

ارائه رابطه تنش- کرنش برای بتن‌های پر مقاومت محصور شده در فشار تک محوره

هوشنگ دباغ^۱ و محمدسلیمان قوامی^{۲*}

۱- استادیار گروه عمران ، دانشگاه کردستان ، سنندج ، ایران h.dabbagh@uok.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری عمران ، دانشگاه کردستان ، سنندج ، ایران ms.ghavami@eng.uok.ac.ir

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی مشخصات بتن‌های پر مقاومت صورت گرفته است. یکی از کاربردهای مهم این نوع بتن‌ها در ستون ساختمان‌های بلند مرتبه تحت بارهای زیاد می باشد. مقاومت و شکل پذیری این نوع بتن‌ها با اعمال اثرات محصور شدگی به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به همین دلیل برای تقویت ستون‌های بتنی از ورقه‌های FRP استفاده می‌گردد. برای تعیین اثرات افزایش مقاومت و شکل پذیری و همچنین تعیین مکانیزم محصور شدگی ارائه یک مدل تنش-کرنش ضروری می‌باشد. در این مقاله تعدادی از مدل‌های تنش-کرنش موجود در حالت محصور شده با استفاده از داده‌های تجربی بدست آمده از کارهای تجربی سایر محققان مورد بررسی قرار می‌گیرند. مقاومت مشخصه بتن، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر تنش حداکثر به عنوان پارامترهای موثر در رفتار بتن در نظر گرفته می‌شوند. بر مبنای داده‌های تجربی انتشار یافته، روابطی برای محاسبه این پارامترها پیشنهاد می‌شود. بر اساس این بررسی، مدل جدیدی با در نظر گرفتن اثرات محصور شدگی برای بتن‌های پر مقاومت برای شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی تابعی از مقاومت مشخصه و فشار محصور شدگی می‌باشد. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط این مدل با نتایج تجربی ارائه شده برای دامنه وسیعی از مقاومت‌های مشخصه از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال و سطح‌های مختلف محصور شدگی تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رابطه تنش-کرنش، بتن پر مقاومت، محصور شدگی، مقاومت مشخصه، مدول الاستیسیته.

۱- مقدمه

بتن‌های پرمقاومت دارای کاربرد فراوانی در ساخت ستون‌های بتن مسلح، دیوارهای مرکزی سازه‌های بلند مرتبه، پایه پل‌ها و شمع‌های پیش تنیده دارند. برای شناخت رفتار المان‌های سازه‌ای بتن مسلح مدل‌های تنش-کرنش فشاری کامل در حالات محصور شده و محصور نشده مورد نیاز می‌باشد. اثرات محصور شدگی با استفاده از میلگردهای مسلح کننده به صورت خاموت یا مارپیچی به وجود می‌آید. تعدادی از آزمایش‌های انجام شده بر روی اثرات محصور شدگی با استفاده از اعمال فشار هیدرواستاتیک ناشی از مایعات بر روی نمونه‌ها انجام گردیده است. معمولاً فشار هیدرواستاتیک بر روی نمونه اعمال گردیده و تا انتهای آزمایش ثابت می‌باشد. اولین بررسی انجام شده بر روی منحنی تنش-کرنش فشاری در حالات محصور شده و محصور شده توسط ریچارد در سال ۱۹۲۸ [۱] انجام گردید. پس از آن مدل‌های متعددی بر پایه نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی و ستون‌های بتن مسلح ارائه گردید. یکی از قدیمی ترین مدل‌های ارائه شده، مدل هاگنستاد [۲] بود که در سال ۱۹۵۱ ارائه شد، منحنی‌های بدست آمده از مدل مذکور به صورت سهمی شکل و قابل استفاده برای بتن‌های با مقاومت معمولی می‌باشند. پوپویچ [۳]، سارگین [۴] مدل‌هایی را به صورت کسرهای ریاضی ارائه نمودند. وانگ [۵] مدل ارائه شده توسط سارگین را با پیشنهاد ضرابی برای قسمت‌های صعودی و نزولی منحنی اصلاح نمود. کنت و پارک [۶] رابطه‌ای را ارائه نمودند که برای قسمت صعودی منحنی به صورت کسر ریاضی و سپس به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. پارک و همکاران [۷] در سال ۱۹۸۲ با در نظر گرفتن اثرات میلگردهای مسلح کننده بر روی رفتار ستون‌ها مدلی ارائه نمودند. شیخ و اوزومری [۸] اثرات میلگرد های مسلح کننده طولی و جانبی از جمله سطح مقطع و فاصله را بر روی رفتار ستون‌ها مورد بررسی قرار دادند. ساچلو و رضوی [۹] قسمت صعودی منحنی را به صورت سهمی درجه دو، قسمت نزولی را خطی و تنش پسماند ثابتی معادل ۲۰ درصد تنش حداکثر را در نظر گرفتند. مندیس و همکاران [۱۰] رابطه پیشنهادی اسکات و همکاران [۱۱] را تکمیل نمودند. محققان زیادی بر روی رفتار ستون‌های مسلح شده توسط میلگرد تمرکز نمودند و مدل‌هایی را در حالت فشاری محصور شده نمودند. پارامترهای موثر در مدل‌های مذکور عمدتاً فاصله خاموت‌ها و میلگرد های طولی، شکل ستون و مقاومت مشخصه می‌باشد. کاریرا و چو [۱۲]، کوسون و همکاران [۱۳]، هوشیکوما و همکاران [۱۴]، شو و شو [۱۵]، مندر و همکاران [۱۶]، وی و چین [۱۷] تعدادی از نویسندگان مذکور می‌باشند.

آتارد و ستونگ [۱۸] توانستند مدلی را برای تنش کرنش در حالت سه محوره ارائه نمایند. مدل پیشنهادی برای بتن‌های با مقاومت مشخصه حفاصل ۶۰ تا ۱۳۰ مگاپاسکال و فشار جانبی ۱ تا ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. مدل مذکور بر مبنای مدل سارگین [۴] به صورت کسر چند جمله‌ای می‌باشد.

دسته دیگر از مدل‌های تنش-کرنش در قسمت نزولی به صورت نمایی می‌باشند. از آن جمله می‌توان به مدل‌های شاه و همکاران [۱۹]، کوسون [۲۰] و بینچی [۲۱] اشاره نمود. بینچی [۲۱] رابطه تنش-کرنش خود را با این فرض که انرژی شکست بعد از نقطه حداکثر تنش در واحد سطح در حالت محصور شده برابر با حالت محصور نشده می‌باشد ارائه نمود. بر مبنای نتایج تجربی منتشر شده به ازای تغییرات اثرات محصور کننده، انرژی کرنشی شکست تغییرات زیادی دارد که این خود مدل پیشنهادی بینچی [۲۱] را زیر سوال خواهد برد.

مدل پیشنهادی جدید برای رفتار بتن در حالت فشاری محصور شده ارائه می‌گردد که نقایص سایر مدل‌های ارائه شده را برطرف نماید. مدل ارائه شده به خوبی نشان دهنده رفتار بتن‌های با مقاومت معمولی و پرمقاومت برای سطوح مختلف محصور شدگی می‌باشد.

۲- ارزیابی مدل‌های تنش-کرنش موجود

آتارد و ستونگ [۱۸] در سال ۱۹۹۶ آزمایش‌هایی را بر روی ۵ سری نمونه بتنی در حالت فشاری سه محوره انجام دادند. مقاومت مشخصه نمونه‌های بتنی پر مقاومت ۹۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال و مقاومت مشخصه نمونه‌های با مقاومت معمولی ۴۵ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه‌های مورد استفاده از نوع استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. برای اعمال فشار جانبی ۱ تا ۲۰ مگاپاسکال ابتدا بار ۱۰۰ کیلو نیوتن به نمونه اعمال شده سپس فشار جانبی وارد می‌آید.

رابطه ارائه شده به صورت کسر چند جمله‌ای و قابل استفاده برای بتن‌های با مقاومت معمولی و پر مقاومت مطابق معادله

ذیل ارائه گردید:

$$\frac{f}{f_0} = \frac{Ax + Bx^2}{1 + Cx + Dx^2} ; \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

که f نشان دهنده تنش در هر نقطه، f_0 تنش حداکثر، ε کرنش در هر نقطه، ε_0 کرنش معادل تنش حداکثر، A, B, C و D ضرایب ثابتی هستند که برای قسمت‌های صعودی و نزولی منحنی در حالت‌های محصور شده و نشده ارائه گردید. ضرایب بر مبنای شرایط مرزی منحنی‌های تنش-کرنش تعیین می‌گردد. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای قسمت صعودی منحنی به صورت ذیل می‌باشد:

$$f = 0, \frac{df}{d\varepsilon} = E_{it} ; f = f_0, \frac{df}{d\varepsilon} = 0 ; f = f_0, \varepsilon = \varepsilon_0 ; f = f_{pl}, \varepsilon = \frac{f}{E_c} \quad (2)$$

ضرایب A, B, C و D برای قسمت صعودی منحنی به صورت ذیل می‌باشند:

$$A = \frac{E_{it}\varepsilon_0}{f_0} ; B = \frac{(A-1)^2}{(1-\frac{f_{pl}}{f_0})} + \frac{A^2(1-\alpha_t)}{\alpha_t^2 \frac{f_{pl}}{f_0} (1-\frac{f_{pl}}{f_0})} - 1 ; C = A - 2 ; D = B + 1 \quad (3)$$

که در آن $\alpha_t = E_{it}/E_c$ می‌باشد. برای شاخه نزولی شرایط مرزی وابسته به محصور شدگی می‌باشد. سه شرط مرزی به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$f = f_0, \frac{df}{d\varepsilon} = 0 ; f = f_0, \varepsilon = \varepsilon_0 ; f = f_i, \varepsilon = \varepsilon_i \quad (4)$$

برای حالت تک محوره بدون اثرات محصورشدگی، تنش پسماند به سمت صفر متمایل می‌گردد در صورتی که در حالت محصور شده تنش پسماند به یک حد مشخصی میل می‌نماید. همچنین ε_{ic} و f_{ic} ، تنش و کرنش معادل نقطه تغییر جهت تحدب منحنی در شاخه نزولی می‌باشند که با استفاده از روابط ذیل بدست می‌آیند:

$$\frac{\varepsilon_{ic}}{\varepsilon_c} = 2.5 - 0.3\ln(f'_c) ; \frac{f_{ic}}{f_c} = 1.41 - 0.17\ln(f'_c) \quad \text{for} \quad f'_c \geq 20\text{MPa} \quad (5)$$

برای شاخه نزولی در حالت محصور شده ضرایب به صورت ذیل بدست می‌آیند:

$$A = \left(\frac{\varepsilon_{2i} - \varepsilon_i}{\varepsilon_0}\right) \left(\frac{\varepsilon_{2i} E_i}{f_0 - f_i} - \frac{4\varepsilon_i E_{2i}}{f_0 - f_{2i}}\right) \frac{f_{ic} \varepsilon_0 (\varepsilon_{ic} - \varepsilon_c)}{\varepsilon_c \varepsilon_{ic} f_c - f_{ic}} ; B = (\varepsilon_i - \varepsilon_{2i}) \left(\frac{E_i}{f_0 - f_i} - \frac{4E_{2i}}{f_0 - f_{2i}}\right) ; C = A - 2 ; D = B + 1 \quad (6)$$

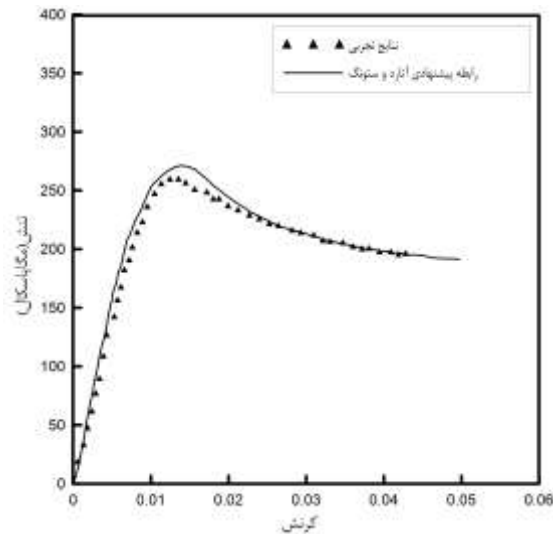
که در آن $E_{2i} = \frac{f_{2i}}{\varepsilon_{2i}}$ ، $E_i = \frac{f_i}{\varepsilon_i}$ می‌باشند. کرنش معادل تنش حداکثر با استفاده از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$\frac{f_0}{f'_c} = \left(\frac{f_r}{f_t} + 1\right)^k ; k = 1.25(f'_c)^{-0.21} (1 + 0.062 \frac{f_r}{f'_c}) \quad (7)$$

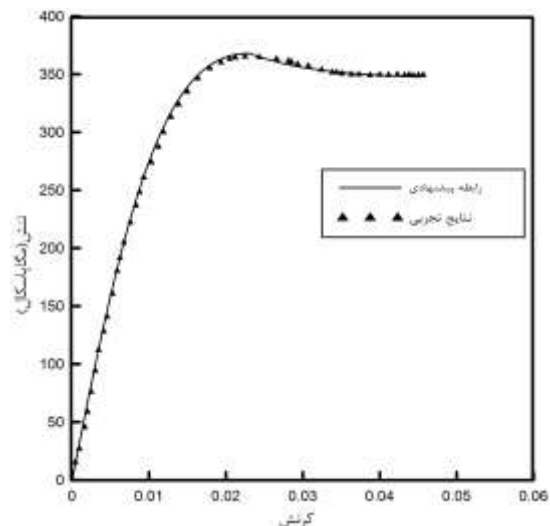
که f_r مقاومت محصور شدگی می‌باشد. تنش و کرنش نقطه تغییر جهت انحنا در شاخه نزولی f_i و ε_i با استفاده از روابط ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\frac{f_i}{f_0} = \frac{\frac{f_{ic}}{f'_c} - 1}{5.06 \left(\frac{f_r}{f'_c}\right)^{0.57} + 1} + 1 ; \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{\varepsilon_{ic}}{\varepsilon_c} - 2}{1.12 \left(\frac{f_r}{f'_c}\right)^{0.26} + 1} + 2 \quad (8)$$

شکل‌های ۱ و ۲ منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از مدل آتارد و ستونگ [۱۸] را در مقایسه با نتایج تجربی سی و همکاران [۲۴] برای بتن با مقاومت مشخصه ۱۲۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مدل آتارد و ستونگ برای حالات محصور شدگی بالا کالیبره نشده و فقط انتظار می‌رود در حالت محصور شدگی پایین کاربرد داشته باشد.



شکل ۱- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه ارائه شده توسط آتارد و ستونگ در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۳۰ مگاپاسکال



شکل ۲- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه ارائه شده توسط آتارد و ستونگ در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۶۰ مگاپاسکال

بینیچی [۲۱] در سال ۲۰۰۵ رابطه پیشنهادی خود را ارائه نمود. مدل پیشنهادی شامل یک ناحیه خطی، یک قسمت سخت شوندگی در ناحیه صعودی و در نهایت شاخه نرم شوندگی می‌باشد. مدل ارائه شده به صورت ذیل می‌باشد:

$$f = E_c \varepsilon \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{1e}$$

$$f = f_{1e} + (f_0 - f_{1e}) \frac{r \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{1e}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1e}} \right)}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{1e}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1e}} \right)^r} \quad \varepsilon_{1e} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (9)$$

$$f = f_{\text{residual}} + (f_0 - f_{\text{residual}}) \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\alpha}\right)^2\right) \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon$$

که در آن f_{1e} و ε_{1e} نشان دهنده کرنش و تنش حد خطی، E_c برابر مدول الاستیسیته بتن همچنین پارامتر r از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_s} \quad ; \quad E_s = \frac{f_0 - f_{1e}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{1e}} \quad (10)$$

پارامتر α بر مبنای انرژی شکست پس از ناحیه تنش حداکثر کالیبره می‌گردد. برای محاسبه پارامتر مذکور رابطه ذیل پیشنهاد گردید.

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\pi}(f_0 - f_{\text{residual}})} \left(\frac{2G_{\text{fcu}}}{l_c} - \frac{(f_0 - f_{\text{residual}})^2}{E_c} \right) \quad (11)$$

کرنش متناظر تنش حداکثر در حالت محصور شدگی با استفاده از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$\varepsilon_0 = 5\varepsilon_c \left(\frac{f_0}{f'_c} - 0.8 \right) \quad (12)$$

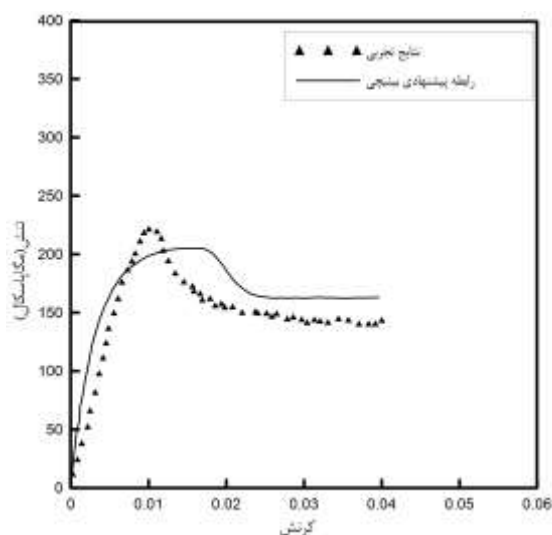
که در آن ε_c کرنش متناظر تنش حداکثر در حالت فشاری تک محوره می‌باشد که بر مبنای رابطه پیشنهادی تاسدمیر و همکاران [۲۲] برابر است با:

$$\varepsilon_c = (-0.067f'_c{}^2 + 29.9f'_c + 1053)10^{-6} \quad (13)$$

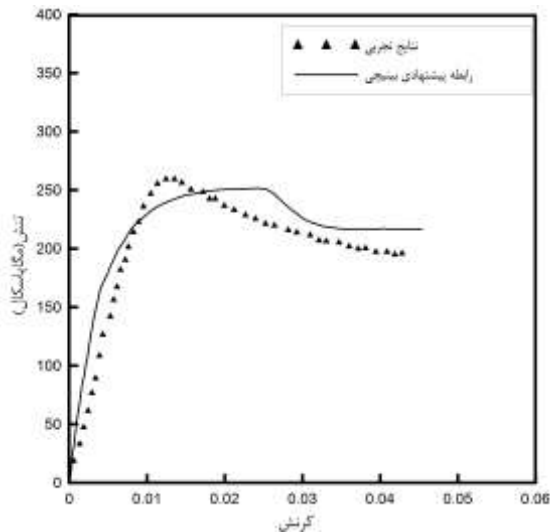
پارامترهای f_0 ، f_{residual} بر مبنای رویه تسلیم پیشنهادی پرامونو و ویلیام [۲۴] بدست می‌آید.

در مدل بینچی [۲۱] برای حالت محصور شده به منظور لحاظ نمودن اثرات اندازه، انرژی کرنشی شکست در ناحیه نزولی به صورت ثابت و مستقل از اثرات محصور شدگی در نظر گرفته می‌شوند. به عبارت دیگر انرژی کرنشی شکست در حالت محصور شده به همان مقدار در حالت تک محوره می‌باشد. در صورتی که مطابق نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از کارهای سایر محققان مشخص شده که انرژی کرنشی شکست برای محصور شدگی‌های متفاوت تغییر می‌نماید. بنابراین فرض بینچی [۲۱] را که انرژی کرنشی شکست را ثابت و مستقل از محصور شدگی در نظر گرفته بود، نقض می‌گردد.

اشکال ۳ و ۴ منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از مدل بینچی [۲۱] در مقایسه با نتایج تجربی سی و همکاران [۲۳] برای بتن با مقاومت مشخصه ۱۲۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد. برای ترسیم منحنی تنش-کرنش علاوه بر مقاومت مشخصه، انرژی کرنشی شکست نیز مورد نیاز می‌باشد. که در مدل بینچی [۲۱] به صورت صریح اشاره‌ای به نحوه بدست آوردن انرژی کرنشی شکست در بتن‌های با مقاومت مشخصه‌های مختلف نشده است. بنابراین سی و همکاران [۲۳] با استفاده از انتگرال عددی از نتایج مقاومت فشاری برای تعیین انرژی کرنشی شکست استفاده نمودند.



شکل ۳-مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه ارائه شده توسط بینچی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۱۸ مگاپاسکال



شکل ۴- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه ارائه شده توسط بینجی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۳۰ مگاپاسکال

۳- مدل تنش-کرنش پیشنهادی

۳-۱- فرم کلی مدل پیشنهادی

به منظور بهبود بخشیدن به پیش بینی منحنی تنش-کرنش یک مدل جدید ارائه می‌گردد. مدل پیشنهادی در شاخه صعودی بر مبنای رابطه ارائه شده توسط پوپویچ [۳] می‌باشد. در شاخه نزولی برای در نظر گرفتن اثرات محصور شدگی و به منظور تطابق بیشتر با نتایج تجربی یک مقدار مشخص از تنش به صورت پسماند در نظر گرفته می‌شود. تنش پسماند تابعی از مقاومت مشخصه و فشار محصور شدگی می‌باشد.

۳-۲- پارامترهای موثر در رفتار بتن

مقاومت مشخصه، مدول الاستیسیته و کرنش متناظر تنش حداکثر از جمله مهم‌ترین پارامترهای اثر گذار جهت تعیین روابط تنش-کرنش در حالت فشاری تک محوره بدون اثرات محصور شدگی می‌باشند.

با افزایش مقاومت مشخصه، منحنی تنش-کرنش در شاخه صعودی تمایل بیشتری به خطی شدن پیدا کرده و علاوه بر آن شاخه نزولی منحنی با شیب بیشتری تمایل به سقوط دارد. پارامتر موثر دیگری که در تعیین رفتار بتن موثر بوده مدول الاستیسیته می‌باشد. که متاثر از جنس و سختی سنگدانه‌ها است. با توجه به بررسی صورت گرفته در تحقیقات قبلی [۲۵] رابطه ارائه شده در آیین‌نامه ۱۴-۳۱۸ ACI [۲۶] انطباق خوبی با رفتار واقعی بتن دارد. رابطه ارائه شده به صورت ذیل می‌باشد:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (14)$$

مدول الاستیسیته و مقاومت مشخصه بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشند.

با توجه به متفاوت بودن شاخه صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش، تعیین دقیق کرنش معادل تنش حداکثر از اهمیت به سزایی در ارائه مدل رفتاری بتن برخوردار می‌باشد. با توجه به بررسی صورت گرفته بر روی رفتار بتن های با مقاومت معمولی و پر مقاومت در حالت تک محوره بدون اثرات محصور شدگی رابطه‌ای به صورت ذیل ارائه گردید [۲۵]:

$$\epsilon_{cp} = (1200 + 15f_c) \times 10^{-6} \quad (15)$$

با بالا رفتن فشار محصور شدگی ملاحظه می‌شود مقاومت نمونه‌ها بالا رفته و همچنین کرنش متناظر تنش حداکثر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش اثرات محصور شدگی، مقاومت و شکل پذیری افزایش می‌یابد.

۳-۳- مدل تنش-کرنش پیشنهادی برای بتن پر مقاومت محصور شده

فرم کلی رابطه به صورت ذیل می‌باشد:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cc}} = \frac{n_1 \times \frac{\epsilon}{\epsilon_{cpc}}}{n_1 - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cpc}}\right)^{n_1}} \quad \epsilon \leq \epsilon_{cpc} \quad (16)$$

$$\sigma_c = f_{residual} + (f_{cc} - f_{residual}) \frac{n_2 \times \frac{\epsilon}{\epsilon_{cpc}}}{n_2 - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cpc}}\right)^{n_2}} \quad \epsilon > \epsilon_{cpc}$$

که در آن f_{cc} مقاومت بتن در حالت محصور شده بر حسب مگاپاسکال می باشد که با استفاده از رابطه ذیل بدست می آید:

$$f_{cc} = (1 + 5 \times \frac{f_r}{f_c}) \times f_c \quad (17)$$

که f_c مقاومت مشخصه در حالت فشاری تک محوره بدون اثر محصورشدگی و f_r فشار محصور شدگی بر حسب مگاپاسکال می باشد. پارامتر n_1 با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$n_1 = 0.8 + \frac{f_{cc}}{17 + 5.28 \times f_r} \quad (18)$$

همچنین کرنش متناظر تنش حداکثر در حالت محصور شده می باشد که برابر است با:

$$\epsilon_{cpc} = \epsilon_{cp} + 0.035 \frac{f_r}{f_c} \quad (19)$$

که ϵ_{cp} کرنش متناظر تنش حداکثر در حالت بدون اثرات محصور شدگی می باشد. $f_{residual}$ تنش پسماند بر حسب مگاپاسکال می باشد که از رابطه ذیل بدست می آید:

$$f_{residual} = 0.25 + 5.5 \frac{f_r}{f_c} \quad (20)$$

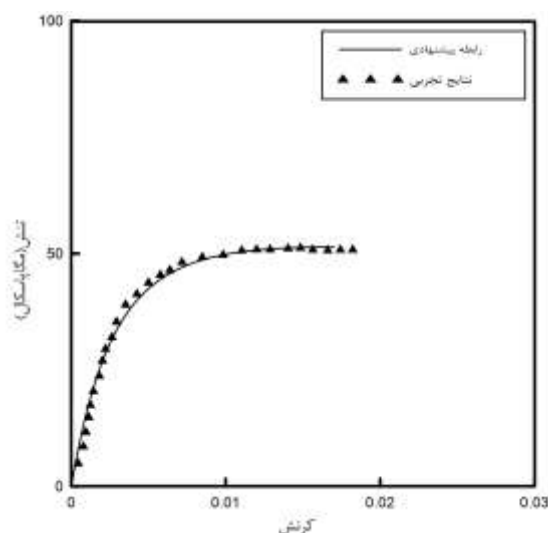
پارامترهای n_2 و n_3 با استفاده از روابط ذیل بدست می آیند:

$$n_2 = 1.388 \quad (21)$$

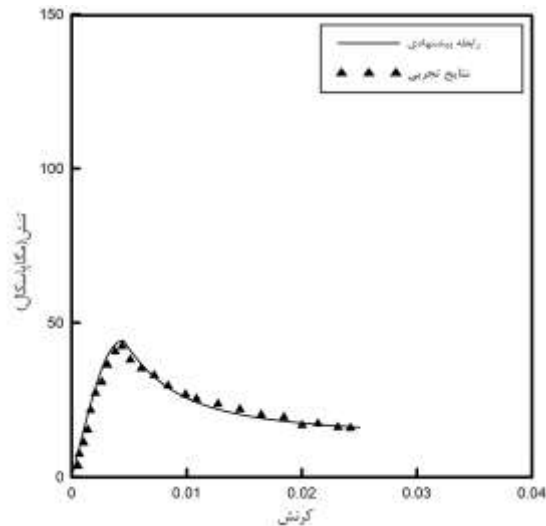
$$n_3 = 2.27 + 4.71 \times \frac{f_r}{f_c} \quad (22)$$

۳-۴- اعتبار سنجی

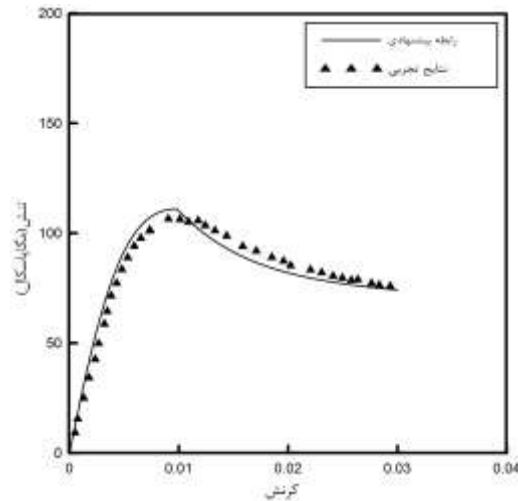
منحنی های تنش-کرنش ترسیم شده بر اساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با تعدادی از نتایج تجربی در اشکال ۵ تا ۱۱ ترسیم گردیده است.



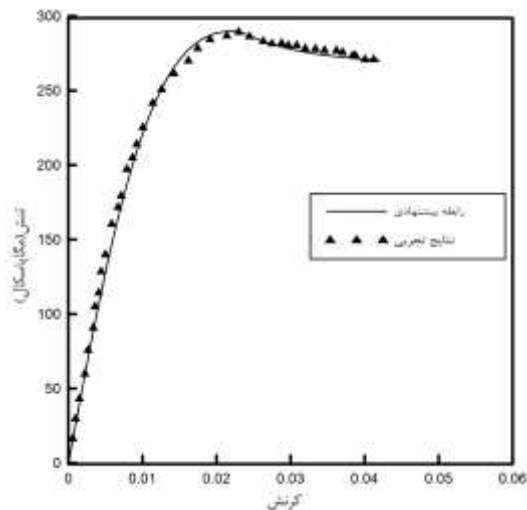
شکل ۵-مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۷] برای بتن با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۶/۸۹ مگاپاسکال



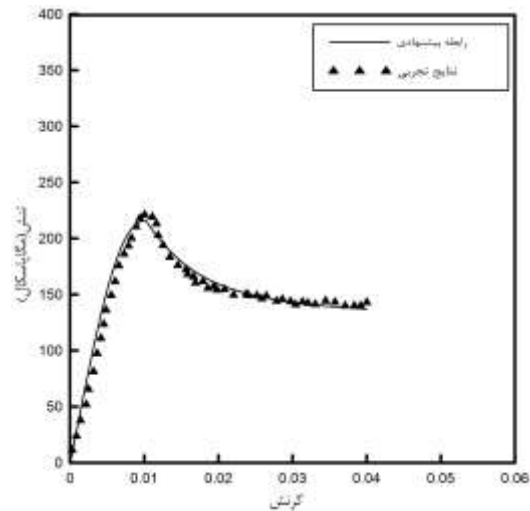
شکل ۶-مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۸] برای بتن با مقاومت ۳۴/۵ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۰/۷ مگاپاسکال



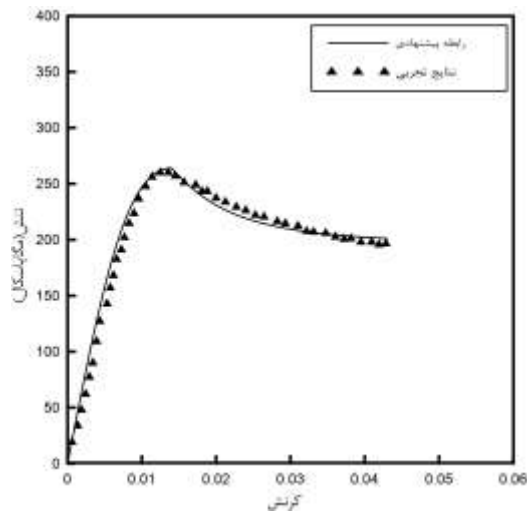
شکل ۷-مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۸/۳ مگاپاسکال



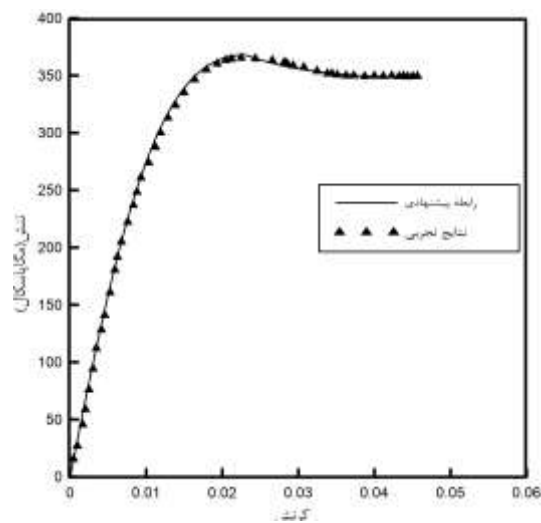
شکل ۸-مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۹۲ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۴۴/۵ مگاپاسکال



شکل ۹- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۱۸ مگاپاسکال



شکل ۱۰- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۳۰ مگاپاسکال



شکل ۱۱- مقایسه منحنی تنش-کرنش براساس رابطه پیشنهادی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] برای بتن با مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال و فشار محصور شدگی ۶۰ مگاپاسکال

ملاحظه می‌شود با استفاده از رابطه پیشنهادی می‌توان در هر دو شاخه صعودی و نزولی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی بدست آورد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل تنش-کرنش برای بتن‌های با مقاومت معمولی و پر مقاومت در حالت فشاری تک محوره و با در نظر گرفتن اثرات محصور شدگی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تعدادی از مدل‌های تنش-کرنش ارائه شده توسط سایر محققان مورد بررسی قرار گرفت. مروری بر مدل پیشنهادی آتارد و ستونگ [۱۸] مشخص نمود که علی‌رغم قابل استفاده بودن برای بتن‌های با رنج وسیعی از مقاومت‌ها محدود به محصور شدگی پایین می‌باشد. همچنین رابطه ارائه شده توسط بینیچی [۲۱] بر مبنای این فرض که انرژی کرنشی شکست در واحد سطح بعد از نقطه متناظر تنش حداکثر مستقل از اثرات محصور شدگی می‌باشد در حالی که بررسی نتایج بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی نشان داد که انرژی کرنشی شکست برای حالات مختلف محصور شدگی تغییر می‌کند.

پارامترهای اثر گذار بر منحنی‌های تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفت. از جمله مهم‌ترین پارامترها مقاومت مشخصه، مدول الاستیسیته، کرنش متناظر تنش حداکثر و فشار محصور شدگی می‌باشند. مشخص گردید با بالاتر رفتن فشار محصور شدگی مقاومت بتن و کرنش نظیر تنش حداکثر افزایش می‌یابد.

رابطه تنش-کرنش پیشنهادی برای بتن‌های با مقاومت مشخصه از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال برای فشارهای محصور شدگی متفاوت ارائه گردید. با توجه به متفاوت بودن رفتار بتن در شاخه صعودی و نزولی دو رابطه مجزا پیشنهاد گردید. در شاخه صعودی رابطه ارائه شده بر مبنای رابطه پوپویچ [۳] و در شاخه نزولی با اعمال تغییراتی جهت تطابق بهتر با نتایج تجربی پیشنهاد گردید. به این صورت که بتواند کمبودهای سایر مدل‌های ارائه شده را مرتفع نماید. منحنی‌های تنش-کرنش تنها با معرفی مقاومت مشخصه و فشار محصور شدگی قابل ترسیم می‌باشند. با مقایسه منحنی‌های بدست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج تجربی و برای حالات محصور شدگی متفاوت تطابق مناسبی را در هر دو شاخه صعودی و نزولی نشان می‌دهد.

۵- مراجع

1. Richart, F., Brandtzag, A., and Brown, R., "A Study of failure of Concrete under Combined Compressive Stresses" University of Illinois, Bulletin 185, 1928.
2. Hognestad, E., " Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members" , Bulletin NO.1, 1951.
3. Popovicz, S., " A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of concrete" Cement and Concrete, V. 3, NO. 5, 1973, pp.583-599.
4. Sargin, M. and Handa V. K., " A General Formulation for the Stress-Strain Properties of Concrete " Report No. 3, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 36p, 1969.
5. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression," ACI JOURNAL, Proceedings V. 75, No. 11, Nov. 1978, pp. 603-611.
6. Kent, D., and Park, R., " Flexural Members with Confined Concrete" Ascej. strnct. Div 97, 1964-1990.
7. Park, R., Priestley, M., and Grill, W., " Ductility of square-confined Concrete Column" Journal of the Structural Division 108, 1982, pp.929-950.
8. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Analytical model for concrete confinement in tied columns." J. Struct. Div. ASCE, 108.12, 1982, pp.2703-2722.
9. Saatcioglu, M., and Razvi, S., "Strength and Ductility of Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 118, No. 6, June 1992, pp. 1590-1607.
10. Mendis, P., Pendyala, R., and Setunge, S., "Stress-strain model to predict the full-range moment curvature behavior of high-strength concrete sections." Mag. Concrete Res, V.52, No. 4, pp. 227-234.
11. Scott, B. D., Park, R., and Priestley, N., "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates." ACI J., V.79, No.1, 1982, pp.13-27.
12. Carreira, D. J., and Chu, K. H., "Stress-strain relationship for plain concrete in compression. " ACI Journal, Proceedings, V. 82, No. 6, 1985, pp.797-804.
13. Cusson, D., and Paultre, P., "Stress-strain model for confined high strength concrete." J. Struct. Eng, V. 121, No. 3, 1995, pp.468-477.

14. Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A. W. , "Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers." J. Struct. Eng., V. 123, No. 5,1997, pp.624-633.
15. Hsu, L. S., and Hsu, C. T. T.(1994), " Complete stress-strain behavior of high-strength concrete under compression. " Mag. Concrete Res, V. 46, No. 169, pp. 301-312.
16. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. , "Theoretical stress-strain model for confined concrete." J. Struct. Eng., V. 114 , No.8 ,1988, pp.1804-1826.
17. Wee, T. H., Chin, M. S., and Mansur, M. A. , "Stress-strain relationship of high strength concrete in compression." J. Mater. Civ.Eng, V. 8 , No. 2 ,1996, pp.70-76.
18. Attard , M. M. , and Setunge , S., " Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete" , ACI Journal, Proceedings, V. 93, No. 5,1996, pp.432-441.
19. Shah, S. P., Fa_tis, A., and Arnold, R. , "Cyclic loading of spirally reinforced concrete." J. Struct. Eng., V. 109, No.7,1983, pp.1695-1710.
20. Cusson, D., De Larrard, F., Boulay, C., and Paultre, P., "Strain Localization in Confined High-Strength Concrete Column." Journal of Structural EnGineering., V . 122, 1996, pp.1055-1061.
21. Binici, B., "An Analytical Model for Stress-Strain Behavior of Confined Concrete." Engineering structures., V . 27, 2005, pp.1040-1051.
22. Tasdemir, m., Tasdemir, C., Akyuz, S., Jefferson, A., Lydon, F., and Barr, B., " Evaluation of Strains at Peak Stress in Concrete: A Three-Phase Composite Approach. " Cement and concrete composite, V. 20, 1998 , pp.301-318.
23. Xie, J., Elwi, A., And MacGregor, J., " Mechanical Properties of Three High-Strength Concretes Containing Silica Fume. " ACI Materials Journal, V. 92, 1995.
24. Pramono, E., and Willam, K., " Fracture Energy-Based Plasticity Formulation of Plain Conctete. " Journal of Engineering Mechanics, V. 115, 1989 , pp.1183-1204.
۲۵. هوشنگ دباغ، محمد سلمان قوامی، " ارائه رابطه تنش- کرنش برای بتن‌های پر مقاومت." نهمین کنگره ملی مهندسی عمران ، دانشگاه فردوسی مشهد ، مشهد، ایران، ۱۳۹۵ .
26. ACI Committee 318 , (2014), " Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318RM-14)" American Concrete Institute, 524 pp.
27. Hurlbut, B., " Experimental and Computational Investigation of Strain-Softening in Concrete. " University of colorado, 1985.
28. Smith, S., Willam, K., Gerstle, K., and Sture, S., "Concrete over the Top--or, Is There Life after" ACI Material, V. 86, 1989.