

فصل سیزدهم

-۱۳

حل چند مثال براساس آیین نامه CSA

تقویت خمشی تیر مستطیلی با فولاد کششی

تقویت خمشی تیر مستطیلی با فولاد کششی و فشاری

تقویت برشی تیر

تقویت فشاری ستون دایروی

تقویت فشاری ستون مربع شکل

تقویت برشی ستون دایروی

تقویت برشی ستون مربع شکل

حل چند مثال براساس آیین نامه ACI

تقویت خمشی تیر

تقویت برشی تیر

تقویت برشی ستون

تقویت خمشی تیر با فولاد کششی و فشاری

استفاده از الیاف کربن تک جهتی

$$\begin{aligned}
 w &= 200 \text{ g/m}^2 & b &= 400 \text{ mm} \\
 t_f &= 0.12 \text{ mm} & h &= 600 \text{ mm} \\
 E_f &= 220 \text{ Gpa} & d &= 546 \text{ mm} \\
 A_s &= 1500 \text{ mm}^2 \\
 \epsilon_f &= 0.015 \\
 A_f &= 48 \text{ mm}^2 = 400 \text{ mm}^2 A'_s \\
 d &= 54 \text{ mm} \\
 \phi_f &= 0.95 \\
 f_y &= 400 \text{ Mpa} \\
 f_c &= 45 \text{ Mpa} \\
 M_r &= 263 \text{ KN.m} \\
 M_u &= 330 \text{ KN.m} \\
 \beta_1 &= 0.73
 \end{aligned}$$

با فرض جاری شدن میلگرد کششی و گسیختگی FRP

$$\begin{aligned}
 0.85\phi_c f_c \beta_1 b x + \phi_s E_s A'_s \epsilon_{fpu} \left(\frac{x - d'}{h - x} \right) &= \phi_s f_y A_s + \phi_f E_f \epsilon_f A_f \\
 0.85 \times 0.6 \times 45 \times 0.85 \times 400 x + 0.85 \times 200/000 \times 400 \times 0.015 \left(\frac{x - 54}{600 - x} \right) \\
 &= 0.85 \times 400 \times 1500 + 0.95 \times 220/000 \times 0.015 \times 48 \\
 x &= 78.5 \text{ mm} \\
 a &= \beta_1 x = 57.3 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\epsilon_c = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \frac{x}{h - x} = 0.015 \frac{78.05}{600 - 78.5} = 0.0022 < 0.003$$

$$\epsilon'_s = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \left(\frac{x - d'}{h - x} \right) = 0.015 \left(\frac{78.5 - 54}{600 - 78.5} \right) = 0.0007 \leq 0.002$$

$$\epsilon_s = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d - x}{h - x} \right) = 0.015 \left(\frac{546 - 78.5}{600 - 78.5} \right) = 0.0134 > 0.002$$

$$M_r = \phi_s f_y A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) - \phi_s f_s A'_s \left(d' - \frac{a}{2} \right) + \phi_f E_f \epsilon_f A_f \left(h - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_r = 0.85 \times 400 \times 1500 \left(546 - \frac{57.3}{2} \right) - 0.85 \times 200000 \times 0.0007 \times 400 \times \left(54 - \frac{57.3}{2} \right)$$

$$+ 0.95 \times 220000 \times 0.015 \times 48 \left(600 - \frac{57.3}{2} \right) = 348.3 \text{ KN.m}$$

تقویت خمشی تیر با فولاد کششی

$$\begin{aligned}
 b &= 400 \text{ mm} \\
 h &= 600 \text{ mm} \\
 A_s &= 1500 \text{ mm}^2 \\
 d &= 546 \text{ mm} \\
 f_c &= 45 \text{ Mpa} \\
 M_r &= 263 \text{ KN.m} \\
 M_u &= 330 \text{ KN.m}
 \end{aligned}$$

استفاده از الیاف کربن تک جهتی با خصوصیات

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= 0.85 - 0.008(15) = 0.73 \\
 W &= 220 \text{ gr/m}^2 \\
 t_f &= 0.015 \\
 \varepsilon_{frp} &= 0.015 \\
 E_f &= 220 \text{ Gpa} \\
 A = b \cdot t &= 400 \times 0.12 = 48 \text{ mm}^2 \\
 \phi_f &= 0.95
 \end{aligned}$$

با فرض گسیختگی کششی FRP پس از جاری شدن میلگرد کششی

$$x = \frac{\phi_s f_y A_s + \phi_f E_f \varepsilon_f A_f}{0.85 \phi_c f_c \beta_1 b} = \frac{0.85 \times 400 \times 1500 + 0.95 \times 220000 \times 0.015 \times 48}{0.85 \times 0.6 \times 45 \times 0.73 \times 400} = 98 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1 x = 71.54 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_f + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-x}{h-x} \right) = (0.015 + 0) \left(\frac{546-98}{600-98} \right) = 0.013 > 0.002$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_f + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{x}{h-x} \right) = 0.0029 < 0.003$$

$$M_r = \phi_s f_y A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + \phi_f E_f \varepsilon_f A_f \left(h - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_r = 0.85 \times 400 \times 1500 \left(546 - \frac{71.54}{2} \right) + 0.95 \times 220/000 \times 0.015 \times 84/9 \left(600 - \frac{71.54}{2} \right) = 345 \text{ KN.m}$$

تقویت برشی تیر

استفاده از الیاف کربن تک جهتی $b=400 \text{ mm}$

$$h=600 \text{ mm}$$

$$W=200 \text{ gr/m}^2$$

$$A_v=157 \text{ mm}^2$$

$$d=546 \text{ mm}$$

$$t_f=0.12 \text{ mm}$$

$$f_c=30 \text{ Mpa}$$

$$E_f=220 \text{ Gpa}$$

$$F_y=400 \text{ Mpa}$$

$$V_r=33.75 \text{ kn}$$

$$V_u=43 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_f = 0.015$$

$$A_f = 2w_f t_f = 2 \times 500 \times 0.12 = 120 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{2t_f}{b_w} = \frac{0.24}{400} = 0.006$$

$$V_c = 0.2 \phi_c \sqrt{f_c} b_w d = 0.2 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 400 \times 546 = 16.35 \text{ KN}$$

$$L_e = \frac{25350}{(t_f E_f)^{0.58}} = 69 \text{ mm}$$

$$K_1 = \left(\frac{f_c}{27.65} \right)^{2/3} = 1.055$$

$$k_2 = \frac{d_f - n_e l_e}{d_f} = \frac{546 - 1 \times 69}{546} = 0.87$$

$$\varepsilon_{fe} = \frac{0.85 \phi_f k_1 k_2 l_e}{9525} = \frac{0.85 \times 0.95 \times 1.055 \times 0.85 \times 69}{9225} = 0.0075$$

$$R = \alpha \lambda_1 \left[\frac{f_c^{2/3}}{\rho_f E_f} \right]^{\lambda_2} = 0.8 \times 1.35 \left[\frac{30^{2/3}}{0.006 \times 220000} \right]^{0.3} = 0.49$$

$$\varepsilon_{fe} = R \varepsilon_{fu} = 0.49 \times 0.015 = 0.0073$$

$$\varepsilon_{f_{\max}} = 0.004$$

$$V_f = \frac{\phi_f E_f \varepsilon_f A_f d_f (\sin \beta + \cos \beta)}{s_f} = \frac{0.95 \times 220000 \times 0.004 \times 0.24 \times 546 \times 1}{1} = 10.95 \text{ KN}$$

$$V_r = V_c + V_s + V_f = 14.35 + 19.4 + 10.95 = 44.7 \text{ KN}$$

$$V_r \leq V_c + 0.8 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d$$

$$44.7 \leq 68.75$$

تقویت برشی ستون مربعی

الیاف شیشه تک جهتی $b=h=500\text{mm}$

$d=450\text{ mm}$

$f_c=30\text{ mpa}$

$A_g=250000$

mm^2

$A_h=200\text{mm}^2$

$F_{hy}=400\text{ mpa}$

$W = 900\text{ gr} / \text{m}^2$

$t_f=0.36\text{mn}$

$E=70\text{Gpa}$

$f_f = 2400\text{Mpa}$ $\phi_f = 0.75$

$N_b = 2$

$$V_s = \frac{\phi_s f_{hy} n A_h d}{s} \cotg \theta = 306\text{KN}$$

$$V_c = 0.2 \phi_c \sqrt{f_c} b_w d = 147.9\text{KN}$$

$$V_{frp} = 2 \phi_f f_f N_b t_f d \sin^2 \theta = 2 \times 0.75 \times (0.004 \times 70000) \times 2 \times 0.36 \times 450 \times 0.5$$

$$V_f = 68\text{kN}$$

$$V_r = V_c + V_s + V_f = 147.9 + 306 + 68 = 521.9\text{kN}$$

$$V_r \leq V_c + 0.8 \lambda \phi_c \sqrt{f_c} b_w d$$

$$251 \leq 739.4\text{KN}$$

تقویت مقاومت فشاری ستون مربعی

الیاف کربن تک جهتی

$$\begin{aligned}L_u &= 280 \\w &= 300 \text{ gr/m}^2 \\b &= h = 40 \text{ m} \\t_f &= 0.176 \text{ mm} \\A_g &= 1600 \text{ mm}^2 \\E_f &= 240 \text{ Gpa} \\A_{st} &= 2500 \text{ mm}^2 \\f_f &= 4000 \text{ Mpa} \\f_y &= 400 \text{ Mpa} \\N_b &= 1 \\ \phi_f &= 0.95 \quad f_c = 23 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

$$\frac{L_u}{h} \leq \frac{7.5}{\sqrt{\frac{N_u}{A_g}}} \Rightarrow 7 \leq 10.5$$

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b \phi_f E_f \varepsilon_f t_f (b+h)}{bh} = \frac{2 \times 1 \times 0.95 \times 240.000 \times 0.004 \times 0.176 \times (400 + 400)}{160000} = 1.605 \text{ Mpa}$$

$$w_w = \frac{f_{lfrp}}{\phi_c f_c} = \frac{1.605}{0.6 \times 23} = 0.116$$

$$f_{cc} = f_c (1 + \alpha_c w_w) = 23(1 + 0.116) = 25.67 \text{ Mpa}$$

$$N_{rMAX} = 0.8 \left[0.85 \phi_c f_{cc} (A_g - A_{st}) + \phi_s F_y A_s \right]$$

محصور شدگی مقطع دایروی

$$f_{lfrp} \text{ بصورت کامل} = \frac{2N_b \phi_f f_f t_f}{D_g}$$

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b \phi_f f_f t_f}{D_g} \times \frac{b_f}{S}$$

بصورت ناپیوسته

$$\varepsilon_{fe} = 0.004$$

$$f_{lfrp} = \frac{4N_b \phi_f \varepsilon_{fe} t_f}{h}$$

b=h محصور شدگی مقطع مربع بصورت کامل

$$f_{lfrp} \text{ بصورت ناپیوسته} = \frac{4N_b \phi_f E_f \varepsilon_{fe} t_f}{h} \times \frac{b_f}{s}$$

محصور شدگی مقطع مستطیلی با نسبت $\frac{b}{h} \leq 1.5$

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b \phi_f E_f \varepsilon_{fe} t_f (b+h)}{bh}$$

$$\varepsilon_{fc} = 0.004$$

$$f_{lfrp} \text{ بصورت منقطع} = \frac{2N_b \phi_f E_f \varepsilon_{fe} t_f (b-h)}{bh} \times \frac{b_f}{S}$$

محصور شدگی مقطع مستطیلی با نسبت $\frac{b}{h} \geq 1.5$

$$f_{lfrp} \text{ بصورت پیوسته} = \frac{2N_b \phi_f E_f \varepsilon_{fe} t_f (b-h)}{bh} k_e$$

$$b' = b - 2r$$

$$h' = h - 2r$$

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3bh(1 - \rho_{sg})}$$

$$f_{lfrp} \text{ بصورت منقطع} = \frac{2N_b \phi_f E_f \varepsilon_{fe} t_f (b+h)}{bh} k_e \times \frac{b_f}{s}$$

تقویت برشی ستون دایروی

$$L_u = 3000 \text{ mm}$$

$$D_g = 500 \text{ mm}$$

$$D_c = 395 \text{ mm}$$

$$A_c = 122540 \text{ mm}^2$$

$$A_h = 200 \text{ mm}^2$$

$$f_{hy} = 400 \text{ Mpa}$$

$$\theta = 45$$

$$f_c = 30 \text{ mpa}$$

$$V_f = 291.5 \text{ kn}$$

$$V_u = 340 \text{ KN}$$

$$w = 900 \text{ gr / m}^2$$

$$t_f = 0.36 \text{ mm}$$

$$E_f = 70 \text{ G}_{pa}$$

$$F_f = 2400 \text{ Mpa}$$

$$N_b = 2$$

$$\phi_f = 0.75$$

$$V_c = 0.2\phi_c\sqrt{f_c}A_c = 0.2 \times 1 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 122540$$

$$V_c = 80.5 \text{ KN}$$

$$V_s = \frac{\pi \phi_s f_{yh} n A_h D_c}{4 S} \cot \theta = \frac{\pi \times 0.85 \times 400 \times 2 \times 200 \times 395}{4 \times 200} \times 1 = 211 \text{ KN}$$

$$V_f = \frac{\pi}{2} \phi_f f_f N_b t_f D_g \sin^2 \theta = \frac{\pi}{2} \times 0.75 \times 0.004 \times 70.000 \times 2 \times 0.36 \times 500 \times 0.5 = 59.34 \text{ KN}$$

$$V_T = v_c + v_s + v_f = 80.5 + 211 + 59.34 = 350.84$$

$$V_T \leq v_c + 0.8\lambda\phi_c\sqrt{f_c}A_c$$

$$350.84 \leq 80.5 + 0.8 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 122540 = 402.7$$

تقویت مقاومت فشاری ستون دایروی

الیاف شیشه

$$\begin{aligned} A_g &= 196350 \text{ mm}^2 \\ A_s &= 2500 \text{ mm}^2 \\ f_y &= 400 \text{ mpa} \\ f_c &= 30 \text{ mpa} \\ P_D &= 1500 \\ P_L &= 1550 \end{aligned}$$

$$L_u = 3000 \text{ mm}$$

$$w = \frac{900 \times 500}{100} = 4500 \text{ mm}^2 \quad \text{تک جهتی}$$

$$t = 0.36 \text{ mm}$$

$$E = 70 \text{ G}_{pa}$$

$$F_f = 2400 \text{ Mpa}$$

$$N_b = 2$$

$$\phi_f = 0.75$$

$$N_u = (1.25P_D + 1.5P_L) = 4200 \text{ K}_N$$

$$N_r = 3110 \text{ k}_n$$

$$\frac{L_u}{D_g} \leq \frac{6.25}{\sqrt{\frac{N_u}{f_c A_g}}} \Rightarrow \frac{3000}{60} \leq \frac{6.25}{\sqrt{\frac{42E5}{30 \times 1963}}} \Rightarrow 6 \leq 7.4$$

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b \phi_f f_f t_f}{D_g} = \frac{2 \times 2 \times 0.75 \times 2400 \times 0.36}{500} = 5.184 \text{ Mpa}$$

$$f_{lfrp} \geq 4 \text{ Mpa}$$

$$f_{lfrp} \geq \frac{f_c}{2\alpha_{pc}} \left(\frac{1}{K_e} - \phi_c \right) \Rightarrow \frac{30}{2 \times 1} \left(\frac{1}{0.85} - 0.6 \right) = 8.65$$

$$w_w = \frac{2f_{lfrp}}{\phi_c f_c} = \frac{2 \times 5.184}{0.6 \times 30} = 0.576$$

$$f_{cc} = f_c (1 + \alpha_{pc} w_w) = 30(1 + 0.576) = 47.28$$

$$\begin{aligned} N_{r_{max}} &= 0.8[0.85\phi_c f_{cc}(A_g - A_s) + \phi_s f_y A_s] = 0.8[0.85 \times 0.6 \times 47.28(196350 - 2500) \\ &+ 0.85 \times 400 \times 400 \times 2500] = 4419 \text{ KN} \end{aligned}$$

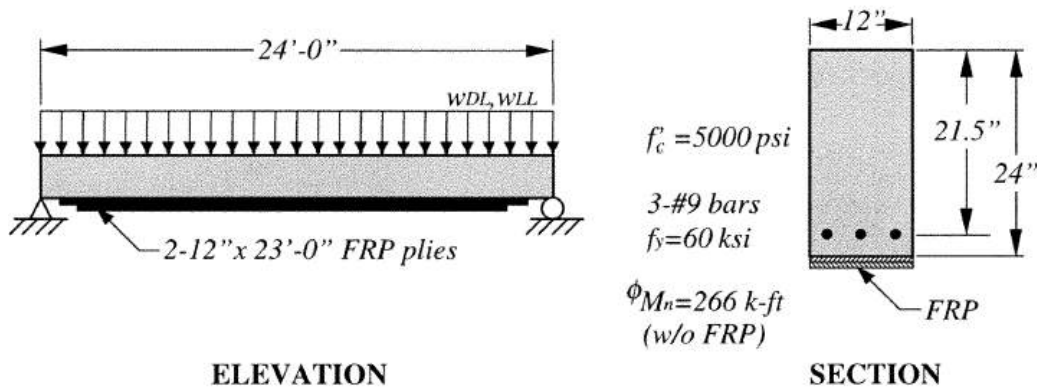
حل چند مثال براساس آیین نامه ACI

مقاوم سازی خمشی یک تیر داخلی:

یک تیر بتن آرمه با تکیه گاه ساده با سه میلگرد طولی No.9 (شکل ۱۳- ۱) در یک انبار قرار دارد و لازم است که ظرفیت تحمل بار زنده آن 50 درصد افزایش یابد . آنالیز انجام شده بر روی تیر موجود نشان می دهد که تیر بعد از افزایش بار ، مقاومت برشی کافی داشته و همچنین ضوابط مربوط به تغییر شکلها و ترکها را در حالت خدمت دهی ارضاء می کند . با این وجود محاسبه مقاومت خمشی تیر نشان می دهد که قادر به تحمل افزایش بار جدید نیست.

جدول ۱-۱۳ مشخصات مقطع

طول تیر l	24 ft	7.31 m
عرض تیر w	12 in.	30.48 cm
h	21.5 in.	54.61 cm
d	24 in.	60.96 cm
f'_c	5000 psi	34 N/mm ²
f_y	60 ksi	414 N/mm ²
ϕM_n without FRP	266 k-ft	355.3 kN*m
میلگردها	No. 9	$\phi 28$



شکل ۱-۱۳ : جزئیات نحوه مقاوم سازی خمشی به وسیله FRP

جدول ۱۳-۲: بارگذاری و ممانهای مربوطه

بارگذاری / لنگر	مقدار موجود		مقدار پیشنهادی	
Dead loads , wDL	1.00 k/ft	14 N/mm	1.00 k/ft	14 N/mm
Live load , wLL	1.20 k/ft	17 N/mm	1.80 k/ft	26 N/mm
Unfactored loads , ($wDL + wLL$)	2.20 k/ft	32.1 N/mm	2.80 k/ft	40.9 N/mm
Unstrengthened load limit , ($1.2wDL + 0.85wLL$)	N/A	N/A	N/A	39.8 N/mm
Factored loads , ($1.4wDL + 1.7wLL$)	3.44 k/ft	50.2 N/mm	4.46 k/ft	65.1 N/mm
Dead-load moment , MDL	72 k-ft	97.632 kN-m	72 k-ft	97.632 kN-m
Live-load moment , MLL	86 k-ft	116.616 kN-m	130 k-ft	176.28 kN-m
Service-load moment, M_s	158 k-ft	214.428 kN-m	202 k-ft	273.912 kN-m
Unstrengthened moment limit , ($1.2MDL +$ $0.85MLL$)	N/A	N/A	197 k-ft	267.132 kN-m
Factored moment , M_u	248 k-ft	331.3 kN-m	321 k-ft	428.8 kN-m

پیشنهاد می شود که تیر موجود به وسیله سیستم FRP که مشخصات آن در جدول ۱۳-۳ آورده شده است ، مقاوم سازی شود. در این روش ، دو لایه FRP با 12 in. (25.4 mm) عرض و 23 ft (7 m) طول مورد استفاده قرار می گیرند که به طریق Wet lay-up به زیر تیر چسبانده می شوند .

جدول ۱۳-۳: خصوصیات سیستم FRP گرفته شده از سازنده آن

ضخامت هر لایه , t_f	0.040 in.	1.016 mm
مقاومت کششی نهایی تضمین شده , f_{fu}^*	90 ksi	0.62 kN/mm ²
کرنش شکست تضمین شده , ϵ_{fu}^*	0.017 in./in.	0.017 mm/mm
مدول الاستیسیته , E_f	5360 ksi	37 kN/mm ²

با بررسیهای انجام شده ، مقدار مقاوم سازی معقول بوده به گونه ای که ضوابط محدودیت مقاومتی مقومسازی ارائه شده را راضی می نماید . این ضابطه اینگونه است که مقاومت لنگر موجود $(\phi Mn)_{w/o FRP} = 266 k-ft (355 kN-m)$ ، باید بزرگتر از حدلنگر تقویت نشده ، $(1.2MDL + 0.85MLL)_{new} = 197 k-ft (263 kN-m)$ باشد . محاسبات مربوط به طراحی که جهت مشخص شدن وضعیت سیستم انجام می گیرد ، در زیر آمده است :

روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۱: محاسبه خصوصیات مواد سیستم FRP</p> <p>تیر در یک فضای داخلی قرار داشته و مواد CFRP جهت مقاوم سازی آن مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین، براساس جدول ۸-۱ ضریب کاهش محیطی ۰.۹۵ در نظر گرفته می شود.</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.95)(90ksi) = 85ksi$ $\varepsilon_{fu} = (0.95)(0.017in./in.) = 0.0162in./in.$ $f_{fu} = (0.95)(620.53N/mm^2) = 589.5N/mm^2$ $\varepsilon_{fu} = (0.95)(0.017mm/mm) = 0.0162mm/mm$
<p>مرحله ۲: محاسبات اولیه خصوصیات بتن:</p> <p>β_1 از ACI 318، فصل ۱۰-۲-۷-۳ بدست می آید</p> $E_c = 57,000\sqrt{f'_c}$ <p>خصوصیات فولاد موجود:</p> $\rho_s \equiv \frac{A_s}{bd}$	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{f'_c(ksi)}{1000} = 0.80$ $\beta_1 = 1.09 - 0.08 f'_c(N/mm^2) = 0.81$ $E_c = 57,000\sqrt{5000psi} = 4,030,000psi$ $E_c = 1500\sqrt{10 \times 34.47N/mm^2} = 27,849N/mm^2$ $A_s = 3(1.00in.^2) = 3.00 in.^2$ $A_s = 3(615.7mm^2) = 1935.48 mm^2$ $\rho_s = \frac{3.00in.^2}{(12in.)(21.5in.)} = 0.00116$ $\rho_s = \frac{1935.48mm^2}{(304.8mm)(546.1mm)} = 0.00116$
<p>خصوصیات FRP:</p> $A_f = nt_f w_f$ $\rho_f = \frac{A_f}{bd}$	$A_f = (2plies)(0.040in./ply)(12in.) = 0.96in.^2$ $A_f = (2plies)(1.016mm/ply)(304.8mm) = 619.35mm^2$ $\rho_f = \frac{0.96in.^2}{(12in.)(21.5in.)} = 0.00372$ $\rho_f = \frac{619.35mm^2}{(304.8mm)(546.1mm)} = 0.00372$

روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۳: محاسبه کرنش اولیه موجود در زیر تیر</p> <p>کرنش اولیه با فرض کردن اینکه تیر ترک خورده و تنها باری که در لحظه نصب سیستم FRP اعمال می شود، بار مرده است؛ محاسبه می شود. آنالیز مقطع ترک خورده از تیر موجود نتیجه می دهد که $k = 0.334$ و $I_{cr} = 5905 \text{ in.}^4$ و $I_{cr} = 2451 * 10^6 \text{ mm}^4$</p> $\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr}E_c}$	$\epsilon_{bi} = \frac{(864k \cdot \text{in.})[24\text{in.} - (0.334)(21.5\text{in.})]}{(5,905\text{in.}^4)(4,030\text{ksi})}$ $\epsilon_{bi} = 0.00061$ $\epsilon_{bi} = \frac{(97,632\text{kN} \cdot \text{mm})[609.6\text{mm} - (0.334)(546.1\text{mm})]}{(2451 \cdot 10^6 \text{mm}^4)(28\text{kN} / \text{mm}^2)}$ $\epsilon_{bi} = 0.00061$
<p>مرحله ۴: محاسبه ضریب وابسته به چسبندگی سیستم FRP</p> <p>ضریب بدون بعد چسبندگی برای خمش، κ_m، به کمک رابطه (۹-۲) محاسبه می شود.</p> <p>مقایسه با $nE_f t_f$ با 1,000,000</p> <p>بنابراین، $\kappa_m = \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{2,000,000} \right) \leq 0.90$</p>	$(2)(5,360,000 \text{psi})(0.014\text{in.}) = 428,8000 < 1,000,000$ $(2)(37\text{kN} / \text{mm}^2)(1.016\text{mm}) = 75,184 < 175,336$ $\kappa_m = \frac{1}{60(0.0162)} \left[1 - \frac{(2)(5,360,000 \text{psi})(0.040\text{in.})}{2,000,000} \right]$ $\kappa_m = 0.82 < 0.9$ $\kappa_m = \frac{1}{60(0.0162)} \left[1 - \frac{(2)(37\text{kN} / \text{mm}^2)(1.016\text{mm})}{360,000} \right]$ $\kappa_m = 0.82 < 0.9$
<p>مرحله ۵: حدس مقدار عمق تار خنثی، c</p> <p>یک حدس اولیه معقول می تواند $0.20d$ باشد.</p> <p>مقدار c بعد از کنترل روابط تعادل، دقیقتر می شود.</p> $c = (0.20)d$	$c = (0.20)(21.5\text{in.}) = 4.30\text{in.}$ $c = (0.20)(546.1\text{mm}) = 109.2\text{mm}$
<p>مرحله ۶: محاسبه کرنش مؤثر در FRP</p> <p>مقدار کرنش مؤثر برای FRP می تواند از رابطه (۹-۳) بدست آید.</p> $\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{h - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \kappa_m \epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{24 - 4.3}{4.3} \right) - 0.00061 \leq 0.82(0.0162)$ $\epsilon_{fe} = 0.0131 \leq 0.0133$

محاسبات	روند حل
<p>دقت شود که برای عمق تار خنثی حدس زده شده ، حالت شکست به صورت خردشدگی بتن خواهد بود ، زیرا که کنترل رابطه بالا این موضوع را تصدیق می کند . اگر رابطه بالا تأیید نشود ، شکست تیر به صورت گسیختگی FRP خواهد بود .</p> $\varepsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{617.2mm - 109.2mm}{109.2mm} \right) - 0.00061$ $\leq 0.82(0.0162)$ $\varepsilon_{fe} = 0.0131 \leq 0.0133$	
<p>مرحله ۷ : محاسبه کرنش در فولاد موجود کرنش در فولاد می تواند از روابط ساده موجود در مثلث و از رابطه (۸-۹) بدست آید :</p> $\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right)$	$\varepsilon_s = (0.0131 + 0.00061) \left(\frac{21.5 - 4.30}{24 - 4.30} \right) = 0.012$ $\varepsilon_s = (0.0131 + 0.00061) \left(\frac{546.1 - 109.2}{609.6 - 109.2} \right) = 0.012$
<p>مرحله ۸ : محاسبه مقدار تنش در فولاد و FRP تنشها از روابط (۹-۹) و (۴-۹) بدست می آیند .</p> $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$	$f_s = (29,000ksi)(0.012) \leq 60ksi$ $f_s = 348ksi \leq 60ksi$ $f_s = (200kN/mm^2)(0.012) \leq 0.14kN/mm^2$ $f_s = 2.4kN/mm^2 \leq 0.14kN/mm^2$ $f_{fe} = (5360ksi)(0.0131) = 70.2ksi$ $f_{fe} = (37kN/mm^2)(0.0131) = 0.5kN/mm^2$
<p>مرحله ۹ : محاسبه نتیجه های نیروی داخلی و کنترل روابط تعادل تعداد نیروها با قرار دادن مقدار c حدس زده شده در رابطه (۱۰-۹) بررسی می شود . (به علت آنکه نوع شکست به صورت خردشدگی بتن می باشد ، می توان مقدار γ را برابر ۰.۸۵ در نظر گرفت)</p> $c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b}$	$c = \frac{(3.00in.^2)(60ksi) + (0.96in.^2)(70.2ksi)}{(0.85)(5ksi)(0.80)(12in.)}$ $c = 6.06in. \neq 4.30in. \quad n.g.$ $c = \frac{(1935.48mm^2)(413.7N/mm^2)}{(0.85)(34.47N/mm^2)(0.81)(305mm)} + \frac{(619mm^2)(484N/mm^2)}{(0.85)(34.47N/mm^2)(0.81)(305mm)}$ $c = 152mm. \neq 109mm \quad n.g.$ <p>∴ باید مقدار c اصلاح شده و مراحل ۶ تا ۹ تا زمانی که رابطه تعادل برقرار گردد ، تکرار شود .</p>

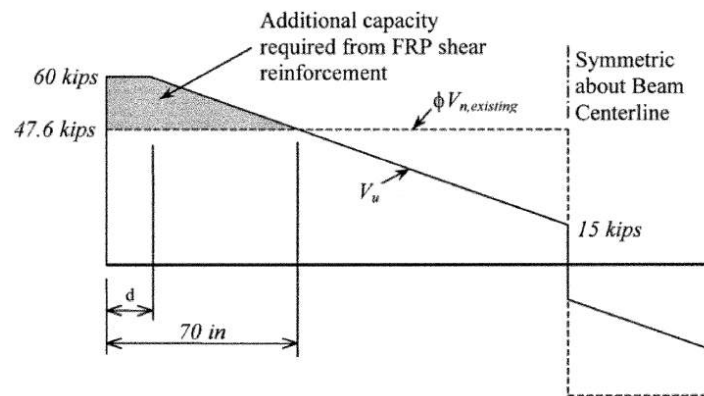
روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۱۰: اصلاح مقدار c تا رابطه تعادل ارضاء شود.</p> <p>مرحله ۶ تا ۹ برای مقادیر مختلف c تکرار شده است تا رابطه تعادل ارضاء گردد. نتیجه آخرین تکرار در زیر خلاصه شده است:</p> <p>$c = 5.58in.$</p> <p>$\epsilon_s = 0.0086, f_s = f_y = 60ksi$</p> <p>$\epsilon_{fe} = 0.0093, f_{fe} = 49.8ksi$</p>	$c = \frac{(3.00in.^2)(60ksi) + (0.96in.^2)(49.8ksi)}{(0.85)(5ksi)(0.80)(12in.)}$ <p>$c = 5.58in. = 5.58in. \Rightarrow O.K.$</p> $c = \frac{(1935mm^2)(413.7N/mm^2)}{(0.85)(34.47N/mm^2)(0.81)(305mm)}$ $+ \frac{(619mm^2)(343N/mm^2)}{(0.85)(34.47N/mm^2)(0.81)(305mm)}$ <p>$c = 142mm = 142mm \Rightarrow O.K.$</p> <p>∴ مقدار c حدس زده شده در آخرین تکرار درست می باشد.</p>
<p>مرحله ۱۱: محاسبه مقاومت خمشی طراحی مقطع</p> <p>مقاومت خمشی طراحی مقطع با استفاده از رابطه (۹-۱۱) محاسبه می شود. ضریب کاهش اضافی $\psi_f = 0.85$ بر سهم مقاومت خمشی FRP وارد میگردد. به علت آنکه $\epsilon_s = 0.0086 > 0.005$، ضریب کاهش مقاومت $\phi = 0.90$ در رابطه (۹-۵) مناسب می باشد.</p> $\phi M_n = \phi \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right]$	$\phi M_n = 0.90 \left[\frac{(3.00in.^2)(60ksi) \left(21.5in. - \frac{(0.80)(5.58in.)}{2} \right) + (0.96in.^2)(49.8ksi) \left(24in. - \frac{(0.80)(5.58in.)}{2} \right)}{(0.85)(0.96in.^2)(49.8ksi) \left(24in. - \frac{(0.80)(5.58in.)}{2} \right)} \right]$ <p>$\phi M_n = 3,920k \cdot in. = 326k \cdot ft \geq M_u = 321k \cdot ft$</p> $\phi M_n = 0.90 \left[\frac{(1935.48mm^2)(414N/mm^2) \left(546mm - \frac{(0.81)(142mm)}{2} \right) + (619mm^2)(343N/mm^2) \left(607mm - \frac{(0.81)(142mm)}{2} \right)}{(0.85)(546mm^2)(343N/mm^2) \left(607mm - \frac{(0.81)(142mm)}{2} \right)} \right]$ <p>$\phi M_n = 435,329N \cdot mm$</p> <p>$\phi M_n = 435.3N \cdot m \geq M_u = 428.7N \cdot m$</p> <p>∴ مقطع مقاوم سازی شده قادر به تحمل خمش اضافه شده می باشد.</p>
<p>مرحله ۱۲: کنترل تنشهای حالت سرویس در فولاد و FRP</p> <p>محاسبه عمق الاستیک تا محور خنثی در حالت ترک خورده با جمع ممان اول سطوح مقطع معادل ممکن می باشد. این مقدار می تواند برای یک تیر با مقطع مستطیلی بدون فولاد فشاری با کمک رابطه ساده شده زیر محاسبه گردد:</p>	<p>U.S.</p> $k = \sqrt{\frac{\left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right)^2 + 2 \left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right) \left(\frac{5360}{4030} \right) \left(\frac{24in.}{21.5in.} \right)}{\left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right)}$ <p>$k = 0.343$</p> <p>$kd = (0.343)(21.5in.) = 7.37in.$</p>

روند حل	محاسبات
<p>محاسبه مقدار تنش در فولاد با استفاده از رابطه (۹-۱۲) و تعیین اینکه این مقدار رابطه توصیه شده (۹-۶) را ارضاء می کند یا خیر .</p> $k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)\left(\frac{h}{d}\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)}$ $f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - kd/3\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - kd/3\right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - kd/3\right) (h - kd)}$ $f_{s,s} \leq 0.80 f_y$	<p>SI :</p> $k = \sqrt{\left[0.0116\left(\frac{200}{28}\right) + 0.00372\left(\frac{37}{28}\right)\right]^2 + 2\left[0.0116\left(\frac{200}{28}\right) + 0.00372\left(\frac{37}{28}\right)\right]\left(\frac{609.6mm}{546.1mm}\right) - \left[0.0116\left(\frac{200}{28}\right) + 0.00372\left(\frac{37}{28}\right)\right]}$ <p>$k = 0.343$ $kd = (0.343)(546.1mm) = 187.3mm$</p> <p>U.S.</p> $f_{s,s} = \frac{\left[2,424k \cdot in. + (0.00061)(0.9in.^2)(5360ksi)\left(24in. - \frac{7.37in.}{3}\right)\right] (21.5in. - 7.37in.)(29,000ksi)}{\left[(3.00in.^2)(29,000ksi)\left(21.5in. - \frac{7.37in.}{3}\right)\right] (21.5in. - 7.37in.) + (0.96in.^2)(5360ksi)\left(24in. - \frac{7.37in.}{3}\right) (24in. - 7.37in.)}$ $f_{s,s} = 40.4ksi \leq (0.80)(60ksi) = 48ksi$ <p>$f_{s,s} = 280N/mm^2 \leq (0.80)(410N/mm^2) = 330N/mm^2$</p> <p>∴ مقدار تنش در فولاد در محدوده توصیه شده است .</p>
<p>محاسبه مقدار تنش در FRP با استفاده از رابطه (۹-۱۳) و تعیین اینکه این مقدار از محدوده تنش گسیختگی خزشی در جدول ۹-۱ کمتر است یا خیر .</p> $f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{h - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$ <p>برای سیستم FRP با الیاف کربن ، حد تنش گسیختگی خزشی از جدول ۹-۱ بدست می آید:</p> $F_{f,s} = 0.55 f_{fu}$	$f_{f,s} = 40.4ksi \left(\frac{5360ksi}{29,000ksi}\right) \left(\frac{24in. - 7.37in.}{21.5in. - 7.37in.}\right) - (0.00061)(5360ksi)$ $f_{f,s} = 5.60ksi \leq (0.55)(90ksi) = 50ksi$ $f_{f,s} = 0.278kN/mm^2 \left(\frac{37kN/mm^2}{200kN/mm^2}\right) - (0.00061)(371kN/mm^2)$ $\left(\frac{609.6mm - 187.2mm}{546.1mm - 187.2mm}\right) - (0.00061)(371kN/mm^2)$ <p>∴ مقدار تنش در FRP حد تنش گسیختگی خزشی توصیه شده را ارضاء می کند .</p>

از نظر جزئیات طراحی ، لایه FRP باید حداقل به اندازه d از جایی که ممان وارده برابر ممان ترک خوردگی است ، جلوتر قطع شود . نیروی برشی همراه با اعمال ضریب باید در محل قطع لایه FRP کنترل شده تا از $2/3$ مقاومت برشی بتن بیشتر نباشد . در غیر اینصورت ، دورپیچ های U شکل از FRP جهت جلوگیری از جدایش لایه لازم است .

مقاوم سازی برشی یک تیر داخلی T شکل :

یک تیر T شکل بتن آرمه ($f'_c = 3000 \text{ psi} = 20.7 \text{ N/mm}^2$) که در داخل یک سازه اداری می باشد ، تحت افزایش بارگذاری در بار زنده آن قرار می گیرد . آنالیز اولیه از تیر موجود نشان می دهد که تیر از نظر مقاومت خمشی هنوز رضایتبخش بوده اما مقاومت برشی جهت تحمل بار زنده جدید ناکافی است . براساس آنالیز ، ظرفیت تحمل برشی بتن $V_c = 36.4 \text{ kips} = 162 \text{ kN}$ بوده و ظرفیت تحمل برشی خاموتها $V_s = 19.6 \text{ kips} = 87.2 \text{ kN}$ می باشد . بنابراین ، ظرفیت تحمل برشی طراحی تیر موجود برابر مقدار زیر است .
 $V_u = 60 \text{ kips} = 266.7 \text{ kN}$ برش ماکزیمم اعمال شده بعد از افزایش بار، در فاصله d از تکیه گاه بوده و برابر
 می باشد . شکل ۱۳-۲ دیگرام برش ، و مکانی که لازم است مقاوم سازی برشی در طول تیر انجام شود را نشان داده است .
 $\phi V_{n,existing} = 0.85(36.4 \text{ kips} + 19.6 \text{ kips}) = 47.6 \text{ kips} = 211.7 \text{ kN}$

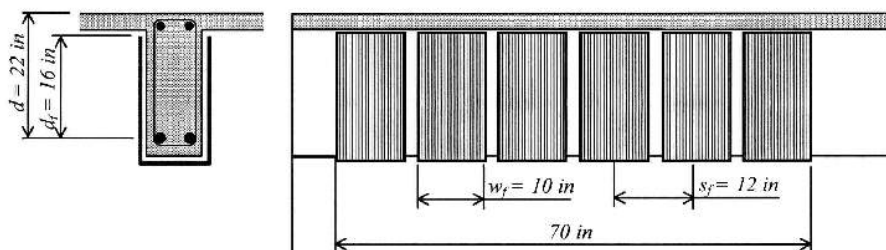


شکل ۱۳-۲ : نمایش دیگرام برش اعمالی در مقابل ظرفیت برشی موجود . ناحیه هاشورخورده نشان دهنده میزان کمبود مقاومت برشی است که توسط FRP جبران می شود

طراحی FRP های ضمیمه شده جهت مقاوم سازی برشی ، در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است . هر باریکه و نوار FRP شامل یک لایه ($n = 1$) از ورقه های کربن انعطاف پذیر بوده که توسط روش چسباندن ترنصب شده اند . خصوصیات مواد FRP ارائه شده توسط سازنده آن در جدول ۱۳-۴ آورده شده است .

جدول ۱۳-۴: خصوصیات سیستم FRP گرفته شده از سازنده آن

t_f , ضخامت هر لایه	0.0065 in.	0.1651 mm
f_{fu}^* , مقاومت کششی نهایی تضمین شده	550,000 psi	3792 N/mm ²
ε_{fu}^* , کرنش شکست تضمین شده	0.017 in./in.	0.017 mm/mm
E_f , مدول الاستیسیته	33,000,000 psi	227,527 N/mm ²



شکل ۱۳-۳: وضعیت قرارگیری FRP های برشی تقویت کننده

محاسبات مربوط به طراحی که به این نوع از وضعیت سیستم منجر می گردد، در زیر آمده است:

روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۱: محاسبه خصوصیات مواد طراحی</p> <p>تیر در یک محیط بسته و با فضای مقید قرار داشته و جهت مقاوسازی از مواد CFRP استفاده می گردد. بنابراین بر اساس جدول ۸-۱، ضریب کاهش محیطی، 0.95 در نظر گرفته می شود.</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.95)(550 \text{ ksi}) = 522.5 \text{ ksi}$ $f_{fu} = (0.95)(3.79 \text{ kN/mm}^2) = 3.06 \text{ kN/mm}^2$ $\varepsilon_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$
<p>مرحله ۲: محاسبه کرنش مؤثر در FRP های برشی</p> <p>کرنش مؤثر در FRP های U شکل باید با استفاده از ضریب کاهش چسبندگی، K_v، تعیین گردد. این ضریب با استفاده از روابط (۱۰-۷) تا (۱۰-۱۰) محاسبه می شود.</p>	$L_e = \frac{2,500}{[(1)(0.0065 \text{ in.})(33 \times 10^6 \text{ psi})]^{0.58}} = 2.0 \text{ in.}$ $k_1 = \left(\frac{3,000 \text{ psi}}{4,000}\right)^{2/3} = 0.82$ $k_2 = \left(\frac{16 \text{ in.} - 2.0 \text{ in.}}{16 \text{ in.}}\right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(2 \text{ in.})}{468(0.016)} = 0.192 \leq 0.75$

روند حل	محاسبات
$L_e = \frac{2,500}{(nt_f E_f)^{0.58}}$ $k_1 = \left(\frac{f'_c}{4,000} \right)^{2/3}$ $k_2 = \left(\frac{d_f - L_e}{d_f} \right)$ $\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$ <p>کرنش مؤثر می تواند از رابطه (۱۰-۶b) به صورت زیر محاسبه گردد:</p> $\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004$	$L_e = \frac{416}{\left[(1)(0.1651mm)(227.53kN/mm^2) \right]^{0.58}}$ $L_e = 50.8mm$ $k_1 = \left(\frac{20.68kN/mm^2}{254} \right)^{2/3} = 0.82$ $k_2 = \left(\frac{406.4mm - 50.8mm}{406.4mm} \right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(50.8mm)}{468(0.016)} = 0.192 \leq 0.75$ $\varepsilon_{fe} = 0.192(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$
<p>مرحله ۳: محاسبه سهم FRP در مقاومت برشی</p> <p>سطح مقطع FRP برشی می تواند به صورت زیر محاسبه شود:</p> $A_{fv} = 2nt_f w_f$ <p>تنش مؤثر در FRP از قانون هوک بدست می آید:</p> $f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$ <p>سپس سهم برشی FRP از رابطه (۱۰-۳) محاسبه می گردد.</p> $V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f}$	$A_{fv} = 2(1)(0.0065in.)(10in.) = 0.13in.^2$ $A_{fv} = 2(1)(0.1651mm)(254mm) = 83.87mm^2$ $f_{fe} = (0.0031)(33000ksi) = 102ksi$ $f_{fe} = (0.0031)(227.52kN/mm^2) = 0.703kN/mm^2$ $V_f = \frac{(0.13in.^2)(102ksi)(1)(16in.)}{(12in.)}$ $V_f = 17.7kips$ $V_f = \frac{(83.87mm^2)(0.703kN/mm^2)(1)(406.4mm)}{(304.8mm)}$ $V_f = 78.73kN$
<p>مرحله ۴: محاسبه ظرفیت برشی مقطع</p> <p>ظرفیت برشی طراحی از رابطه (۱۰-۲) با در نظر گرفتن $\psi_f = 0.85$ برای FRP های U شکل بدست می آید.</p> $\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f)$	$\phi V_n = 0.85[36.4 + 19.6 + (0.85)(17.7)]$ $\phi V_n = 60.4kips > V_u = 60kips$ $\phi V_n = 0.85[162 + 87.2 + (0.85)(78.73)]$ $\phi V_n = 268.7kN > V_u = 267kN$ <p>مقطع مقاوم سازی شده قادر به تحمل برش اعمالی است.</p>

مقاوم سازی برشی یک ستون خارجی :

یک ستون با مقطع مربع با اضلاع 24 in. موجود بوده و افزایش مقاومت برشی 60 kips مورد نیاز می باشد .
 $(\Delta Vu = 60 \text{ kips})$. ستون در یک پارکینگ غیربسته قرار داشته و تحت شرایط آب و هوایی و حرارتی مختلف قرار می گیرد . یک روش مقاوم سازی ستون استفاده از FRP می باشد .
 یک سیستم FRP با الیافهای شیشه ای E و همراه با اپوکسی که به صورت کامل دورپیچ می شود ، جهت بهبود رفتار ستون و مقاوم سازی آن انتخاب می گردد . خصوصیات سیستم FRP که توسط سازنده ارائه گردیده در جدول آورده شده است . محاسبات مربوط به طراحی جهت رسیدن به تعداد دورپیچ های کامل لازم ، در زیر آورده شده است .

جدول ۱۳-۵ : خصوصیات سیستم FRP گرفته شده از سازنده آن

(خصوصیات بر اساس خصوصیات لایه ای می باشند)

t, f ضخامت هر لایه	0.051 in.	1.29 mm
f_{fu}^* مقاومت کششی نهایی تضمین شده	80,000 psi	551.6 N/mm ²
ϵ_{fu} کرنش شکست تضمین شده	0.020 in./in.	0.020 mm/mm
E_f مدول الاستیسیته	4,000,000 psi	27,579 N/mm ²

روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۱ : محاسبه خصوصیات مواد طراحی</p> <p>ستون در یک شرایط محیطی خارجی قرار گرفته و جهت مقاوم سازی از GFRP استفاده می شود . بنابراین بر اساس جدول ۸-۱ ، ضریب کاهش محیطی 0.65 در نظر گرفته می شود .</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.65)(80ksi) = 52ksi$ $(0.65)(551.6 N / mm^2) = 358.5 N / mm^2$ $(0.65)(0.020) = 0.013$
<p>مرحله ۲ : محاسبه مقدار کرنش مؤثر در FRP</p> <p>کرنش مؤثر در حالت دورپیچ کامل از رابطه ۱۰-۶a محاسبه می شود .</p> $\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}$	<p>استفاده از کرنش مؤثر</p> $\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75(0.013) = 0.010$ $\epsilon_{fe} = 0.004 \quad \therefore$

روند حل	محاسبات
<p>مرحله ۳ : محاسبه سطح مقطع FRP مورد نیاز</p> <p>سهم برشی لازم از FRP بر اساس افزایش در ظرفیت مورد نیاز ، مقاومت ، ضریب کاهش برشی و ضریب کاهش مربوط به حالت دورپیچ کامل مقطع ، محاسبه می شود .</p> $V_{f,reqd} = \frac{\Delta V_u}{\phi(\psi)}$ <p>سطح مقطع لازم از FRP با برقراری رابطه (۱۰-۳) محاسبه می شود . این مقدار بر حسب فاصله نوارها از هم نشان داده شده است .</p> $A_{f,reqd} = \frac{V_{f,reqd} S_f}{\epsilon_{fe} E_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}$	$V_{f,reqd} = \frac{60kips}{0.85(0.95)} = 74.3kips$ $V_{f,reqd} = \frac{266.9kN}{0.85(0.95)} = 330.5kN$ $A_{f,reqd} = \frac{(74.3kips)s_f}{(0.004)(4000ksi)(1)(24in.)} = 0.194s_f$ $A_{f,reqd} = \frac{(330.5kN)s_f}{(0.004)(27.6kN/mm^2)(1)(609.6mm)}$ $A_{f,reqd} = 4.91s_f$
<p>مرحله ۴ : تعیین تعداد لایه ها ، عرض هر کدام و فاصله آنها از یکدیگر</p> <p>تعداد لایه ها بر حسب عرض لایه ها و تعداد آنها از یکدیگر به صورت زیر محاسبه می شود :</p> $n = \frac{A_{f,reqd}}{2t_f w_f}$	$n = \frac{0.194s_f}{2(0.051in.)w_f} = 1.90 \frac{s_f}{w_f}$ $n = \frac{4.91s_f}{2(1.29mm)w_f} = 1.90 \frac{s_f}{w_f}$ <p>استفاده از دو لایه (n = 2) ممتد و بدون قطع شدگی در طول ارتفاع ستون با $s_f = w_f$.</p>