - استفاده از کابل های پس کشیده یا شاتکریت
- در شکل های 1-5 و 1-6 موارد تقویت با FRP آمده است.



تقویت پارکینگ



تقویت کف

شکل 1-5- موارد تقویت با FRP



شکل 1-6- موارد تقویت با FRP