

# بررسی رفتار دال‌های بتنی تقویت شده با میلگرد فولادی و گریتنینگ کامپوزیتی پالتروُد شده

محمود مهرداد شکرپه<sup>۱</sup>، محمد حیدری رارانی<sup>۲</sup>

(دریافت: بهمن ۸۷، پذیرش: مهر ۸۸)

## چکیده

در این مقاله ابتدا رفتار گریتنینگ‌های کامپوزیتی ساخته شده از مقاطع پالتروُد شده، به دلیل کاربرد وسیع آنها در سازه‌های صنایع پتروشیمی، به روش تئوری و المان محدود بررسی شده است. سپس این مواد به عنوان تقویت‌کننده بتن و جایگزینی برای آرماتورهای فلزی، به دلیل مقاومت خوردگی بالا، پیشنهاد شده‌اند. به دلیل اهمیت کنترل جابجایی در سازه‌های بتنی، رفتار بار-جابجایی آنها به صورت تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل تحلیلی ارائه شده برای دال بتنی تقویت شده با گریتنینگ‌های پالتروُد شده، معادله دیفرانسیل حاکم بر صفحات ارتوتروپیک با تعریف ضرایب سفتی در جهت‌های اصلی توسعه داده شده و برای حالت خمش چهار نقطه‌ای بصورت دقیق حل شده است. سپس با فرض یک طرفه بودن دال، بار نهایی شکست با اصلاح روابط تئوری مربوط به آرماتورهای فلزی برای گریتنینگ‌ها، محاسبه گشته است. در روش المان محدود با بکارگیری نرم‌افزار ANSYS و تعریف رفتار غیرخطی بتن و استفاده از معیار تخریب سه بعدی برای ترک خوردگی و خردشدگی، بار نهایی تخریب و بار در شروع ترک خوردن تخمین زده شده است. برای مقایسه رفتار بار-جابجایی و میزان تغییر باربری نهایی دال تقویت شده با گریتنینگ پیشنهادی، یک دال تقویت شده با میلگرد فولادی (با سفتی معادل گریتنینگ) نیز مدل‌سازی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از روش تحلیلی و المان محدود، با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط محققان دیگر مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد جایگزینی میلگردهای فولادی با گریتنینگ‌های پالتروُد شده، علاوه بر کاهش خوردگی، باعث افزایش ۱۲ درصدی بار نهایی شکست و افزایش ۱۱۶/۵ درصدی بار شروع ترک می‌شود.

## کلمات کلیدی

گریتنینگ‌های پالتروُد شده، دال بتنی تقویت شده، روش المان محدود، حل تئوری

## Comparison of Concrete Slabs Behavior Reinforced with Steel Rebars and FRP Pultruded Grating

M.M.Shokrieh, M.Heidarirarani

### ABSTRACT

The main object of this research is investigation on replacement of steel rebars with GFRP pultruded gratings in one-way concrete slabs. Since the deflection control is more important than the load control in civil engineering structures, this study focused on load-deflection behavior of concrete slabs. A closed-form relation for the load-deflection of a one-way slab is, at first, obtained by considering slab as an orthotropic plate with different stiffnesses in principal directions. In addition, the ultimate load capacity of slab reinforced with pultruded grating is calculated by modifying available theoretical equations for steel reinforcements. Using a finite element code, ANSYS software, with an exact nonlinear behavior of concrete and a 3-D failure criterion for cracking and crushing, the ultimate failure load and initial cracking load are estimated numerically. Also, a concrete slab reinforced with steel, the same extensional stiffness ( $E \times A$ ) as grating, is modeled to investigate the increasing of ultimate load. All the results are compared with the available data from other researches. The obtained results show that the replacing of steel reinforcement by FRP pultruded gratings is caused 12 percent increase in the ultimate load and 116.5 percent increase in the initial cracking load.

### Key words

Pultruded Gratings, Reinforced Concrete Slab, FEM, Analytical Solution

۱.استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، Shokrieh@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲.دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، heidarirarani@iust.ac.ir

مواد کامپوزیتی FRP به دلیل خواصی از قبیل مقاومت خوردگی بالا، چگالی پایین، دوام بالا، نسبت استحکام به وزن بالا و راحتی نصب، دارای استفاده‌های گوناگونی در صنایع مختلف می‌باشند. از این بین گریتینگ‌های کامپوزیتی در صنایع شیمیایی در اطراف مخازن اسید و یا در سکوهای نفتی به دلیل مقاومت به خوردگی بالا کاربرد وسیعی دارند [۱]. همچنین طبق بررسی آماری انجام شده در مرجع [۲]، آمریکای شمالی سالانه سرمایه زیادی را صرف سازه‌های فولادی که در معرض شرایط سخت محیطی قرار دارند می‌کند. Zhang و همکارانش [۲] به این نتیجه رسیده‌اند که در سازه‌های بتنی تقویت شده با میلگردهای فلزی به خصوص در بدنه پل‌ها، که در معرض محیط خورنده مانند آب شور دریا هستند، زنگ‌زدگی میلگردها به مرور باعث تخریب بتن می‌گردد. آنها از بین راه‌حل‌های مختلف مانند محافظت کاتدی، استفاده از پوشش اپوکسی و غیره، به این نتیجه رسیدند که مواد کامپوزیت زمینه پلیمری دارای مقاومت به خوردگی بالایی نسبت محیط‌های خورنده شدید می‌باشند که استفاده از آنها را توجیه می‌نماید. در پروفیل‌هایی که با فرایند پالترورژن تولید می‌شوند به دلیل قرار گرفتن الیاف در یک جهت، دارای مقاومت کششی و خمشی خوبی در آن جهت می‌باشند. ویژگی‌های ذکر شده برای FRP ها، باعث شده‌اند که محققان این مواد را با مواد دیگر که از لحاظ خواص مکانیکی ضعیف هستند استفاده کنند و بدین طریق خواص آنها را بهبود بخشند. برای مثال میله‌های GFRP به عنوان تقویت‌کننده درون بتن استفاده شده‌اند و یا ورق‌های GFRP برای تقویت خارجی بتن به کار گرفته شده‌اند. در سال ۲۰۰۵، Biddah [۱] نه دال بتنی را تحت خمش آزمایش کرد. در آزمایشات وی، دو نمونه با میلگردهای فولادی، دو نمونه با میله‌های FRP و چهار نمونه دیگر با گریتینگ‌های کامپوزیتی تقویت شده بودند و یک گریتینگ پالترود شده به تنهایی نیز آزمایش شد. همچنین او با تغییر ضخامت دال، مودهای تخریب را

بررسی نمود. Bank و همکارانش [۳ و ۴] چندین دال بتنی تقویت شده با دو نوع گریتینگ متفاوت که برای پل‌ها استفاده می‌شدند را آزمایش کردند. Hall و Mottram [۵] دوازده تیر بتنی که با پنل‌های FRP در قسمت کششی تقویت داخلی شده بودند را آزمایش خمش چهار نقطه‌ای کردند. همچنین در سال ۱۹۹۳، Bank و Xi [۶] چندین دال بتنی را با گریتینگ‌های پالترود شده I و T شکل آزمایش کردند و مودهای شکست، الگوهای ترک و رفتارهای خمشی و برشی را بررسی نمودند.

از آنجا که گریتینگ‌های پالترود شده GFRP مدول الاستیسیته نسبتاً پایینی دارند، محدوده بارگذاری آنها محدود می‌باشد. لذا با افزودن لایه‌ای بتن بر گریتینگ‌ها، سفتی خمشی مجموعه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و در نتیجه بار مجاز نهایی به ازای بیشینه جابجایی مشخص افزایش می‌یابد [۱]. در این مقاله استفاده از گریتینگ‌های کامپوزیتی پالترود شده برای تقویت بتن پیشنهاد شده است. در واقع هدف اصلی، معرفی جایگزینی مناسب برای میلگردهای فولادی است به گونه‌ای که بتوانند به ازای سفتی کششی ( $E \times A$ ) یکسان با آرماتورهای فلزی، محدوده جابجایی را ارضاء نمایند. علاوه بر رفتار بار-جابجایی دال‌های تقویت شده با گریتینگ، که در طراحی نقش به‌سزایی دارد، دسترسی آسان به گریتینگ‌های پالترود شده GFRP در صنعت، سادگی نصب، نیروی کار کمتر و حمل و نقل راحت‌تر دلایلی است که آنها را جایگزین خوبی به شمار می‌آورد.

## ۲- گریتینگ‌های پالترود شده GFRP

گریتینگ پالترود شده، شامل تعدادی میله‌های I یا T شکل در جهت طولی است که در جهت عرضی به وسیله میله‌هایی به هم متصل گشته‌اند. جنس این میله‌ها از الیاف شیشه و یک رزین گرماسخت مانند پلی‌استر است که به روش پالترورژن تولید می‌شوند. الیاف دم‌اسبی<sup>۱</sup> پیوسته

<sup>۱</sup> Roving

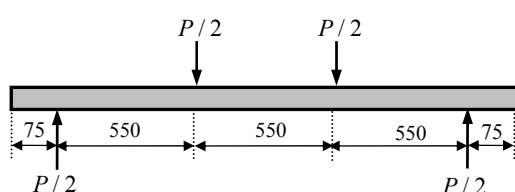


### ۳- بررسی رفتار بار- جابجایی گریتنینگ‌ها

#### ۳-۱- تئوری

از آنجا که یک گریتنینگ مجموعه‌ای از تیرهای I شکل است که توسط میله‌های عرضی به هم متصل شده‌اند، می‌توان برای بررسی جابجایی آن تحت خمش چهار نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM-D790 [۱۳] (شکل ۳)، از یک تیر I شکل استفاده کرد و جابجایی بحرانی‌ترین بخش تیر (تیر وسط) را از رابطه (۱) به دست آورد [۱۱].

$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{56.46EI} \quad (1)$$



شکل (۳): شرایط مرزی و نحوه اعمال بار (ابعاد به میلی‌متر)

#### ۳-۲- تحلیل المان محدود

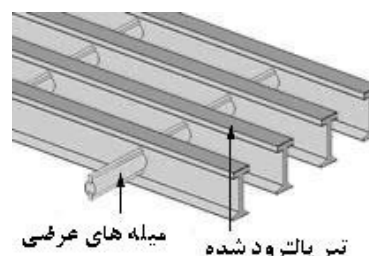
در تحلیل المان محدود از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. ابتدا یک تیر I شکل با المان Beam188 مدل شده و جابجایی آن تحت خمش چهار نقطه‌ای به دست آمده است. سپس برای بررسی رفتار کلی گریتنینگ، کل سازه با ابعاد دقیق مقطع و در نظر گرفتن میله‌های عرضی مدل شده و با المان Solid45 و خواص ارتوتروپیک ذکر شده در جدول (۱)، مش‌بندی شده است. شکل (۴) مدل المان محدود یک گریتنینگ پالتروود شده را نشان می‌دهد.

متراکم از جنس شیشه در وسط مقطع I یا T، به آنها خاصیت تک‌جهته می‌بخشد. همچنین لایه نمدی<sup>۱</sup> در سطح خارجی علاوه بر اینکه از ترک خوردن و لب‌پریدگی جلوگیری می‌کند، همانند یک لایه رزین در سطح خارجی مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد. شکل ۱ نمایی از مقطع یک میله I شکل پالتروود شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمایی از مقطع میله I پالتروود شده [۱۶]

میله‌های عرضی شامل یک هسته میانی و دو فاصله‌انداز است که به طور مکانیکی به مقاطع I شکل محکم می‌شوند. شکل ۲ یک گریتنینگ کامل را نشان می‌دهد.



شکل (۲): گریتنینگ FRP پالتروود شده [۱۶]

در این مقاله از مشخصات گریتنینگ‌ها با نام تجاری Duradeck [۱۵] استفاده شده است. گریتنینگ‌های کامپوزیتی پالتروود شده علاوه بر مقاومت به ضربه و خوردگی بالا نسبت به گریتنینگ‌های فولادی، از لحاظ وزنی، معادل ۱/۳ گریتنینگ‌های فولادی می‌باشند.

<sup>۱</sup> Mat

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی گرتینگ‌های پالتروود

شده (Duradek-I-6000)

خواص مکانیکی	
۲۴۵	استحکام خمشی (MPa)
۳۲/۴	مدول الاستیسیته (GPa)
خواص فیزیکی	
۶/۶۳۷	مساحت سطح مقطع در عرض (mm <sup>4</sup> /mm)
۱۲۶۷/۳	ممان اینرسی در عرض (mm <sup>4</sup> /mm)
۰/۱۴۴	وزن (kN/m <sup>2</sup> )
۸ × ۱۰ <sup>-۶</sup>	ضریب انبساط حرارتی (mm/mm/°c)

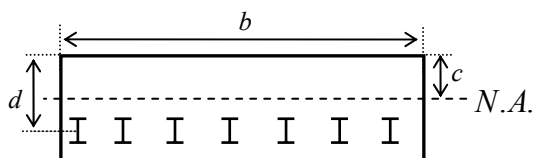
$$D_{xx} = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \left( I_{cx} + \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right) I_{sx} \right) \quad (۳)$$

$$D_{yy} = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \left( I_{cy} + \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right) I_{sy} \right) \quad (۴)$$

$$D_{xy} = \nu_c \sqrt{D_{xx} D_{yy}} \quad (۵)$$

که  $I_{sx}$  و  $I_{cx}$  به ترتیب ممان اینرسی بتن و تقویت‌کننده در مقطع عمود بر محور  $x = cte$ ،  $I_{sy}$  و  $I_{cy}$  به ترتیب ممان اینرسی بتن و تقویت‌کننده در مقطع عمود بر محور  $y = cte$ ،  $E_s$  و  $E_c$  نیز به ترتیب مدول الاستیسیته بتن و تقویت‌کننده می‌باشند. در روابط (۳) و (۴)، ممان اینرسی مقطع ارتباط شدیدی با محل محور خنثی دارد لذا محل محور خنثی با فرض خرد شدن بتن قبل از تسلیم شدن تقویت‌کننده، و فرض شکل تنش Whitney [۱۰] مطابق شکل (۵) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\frac{0.85 f'_c b d}{A_{FRP} E_{FRP} \epsilon_{cu}} a^2 + d a - 0.85 d^2 = 0 \quad (۶)$$

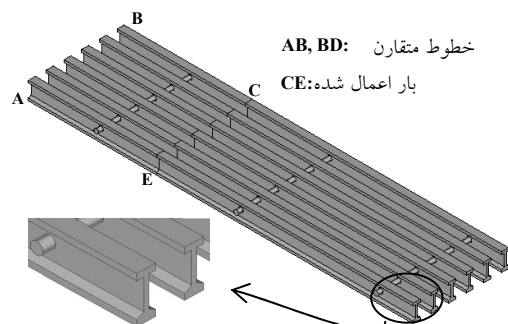


شکل (۵): مقطع دال بتنی تقویت شده با گرتینگ‌ها

که  $c = \frac{a}{0.85}$  محل محور خنثی،  $b$  عرض قطعه،  $d$  فاصله سطح فشاری بتن تا مکان هندسی تقویت‌کننده،  $\epsilon_{cu}$  کرنش مجاز بتن که ۰/۰۰۳ فرض شده،  $A_s$  مساحت مقطع تقویت‌کننده‌ها،  $f'_c$  استحکام فشاری بتن می‌باشند. اگر شرایط مرزی و محل بارگذاری همانند شکل (۶) در نظر گرفته شوند آنگاه می‌توان برای بارگذاری خطی در هر فاصله دلخواه  $x = x_1$  نوشت:

$$P(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(y) \sin(m\pi x/l) \quad (۷)$$

$$P_m(y) = (2P_0/l) \sin(m\pi x_1/l) \text{ که}$$



شکل (۴): مدل المان محدود یک گرتینگ پالتروود شده

۴- بررسی رفتار بار-جابجایی دال بتنی تقویت شده با گرتینگ پالتروود شده

۴-۱ حل تحلیلی

یک دال بتنی تقویت شده را می‌توان یک ورق ارتوتروپیک با معادله جابجایی (۲) در نظر گرفت.

$$D_{xx} \frac{\partial^4 w}{\partial^4 x} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial^2 x \partial^2 y} + D_{yy} \frac{\partial^4 w}{\partial^4 y} = P(x, y) \quad (۲)$$

که  $D_{xx}$  و  $D_{yy}$  ضرایب سفتی در جهت‌های اصلی ورق و  $H = D_{xy} + 2D_s$  می‌باشند. برای یک دال بتنی  $D_s = 0$  و بقیه ضرایب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۹]:

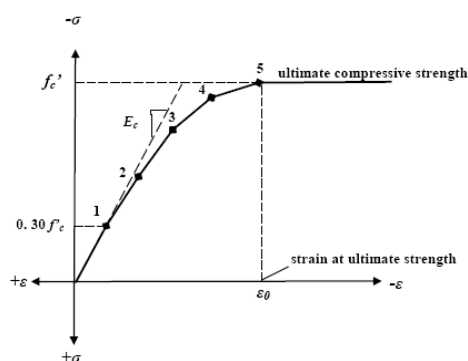
رفتار واقعی تر بتن در آن به نتایج تجربی دست یافت با ارزش به نظر می‌رسد. در شبیه‌سازی رفتار دال بتنی از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است که شناخت جزئیات نرم‌افزار برای یک تحلیل صحیح لازم می‌باشد.

#### ۱-۲-۴- المان‌های استفاده شده

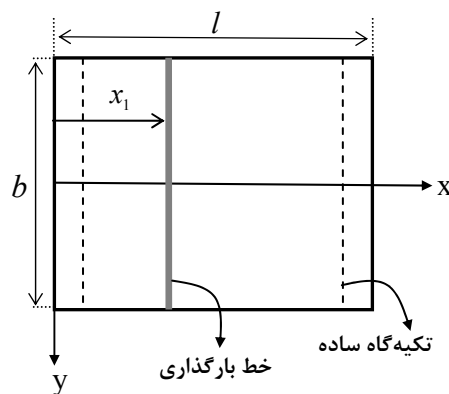
برای بتن از المان Solid65 که خاصیت نمایش ترک و خوردشدگی را دارد [۱۷]، برای تقویت‌کننده‌ها از المان Beam188 که قابلیت تعریف انواع سطح مقطع‌ها را دارد و برای صفحات فولادی در محل تکیه‌گاه‌ها و اعمال بار، از المان Solid45 استفاده شده است.

#### ۲-۲-۴- خواص مواد

در مدل‌سازی رفتار بتن در نرم‌افزارهای المان محدود، معمولاً رفتار آن را کاملاً خطی الاستیک در نظر می‌گیرند در حالیکه بتن یک ماده شبه-ترد است و در کشش و فشار رفتاری متفاوت دارد. لذا برای بررسی رفتار واقعی تر بتن، می‌توان تا  $0.3f'_c$  رفتار را الاستیک و از این نقطه تا جایی که مقدار کرنش به مقدار مجاز  $0.003$  می‌رسد به صورت چند خطی در نظر گرفت و به عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده کرد. رفتار تنش-کرنش تک‌جهته بتن در فشار مانند شکل ۷ در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): رابطه تنش-کرنش تک‌جهته فشاری ساده شده برای بتن [۱۷]



شکل (۶): شرایط مرزی و نحوه بارگذاری صفحه مستطیلی

برای حل معادله (۲)، به دلیل شرایط مرزی خاص می‌توان از روش حل لوی (Levy method) [۹] استفاده کرد که جایجایی نهایی به شکل سری فوریه حاصل می‌شود:

(۸)

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[ B_m \cosh(\alpha_m y) + C_m y \sinh(\alpha_m y) + (2P_0 l^3 / D_x m^4 \pi^4) \sin \frac{m\pi x_1}{l} \right] \sin \frac{m\pi x}{l}$$

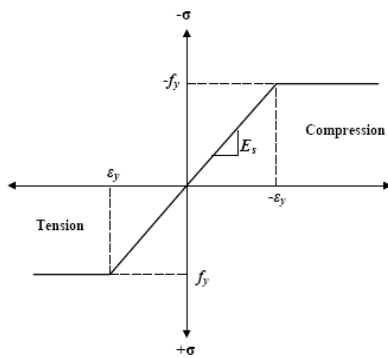
که  $P_0$  شدت بار اعمالی  $(N/m)$  و  $\alpha_m = (m\pi/l)\sqrt{H/D_y}$  می‌باشند. ثابت‌های  $B_m$  و  $C_m$  برای ورقی با شرایط مرزی دو سر آزاد و دو سر روی تکیه‌گاه ساده، با اعمال شرایط (۹) در  $y = b/2$  تعیین می‌شوند.

$$\begin{cases} M_y = -\left( D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \\ Q_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial w}{\partial y} + H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

#### ۲-۴- تحلیل المان محدود

از آنجا که تحلیل بتن در نرم‌افزارهای مختلف، با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و ترک خوردگی آن امری زمان‌بر محسوب می‌شود انتخاب نرم‌افزاری که بتوان با شبیه‌سازی

همچنین برای میلگردهای فولادی با مدول الاستیسیته  $210\text{GPa}$ ، ضریب پواسون  $0/3$  و استحکام تسلیم  $410\text{MPa}$  رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک با خواص کششی- فشاری یکسان نشان داده شده در شکل (۸) استفاده شده است.



شکل (۸): رفتار تنش- کرنش فولاد [۱۲]

در محل تکیه‌گاه‌ها و اعمال بار، برای جلوگیری از تخریب موضعی، از ورق‌های فولادی با مدول الاستیسیته  $210\text{MPa}$ ، ضریب پواسون  $0/3$  با رفتار الاستیک استفاده شده است.

### ۳-۲-۴- معیار تخریب بتن

در این مقاله از مدل William & Warnke [۷ و ۸] که در شکل (۹) نشان داده شده است به عنوان معیار تخریب سه بعدی برای بتن به کار گرفته شده است. در این مدل تنش‌های اصلی غیر صفر در جهت x و y با  $\sigma_{yp}$  و  $\sigma_{xp}$  نشان داده شده و سه سطح نشان داده شده تصویرهایی در صفحه  $\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$  می‌باشند که مود تخریب به علامت  $\sigma_{zp}$  بستگی دارد.

رابطه (۱۰) تغییرات تنش- کرنش را برای بتن نشان می‌دهد. با استفاده از روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) پنج نقطه مشخص شده در شکل ۷ بدست آمده و به عنوان اطلاعات ورودی در نرم‌افزار استفاده شده‌اند.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (11)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (12)$$

خواص بتن استفاده شده در این مقاله در جدول (۲) نشان داده شده است. که  $f'_c$  استحکام فشاری نهایی تک‌جهته، ضریب پواسون،  $\beta_t$  ضریب انتقال برش که بین صفر تا یک تغییر می‌کند و نشان‌دهنده ترک‌های برشی قطری است،  $E_c = 15800\sqrt{f'_c}$  مدول الاستیسیته بتن (برحسب  $kg/cm^2$ )،  $f_t = 2\sqrt{f'_c}$  استحکام کششی نهایی تک‌جهته (برحسب  $kg/cm^2$ ) می‌باشند [۱۰ و ۱۲].

جدول (۲): خواص بتن استفاده شده در مدل المان محدود

$f'_c$ (MPa)	$\nu$	$\beta_t$
۳۰	۰/۲	۰/۲

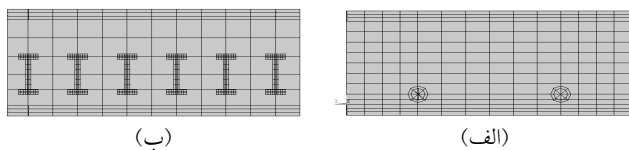
خواص مورد نیاز برای گریتنینگ‌های پالترود شده، که در جدول (۱) ذکر نشده است، از مرجع [۱۴] گرفته شده است و در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): خواص گریتنینگ پالترود شده [۱۴]

۰/۴۵	درصد حجمی، $\nu_f$
۴/۱۴	مدول برشی، $E_s$ (GPa)
۰/۲۶	ضریب پواسون، $\nu_x$
۸/۲۶	مدول الاستیسیته عرضی، $E_y$ (GPa)
۳۲/۴	مدول الاستیسیته طولی، $E_x$ (GPa)



شکل (۱۱) مقطع دال تقویت شده با گریتینگ و  $4\phi 16$  میلگرد فولادی (مقدار میلگرد با سفتی کششی معادل گریتینگ) را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): مقطع دال بتنی تقویت شده با الف) میلگرد فولادی ب) گریتینگ کامپوزیتی

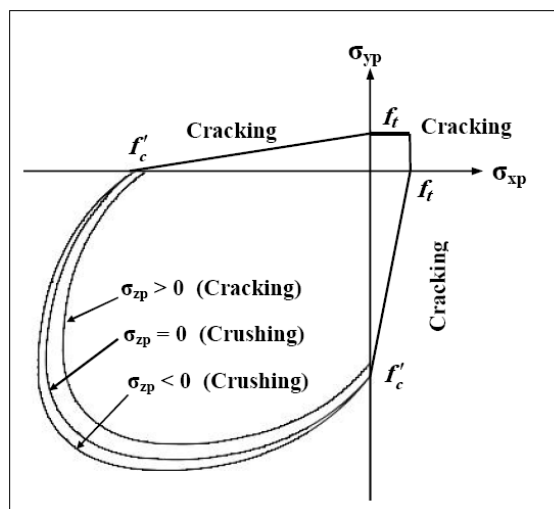
#### ۵- محاسبه بار نهایی شکست

از آنجا قطر آرماتور فلزی نسبت به ضخامت تیر یا دال ناچیز می‌باشد در روابط تعادل تنش در مقطع بتن از تغییرات تنش درون میلگرد صرف نظر می‌شود و با توجه به فرم تنش Whitney [۱۰] ممان نهایی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M_u = 0.85 f'_c a b (d - a/2) \quad (13)$$

که برای خمش چهار نقطه‌ای بار نهایی برابر  $P_u = (6/l) \times M_u$  است. اما با جایگزینی گریتینگ‌ها برای پاسخ دقیق‌تر باید تغییرات تنش در مقطع I را در نظر گرفت. به عبارت دیگر، در طرف دوم معادله (۱۳) عبارت جدیدی اضافه می‌گردد.

$$M_u = 0.85 f'_c a b (d - a/2) + \Delta M_u \quad (14)$$

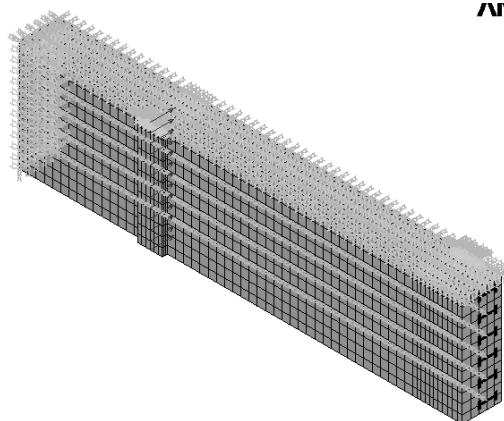


شکل (۹): مدل William-Warnke برای تخریب بتن [۷ و ۸]

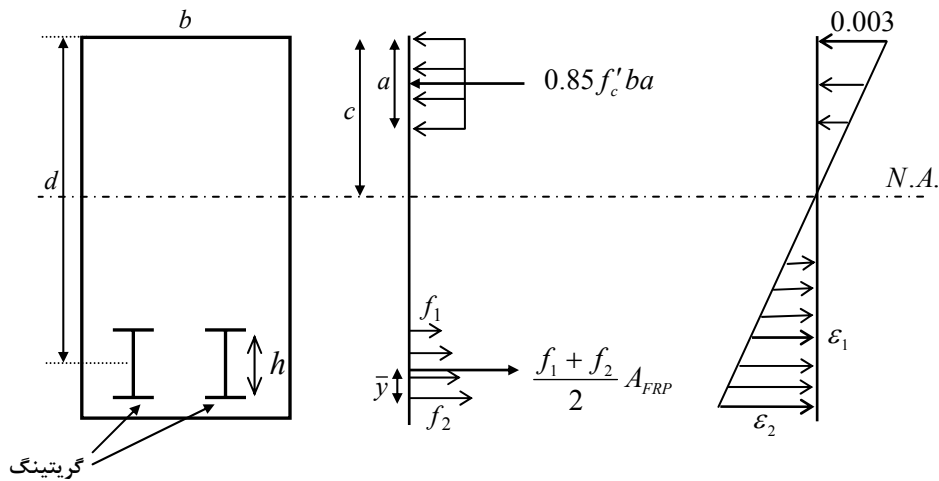
#### ۴-۲-۴- هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی

به منظور مقایسه نتایج FEM با نتایج تجربی از ابعاد دال بتنی در [۱]،  $1800 \times 450 \times 80$  میلیمتر با  $1650$  دهانه دال و  $75$  mm فاصله تکیه‌گاه‌ها از لبه‌ها، استفاده شده است. از آنجا که تحلیل بتن در ANSYS یک آنالیز غیرخطی زمان‌بر است سعی شده است با اعمال شرایط مرزی متقارن، مدت زمان اجرای برنامه کاهش داده شود. شکل ۱۰ مدل المان محدود دال بتنی تقویت شده با گریتینگ‌های پالتروود شده را با شرایط مرزی و بار اعمال شده نشان می‌دهد.

ANSYS



شکل (۱۰): مدل المان محدود دال بتنی تقویت شده با گریتینگ‌های پالتروود شده



شکل (۱۲): توزیع تنش در مقطع دال بتنی (در انتهای مقاله)

جدول (۴): مقایسه نتایج بدست آمده برای گرتینگ

تجربی	FEM	تئوری	جابجایی، mm
۵۵/۸	۵۹/۳	۴۵/۵۸	

با توجه به نتایج حاصل در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که می‌توان بیشینه جابجایی یک گرتینگ پالترود شده را، به دلیل اینکه رفتار یک طرفه‌ای دارد، با یک تیر I شکل تخمین زد.

## ۲-۶- نتایج دال بتنی تقویت شده

خلاصه‌ای از نتایج تحلیلی، FEM و تجربی برای دال بتنی تقویت شده با گرتینگ‌ها با وزن ۱۱/۶ کیلوگرم و میلگردهای فولادی با وزن ۱۱/۳ کیلوگرم، در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): مقایسه نتایج بدست آمده برای دال بتنی

بیشینه جابجایی نهایی mm (به ازای بار تجربی)			بار نهایی شکست kN			تقویت کننده بتن
تجربی	FE M	تئوری	تجربی	FEM	تئوری	
۳۴/۱	۳۲/۷	۴۴/۱۵	۶۵	۶۹/۳	۶۰/۲۵	میلگرد فولادی (4φ16)
۵۱/۲	۱۷ ۵۸	۴۹/۴۷	۷۴/۵	۸۱/۶	۶۶/۳	گرتینگ پالترود شده

با  $\Delta M_u$  با ممان‌گیری حول محور نیرویی مقاطع I شکل، با توجه به شکل (۱۲) بدست می‌آید:

$$\Delta M_u = 0.85 f_c' b a (h/2 - \bar{y}) \quad (15)$$

که  $\bar{y}$  مرکز ثقل دوزنقه تنش در تقویت کننده است:

$$\bar{y} = \frac{2f_1 + f_2}{f_1 + f_2} \times \frac{h}{3}, f_1 = E_s \varepsilon_1, f_2 = E_s \varepsilon_2 \quad (16)$$

از طرفی با استفاده از دیاگرام کرنش در شکل (۱۲) می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_1 = 0.003 \left( \frac{d - h/2 - c}{c} \right), \quad (17)$$

$$\varepsilon_2 = 0.003 \left( \frac{d + h/2 - c}{c} \right)$$

که با جایگزینی رابطه (۱۷) در (۱۶) بدست می‌آید:

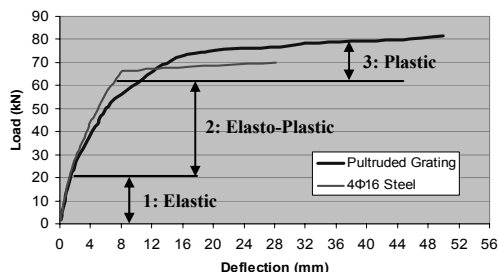
$$\bar{y} = \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{h}{6(d-c)} \right) \quad (18)$$

## ۶- مقایسه نتایج تحلیلی، المان محدود و تجربی

### ۶-۱- نتایج گرتینگ

در این بخش جابجایی یک سازه گرتینگ کامپوزیتی به ازای بار تجربی ۱۸/۲ kN [۱] مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج سه روش تحلیلی، المان محدود و تجربی با هم مقایسه شده‌اند.

در شکل ۱۵ رفتار بار-جابجایی برای دال بتنی تقویت شده با گریتینگ و میلگرد فولادی (4φ16) نشان داده شده است.



شکل (۱۵): رفتار بار-جابجایی دال تقویت شده با میلگرد

فولادی و گریتینگ پالترود شده

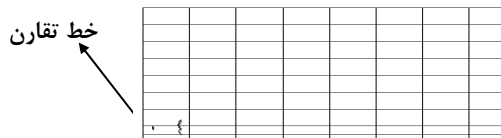
در شکل (۱۵) می‌توان رفتار تقریباً واقعی یک دال بتنی مسلح شده را، که با روش المان محدود بدست آمده است مشاهده کرد. به گونه‌ای که در ناحیه (۱) بتن رفتار کاملاً الاستیک دارد و در انتهای این ناحیه، با تغییر شیب نمودار ترک در ناحیه کششی شروع می‌شود. در ناحیه (۲) با رشد ترک رفتار غیر خطی بتن ظاهر می‌شود تا اینکه در انتهای این ناحیه با جاری شدن تقویت‌کننده یا خرد شدن بتن در قسمت فشاری وارد ناحیه (۳) می‌گردد و با ادامه بارگذاری شکست نهایی رخ می‌دهد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

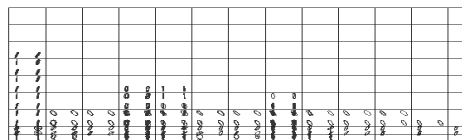
از نتایج بدست آمده در این مقاله می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- ۱- برای بررسی رفتار بار-جابجایی دال‌ها با هر نوع تقویت‌کننده، بارگذاری و شرایط مرزی، می‌توان از معادله کلی ورق‌های ناهمسانگرد با تعریف ضرایب سفتی در جهت‌های اصلی استفاده نمود. نتایج تحلیلی این تحقیق همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد.
- ۲- با تعریف یک رفتار غیرخطی برای بتن و ارائه یک معیار تخریب سه بعدی (معیاری که اثرات بُرش در آن لحاظ شده است)، در نرم‌افزار ANSYS، می‌توان بار

از نتایج جدول (۵) می‌توان نتیجه گرفت که روش تئوری ارائه شده برای جابجایی و بار نهایی شکست در دال بتنی تقویت شده با گریتینگ، از دقت خوبی برخوردار می‌باشند. از آنجا که یکی از پارامترهای مهم در سازه‌های بتنی شروع ترک می‌باشد، از تحلیل المان محدود نیروی شروع اولین ترک در دال تقویت شده با میلگرد فولادی در نیروی ۷/۳ kN و با گریتینگ در نیروی ۱۵/۸ kN بدست آمده است. شکل (۱۳) مراحل رشد ترک را در دو بارگذاری مختلف برای دال تقویت شده با آرماتور فلزی نشان می‌دهد.



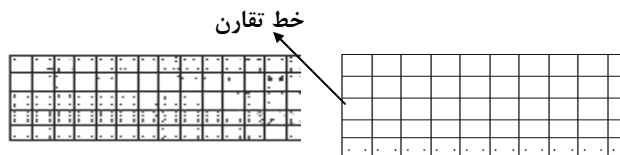
$$P = 7.3 \text{ kN (الف)}$$



$$P = 11.4 \text{ kN (ب)}$$

شکل (۱۳): (الف) شروع ترک (ب) رشد ترک در وسط دال بتنی تقویت شده با میلگرد فولادی

همچنین شکل (۱۴) رشد ترک در دال بتنی تقویت شده با گریتینگ پالترود شده را در شروع ترک و پایان تخریب نشان می‌دهد.



$$P = 71.32 \text{ kN (ب)}$$

$$P = 15.8 \text{ kN (الف)}$$

شکل (۱۴): (الف) شروع ترک (ب) رشد ترک در وسط دال بتنی تقویت شده با گریتینگ پالترود شده

- 5- Hall J. E., Mottram J. T., "Combined FRP Reinforced and Permanent Formwork for Concrete Members", Journal of Composite Construction, pp.78-86, 1998.
- 6- Bank L. C., Xi Z., "Pultruded FRP Grating Reinforced Concrete Slabs", International Symposium, 1993.
- 7- Rodolfo L. M., Frrari B., Prates. C. L., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Subjected to Impact Load", International Conference on structural mechanics in reactor technology, Czech Republic, 2003
- 8-] Chen W. F., "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw Hill, USA, 1992.
- 9- Ugural, A.C., "Stresses in Plates and Shells", McGraw-Hill, New York, 1981.
- 10- Macginley T. J., Choo B. S., "Reinforced Concrete", E & FN Spon, 1978.
- 11- Ferdinald P., Beer E., Johnston R., "Mechanics of Materials", McGraw-Hill, 1981.
- 12- Kachlakev D., Millaer T., "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates", Report for Federal Highway Administration, 2001.
- 13- ASTM D790-02, Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, 1997.
- 14- [www.irancomposites.org](http://www.irancomposites.org), Tehran, Iran.
- 15- [www.strongwell.com](http://www.strongwell.com), USA.
- 16- [www.mcnicol.com](http://www.mcnicol.com), USA.
- 17- ANSYS user's manual, 2003

شروع ترک و بار نهایی شکست را تخمین زد و همچنین نحوه رشد ترک در راستای ضخامت دال را بررسی کرد.

۳- با جایگزینی گریتهنگ‌های کامپوزیتی به جای آرماتور فلزی با سفتی کششی تقریباً یکسان، بزرگترین مشکل سازه‌های بتنی تقویت شده با میلگرد فلزی در نزدیکی دریاها که در معرض خوردگی شدید در اثر آب شور هستند، برطرف خواهد شد.

۴- سازه‌های گریتهنگ اگرچه در مقایسه با میلگرد فولادی ممکن است مقرون به صرفه نباشند اما استفاده از آنها از لحاظ سازه‌ای، باعث افزایش باربری نهایی بین ۱۲ تا ۱۴ درصدی در نمونه‌های تحلیل شده داشته است.

۵- استفاده از گریتهنگ‌های پالترود شده، بار شروع ترک را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است (تقریباً دو برابر). و همچنین از رشد سریع ترک‌های اولیه در قسمت کششی بتن با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) جلوگیری می‌نماید.

۶- نگهداری آسان، سبکی و نصب ساده گریتهنگ‌های کامپوزیتی در محل به خصوص در پل‌سازی‌ها (نسبت به آرماتوربندی)، و طول عمر بالای آنها به دلیل مقاومت به خوردگی بالای آنها، پیشنهاد استفاده از این نوع گریتهنگ‌ها را توجیه نیز می‌نماید.

## ۸- مراجع

- 1- Biddah A. "Structural Reinforcement of Bridge Decks using Pultruded GFRP Grating", Composite Structures, Vol.74, pp.80-88, 2006.
- 2- Zhang, B., Masmoudi, R., Benmokrane, B. "Behaviour of one-way concrete slabs reinforced with CFRP grid reinforcements", Construction and Building Materials, Vol. 18, pp. 625-635, 2004.
- 3- Bank L. C., Xi Z., Muley E. "Tests of full-size Pultruded FRP Grating Reinforced Concrete Bridge Decks", Conference Proceedings of ASCE, Materials Engineering congress, New York, pp.618-631, 1992.
- 4- Bank L. C., Frosting Y., Shapira A., "Three-dimensional FRP Grating Cages for Concrete Beams, ACI Structure Journal., pp.643-652, 1997.

