

ارائه‌ی مدل عددی پیشنهادی برای شبیه‌سازی مود باز شدگی مکانیک شکست اتصال سرد بتنی

احسان کریمی (دانشجوی دکتری)
وحیدرضا کلات جاری* (دانشیار)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۶۱-۷۰

در نوشتار حاضر، مدلی برای شبیه‌سازی اتصال سرد در اجزای بتنی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس ارائه شده است. تیرهایی با تکیه‌گاه ساده تحت خمش سه‌نقطه‌یی با مقاومت‌های فشاری یکسان برای بتن دو طرف اتصال سرد در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به بهترین نتایج در مدل‌سازی عددی تیر بتنی، تعدادی از روابط تنش - کرنش بتن برای فشار و کشش در ترکیب‌هایی متفاوت بر روی تیر بتنی یک‌پارچه ارزیابی شده و از بین آنها زوجی که بهترین نتایج را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند، برای مدل‌سازی تیر بتنی با اتصال سرد استفاده شده‌اند. همچنین برای مدل‌سازی اتصال سرد، از المان چسباننده با ضخامت بسیار ناچیز استفاده شده است. منحنی‌های بار - تغییر مکان و بار - جابه‌جایی ناشی از باز شدگی دهانه‌ی ترک مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود، نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب بین مقادیر عددی با داده‌های حاصل از آزمایش‌هاست.

واژگان کلیدی: اتصال سرد، مدل‌سازی عددی، مکانیک شکست بتن، منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی بتن، مدل تیر ساده‌ی سه‌نقطه‌یی خمشی بتنی.

۱. مقدمه

در حال حاضر، بتن مهم‌ترین مصالح ساختمانی است که در اغلب ساخت و سازهای مدرن استفاده می‌شود.^[۱] امروزه تعمیر و بهسازی اعضاء بتنی، یک نیاز مشترک در نگهداری زیرساخت‌هاست. هنگامی که برای ترمیم و بهسازی یک قطعه‌ی بتنی، قسمتی از بتن قدیمی با یک بتن جدید جایگزین شود و یا این‌که در هنگام عملیات بتن‌ریزی، وقفه‌ی زمانی قابل توجهی اتفاق بیافتد، به نحوی که در زمان ریختن بتن تازه، بتن قدیمی سخت شده باشد، در سطوح بین بتن قدیمی و بتن تازه، سطح واریز یا همان اتصال سرد ایجاد می‌شود. همچنین در شیوه‌ی متداول اجرای قاب‌های بتن مسلح، در محل اتصال ستون به کف، سقف و شالوده، سطوح واریز ظاهر می‌شوند. معمولاً مقاومت سطح واریز نسبتاً ضعیف‌تر از مصالح دو طرف آن در یک سیستم تعمیر شده است. عملکرد یک سیستم تعمیر شده به شدت وابسته به رفتار سطح واریز است.^[۲] به دلیل تمرکز تنش و تغییرات سریع سطح تنش در سطح واریز، خطر شکست بالایی در امتداد سطح واریز در سیستم تعمیر شده وجود دارد.^[۳] مطالعات زیادی در زمینه‌ی خصوصیات مکانیک شکست بتن، ماتریس سنگ‌دانه - سیمان، سطح بین بتن و سایر مصالح انجام شده است. با این حال، فقط کارهای آزمایشگاهی کمی برای مطالعه‌ی رفتار سطح بین بتن قدیم و جدید انجام شده است.^[۴] خصوصیات پیوند^۱ بین سطح بتن قدیم و جدید توسط تعدادی پژوهشگر مطالعه شده است.^[۵-۷] لیم و همکاران^[۸] (۲۰۰۱)، یک شیوه‌ی شبیه‌سازی عددی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۴/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۰/۲۲، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۳.

DOI:10.24200/J30.2019.51286.2388

eh.karimi@shahroodut.ac.ir
v_kalatjari@shahroodut.ac.ir

جدول ۱. ابعاد تیرها (به میلی‌متر).

اندازه‌ی تیر	عمق b	طول L	دهانه S	ضخامت t	شکاف اولیه α
کوچک	۷۶	۲۴۱	۱۹۰	۵۰	۱۵٫۲
متوسط	۱۵۲	۴۳۱	۳۸۰	۵۰	۳۰٫۴
بزرگ	۳۰۴	۸۱۰	۷۶۰	۵۰	۶۰٫۸

۲.۲. منحنی تنش - کرنش برای فشار تک‌محوری

برای استفاده از مدل CDP، به منحنی تنش - کرنش فشاری تک‌محوری بتن نیاز است. برای هر بتن، رابطه‌ی مذکور را می‌توان بر اساس آزمایش‌های فشاری تک‌محوری با دقت نسبتاً زیادی تعیین کرد.^[۲۳] با این حال اگر نتایج چنین آزمایش‌هایی در دسترس نباشد، می‌توان منحنی تنش - کرنش را بر اساس روابط ارائه شده در برخی منابع علمی ترسیم کرد.^[۲۹-۲۴] برخی از روابط مورد استفاده در نوشتار حاضر، در ادامه ارائه شده‌اند.

-- رابطه‌ی سهمی مادرید:^[۲۴]

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

-- رابطه‌ی دسای و کاربشان:^[۲۵]

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2} \quad (2)$$

-- رابطه‌ی آیین‌نامه‌ی اروپا:^[۲۶]

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta^2};$$

$$k = 1.7 \cdot 5 E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}};$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (3)$$

-- رابطه‌ی ماجوسکی:^[۲۷]

$$\begin{cases} \sigma_c = E_c \varepsilon_c & \text{if } \sigma_c \leq e_{lim} f_{cm} \\ \sigma_c = f_{cm} \frac{(\varepsilon_{lim} - \varepsilon_c)^2}{\varepsilon_{lim}^2 (\varepsilon_{lim} - 1)} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 - f_{cm} \frac{(\varepsilon_{lim} - \varepsilon_c)^2}{\varepsilon_{lim}^2 (\varepsilon_{lim} - 1)} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right) + f_{cm} \frac{\varepsilon_{lim}^2}{\varepsilon_{lim}^2 (\varepsilon_{lim} - 1)} & \text{if } \sigma_c > e_{lim} f_{cm} \end{cases}$$

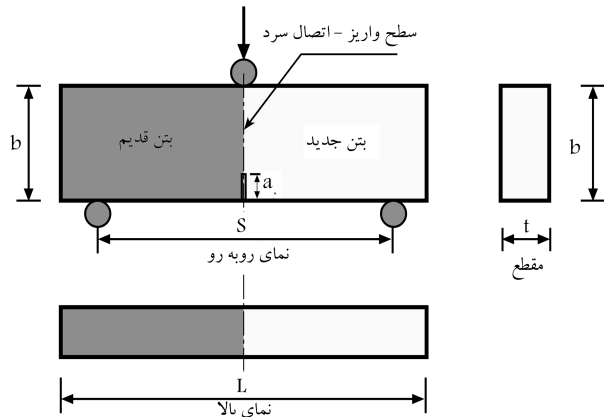
$$E_c = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_c} (2 - e_{lim});$$

$$e_{lim} = 1 - \exp\left(\frac{-f_{cm}}{1.8}\right) \quad (4)$$

-- رابطه‌ی ونگ و سو:^[۲۸]

$$\begin{cases} \sigma_c = \xi f_{cm} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\xi \varepsilon_{c1}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\xi \varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] & \text{if } \frac{\varepsilon_c}{\xi \varepsilon_{c1}} \leq 1 \\ \sigma_c = \xi f_{cm} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c / \xi \varepsilon_{c1} - 1}{1/\xi - 1} \right)^2 \right] & \text{if } \frac{\varepsilon_c}{\xi \varepsilon_{c1}} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

-- رابطه‌ی ساتنز:^[۲۹]



شکل ۱. هندسه‌ی تیر بتنی.

جدول ۲. خصوصیات بتن.

$f_{cm} (MPa)$	$E (GPa)$	ν
۳۴	۳۱٫۴	۰٫۱۹

ارائه کردند. از آنجا که کارهای آزمایشگاهی به طور معمول زمان‌بر و پرهزینه هستند و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری به طور واقعی در نمونه‌های آزمایشگاهی دشوار است، مدل‌های عددی قابل اعتماد می‌توانند به توسعه‌ی مطالعات رفتار سازه‌ی کمک کنند. در نوشتار حاضر، فرایندی برای شبیه‌سازی یک تیر بتنی سه‌نقطه‌ی خمشی دارای یک سطح واریز در وسط دهانه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی تیر بتنی

در نوشتار حاضر، یک تیر ساده‌ی بتنی دارای اتصال سرد عرضی مابین دو بتن با مقاومت یکسان تحت خمش سه‌نقطه‌ی مدل‌سازی شده است. جزئیات هندسی و نام‌گذاری‌های مرتبط در تیرهایی شکاف‌دار در سه اندازه‌ی متفاوت با هندسه‌ی مشابه با نسبت دهانه به عمق ۲/۵، نسبت شکاف به عمق ۰٫۲ و عرض شکاف ۲ میلی‌متر که به طور آزمایشگاهی توسط شاه و کیشن (۲۰۱۰)^[۸] تحقیق و آزمایش شده بودند، انتخاب شده است. در جدول ۱ و شکل ۱، اطلاعات مرتبط مشاهده می‌شود.

۱.۲. مدل‌سازی رفتار بتن

برای مدل‌سازی تیر از المان ۸ گره‌ی C3D8R استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل خسارت خمیری بتن (CDP)^۹ استفاده شده است. خصوصیات مصالح بتن و مقادیر مربوط به متغیرهای خرابی استفاده شده برای مدل CDP در مطالعه‌ی حاضر به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. خصوصیات بتن در مدل CDP.

پارامتر ویسکوزیته	K_C	f_{bo}/f_{co}	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع
۰	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۶

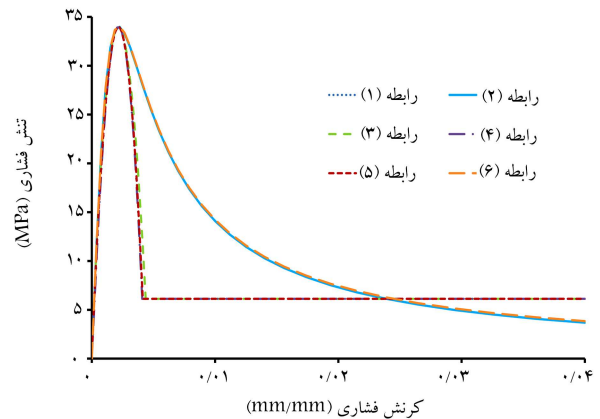
مطابق شکل ۲، منحنی‌های حاصل از تمامی روابط ۱ الی ۶ در قسمت شاخه‌ی صعودی نمودار تا رسیدن به نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت فشاری، کاملاً بر هم منطبق هستند. اما پس از عبور از نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت فشاری، در شاخه‌ی نزولی نمودار یا ناحیه‌ی پس‌خرابی یا نرم‌شوندگی، دو دسته رفتار متفاوت حاصل از روابط ذکر شده مشاهده می‌شود. دسته‌ی اول، شامل نمودارهای حاصل از روابط ۱، ۳، ۴ و ۵ و دسته‌ی دوم، شامل نمودارهای حاصل از روابط ۲ و ۶ است. مشاهده می‌شود که نمودارهای حاصل از روابط دسته‌ی اول در ناحیه‌ی پس‌خرابی کاملاً بر همدیگر منطبق هستند. همچنین، نمودارهای حاصل از روابط دسته‌ی دوم نیز در ناحیه‌ی پس‌خرابی کاملاً بر همدیگر منطبق هستند. تفاوت اصلی بین دو دسته‌ی اخیر، شیب منحنی ناحیه‌ی نرم‌شوندگی است. در حقیقت با توجه به بیشتر بودن شیب منحنی در ناحیه‌ی نرم‌شوندگی در دسته‌ی اول نسبت به دسته‌ی دوم می‌توان نتیجه گرفت که سرعت خرابی بتن تحت تنش فشاری در دسته‌ی اول نسبت به دسته‌ی دوم بیشتر است. شیب ناحیه‌ی نرم‌شوندگی منحنی‌های دسته‌ی اول به صورت تدریجی و یکنواخت از حوالی نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت فشاری به سمت انتهای نمودار کم شده و به سمت افقی میل کرده است، اما شیب ناحیه‌ی نرم‌شوندگی در منحنی‌های دسته‌ی دوم، از حوالی نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت فشاری تا رسیدن به کمترین مقدار تنش معادل $0/24 f_{cm}$ ، به صورت تدریجی افزایش یافته و پس از رسیدن به آن، کاملاً به صورت افقی درآمده است. هر چند که تمامی روابط اخیر به طور تقریبی رفتار بتن را شبیه‌سازی می‌کنند، اما با توجه به پیوستگی و یکنواختی مشاهده شده در ناحیه‌ی نرم‌شوندگی برای منحنی‌های دسته‌ی اول، به نظر می‌رسد که منحنی‌های مذکور رفتار نزدیک‌تری را به رفتار واقعی فشاری بتن نشان می‌دهند. با توجه به مطالب ذکر شده، از آن‌جا که منحنی‌های مربوط به دسته‌ی اول بر همدیگر منطبق هستند و تفاوتی بین آنها مشاهده نمی‌شود، می‌توان یکی از روابط ۱، ۳، ۴ و ۵ را به نمایندگی از دسته‌ی اول انتخاب کرد. این موضوع در مورد روابط مربوط به دسته‌ی دوم نیز صادق است. از این رو، از بین روابط مربوط به دسته‌ی اول، رابطه‌ی ۱ و از بین روابط مربوط به دسته‌ی دوم، رابطه‌ی ۲ به منظور ارزیابی‌های بعدی و در نهایت انتخاب یکی از آنها برای استفاده در مدل‌سازی پژوهش حاضر انتخاب شده است.

۳.۲. منحنی تنش - کرنش برای کشش تک‌محوری

یکی دیگر از عوامل مورد استفاده در مدل CDP، منحنی تنش - کرنش کششی تک‌محوری بتن است. هر چند که رابطه‌ی تنش - کرنش کششی برای یک بتن مفروض را می‌توان به طور آزمایشگاهی از طریق آزمایش کشش مستقیم یا آزمایش شکافت نمونه با آزمایش خمش تیر تعیین کرد، اما نمودار ذکر شده را می‌توان بر اساس برخی منابع علمی نیز ترسیم کرد. [۲۸، ۳۰، ۳۱] مقدار میانگین مقاومت کششی محوری بتن را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد: [۲۶]

$$f_{ctm} = 0/33 f_{ck}^{(2/3)} \quad (10)$$

که در آن، f_{ctm} و f_{ck} ، به ترتیب، مقاومت کششی محوری متوسط و مقاومت مشخصه فشاری نمونه‌ی استوانه‌یی بتن ۲۸ روزه بر حسب مگاپاسکال هستند.



شکل ۲. مقایسه‌ی منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از روابط ۱ تا ۶.

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_c}{A + B\varepsilon_c + C\varepsilon_c^2 + D\varepsilon_c^3}$$

$$A = \frac{1}{E_c}; B = \frac{P_T + P_T - 1}{P_T f_{cm}}; C = -\frac{2P_T - 1}{P_T f_{cm} \varepsilon_{c1}}; D = \frac{P_T - 1}{P_T f_{cm} \varepsilon_{c1}}$$

$$P_1 = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}; P_T = \frac{f_{cm}}{f_{cu}}; P_T = \frac{E_c \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}; P_T = \frac{P_T (P_T - 1)}{(P_T - 1)^2} - \frac{1}{P_1} \quad (6)$$

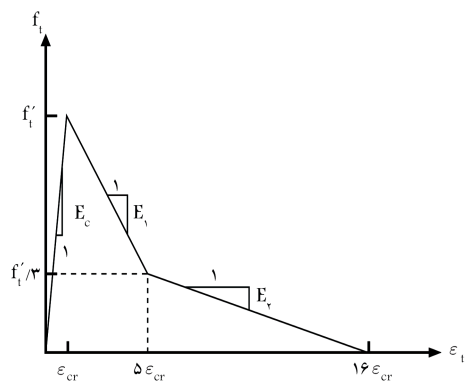
مدول کشسانی طولی بتن (E_{cm})، کرنش نظیر مقاومت فشاری متوسط (ε_{c1}) و کرنش نهایی (ε_{cu}) را می‌توان با استفاده از روابط قابل دسترس در نوشتارها با در نظر گرفتن مقاومت فشاری متوسط (f_{cm}) بر حسب مگاپاسکال محاسبه کرد: [۲۶، ۲۷]

$$E_{cm} = 22(0/1 f_{cm})^{0/7} \quad (7)$$

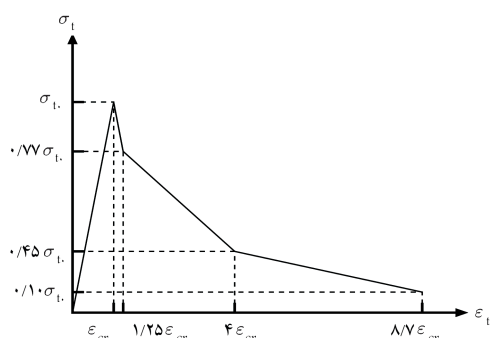
$$\varepsilon_{c1} = 0/0014 [2 - \exp(-0/024 f_{cm}) - \exp(-0/140 f_{cm})] \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0/004 - 0/0011 [1 - \exp(-0/0215 f_{cm})] \quad (9)$$

مدول کشسانی اولیه نیز معادل دو برابر تانژانت زاویه‌ی خط متقاطع عبور کرده از نقطه‌ی $(\varepsilon_{c1}, f_{cm})$ در نظر گرفته شده است. برای استفاده صحیح از هر یک از روابط ۱ تا ۶، باید مدول کشسانی به طور صحیح تعریف شود. در حقیقت مدول کشسانی به کار رفته در هر یک از روابط مذکور متفاوت است. در روابط ۱، ۲ و ۶ از مدول کشسانی اولیه و در رابطه‌ی ۳ از مدول کشسانی طولی مطابق رابطه‌ی ۷ استفاده شده است. در رابطه‌ی ۴ نیز مدول کشسانی همراه خود رابطه تعریف شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی ۵، نیازی به تعریف مدول کشسانی ندارد. برای جلوگیری از مشکل عددی بالقوه در محاسبه، در قسمت نزولی منحنی تنش - کرنش در روابط ۱، ۳، ۴ و ۵، کمترین مقدار تنش معادل $0/24 f_{cm}$ لحاظ شده است. [۲۸] همچنین با توجه به عدم در نظر گرفتن آرماتور، $\xi = 1$ فرض شده است. در شکل ۲، مقایسه‌ی منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از روابط ۱ الی ۶ برای بتنی با مقاومت فشاری متوسط ۳۴ مگاپاسکال مشاهده می‌شود.

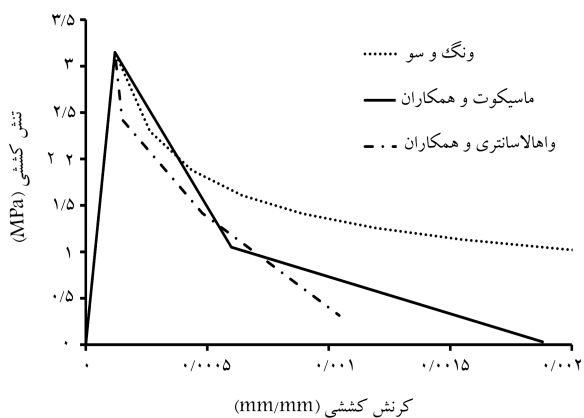


الف) مدل پیشنهادی ماسیکوت و همکاران [۳۰]؛



ب) مدل پیشنهادی واهالاسانتری و همکاران [۳۱].

شکل ۳. دو مدل متفاوت برای قسمت نرم‌شوندگی کششی.



شکل ۴. مقایسه‌ی منحنی‌های تنش - کرنش کششی.

رابطه‌ی ۱۱، توسط ونگ و سو (۲۰۰۱) برای منحنی تنش - کرنش در حالت تنش تک‌محوری کششی ارائه شده است: [۲۸]

$$\begin{cases} \sigma_t = E_c \varepsilon_t & \text{if } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \\ \sigma_t = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cr}} \right)^{0.7} & \text{if } \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، σ_t مقدار تنش کششی در کرنش مفروض ε_t و f_{cr} تنش ترک‌خوردگی در کرنش نظیر ε_{cr} است، که براساس رابطه‌ی ۱۲، با در نظر گرفتن مقاومت مشخصه فشاری بتن f'_c بر حسب مگاپاسکال به دست می‌آید:

$$f_{cr} = 0.31 \sqrt{f'_c} \quad (12)$$

دو مدل متفاوت دیگر نیز برای قسمت نرم‌شوندگی کششی توسط ماسیکوت و همکاران (۱۹۹۰) [۳۰] و واهالاسانتری و همکاران (۲۰۱۱) [۳۱] توسعه یافته است، که در شکل ۳ مشاهده می‌شوند. باید توجه داشت که علامت‌های به کار رفته در روابط ۱۰ و ۱۱ و شکل ۳ برگرفته از منابع اصلی‌شان هستند. در شکل ۴، نیز مقایسه‌ی نمودارهای تنش - کرنش کششی برگرفته از سه مدل معرفی شده برای بتن با مقاومت متوسط فشاری معادل ۳۴ مگاپاسکال مشاهده می‌شود.

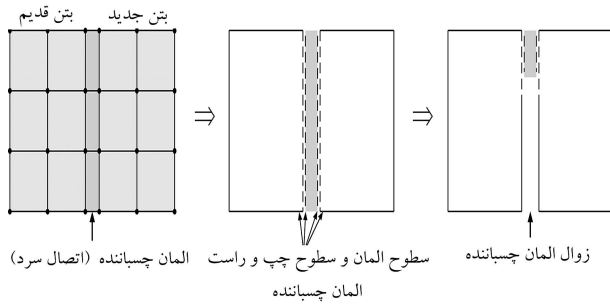
۴.۲. انتخاب منحنی تنش - کرنش مناسب برای فشار و کشش

تنش‌های اصلی ناشی از خشخ در وسط دهانه‌ی مدل تیر سه نقطه‌یی خمشی، تنش‌های نرمال کششی و فشاری هستند. از آن‌جا که مقاومت کششی در بتن بسیار ضعیف‌تر از مقاومت فشاری است، بنابراین واضح است که معرفی خصوصیات کششی نسبت به خصوصیات فشاری آن، حساسیت بیشتری دارد. برای انتخاب منحنی تنش - کرنش مناسب برای فشار و کشش، ترکیب‌هایی مطابق جدول ۴ ارائه شده است.

ترکیب‌های ارائه شده برای مدل‌سازی تیر کوچک مفروض در حالت یک‌پارچه (بدون اتصال سرد) و مقایسه‌ی نتایج با مدل آزمایشگاهی به منظور انتخاب ترکیب مناسب استفاده شده‌اند. دلیل استفاده از تیر در حالت یک‌پارچه و بدون اتصال سرد برای انتخاب ترکیب مناسب منحنی تنش - کرنش در فشار و کشش این است که نتایج بار - تغییرمکان فقط وابسته به رفتار تنش - کرنش فشاری و کششی بتن باشد. به این نکته باید توجه داشت که در صورت وجود اتصال سرد، رفتار تیر به شدت تحت تأثیر رفتار اتصال سرد قرار خواهد گرفت. [۲] شکل ۵، مقایسه‌ی نمودارهای بار - تغییرمکان (خیز وسط دهانه‌ی تیر) برای هر ترکیب مطابق جدول ۴ و نتایج آزمایشگاهی شاه و کیش (۲۰۱۰) [۸] را نشان می‌دهد، که مطابق آن، رفتار تیر به شدت وابسته به منحنی تنش - کرنش کششی است و منحنی تنش - کرنش فشاری تأثیر قابل ملاحظه‌یی در رفتار تیر نداشته است، که این موضوع از قبل قابل پیش‌بینی

جدول ۴. ترکیب‌های از منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی.

نام ترکیب	نام منحنی تنش - کرنش فشاری	نام منحنی تنش - کرنش کششی
C۷T۱	سه‌می مادرید، [۲۴] (رابطه‌ی ۱)	ونگ و سو، [۲۸] (رابطه‌ی ۱۱)
C۷T۲	سه‌می مادرید، [۲۴] (رابطه‌ی ۱)	ماسیکوت و همکاران، [۳۰]
C۷T۳	سه‌می مادرید، [۲۴] (رابطه‌ی ۱)	واهالاسانتری و همکاران، [۳۱]
C۷T۴	دسای و کاریشن، [۲۵] (رابطه‌ی ۲)	ونگ و سو، [۲۸] (رابطه‌ی ۱۱)
C۷T۲	دسای و کاریشن، [۲۵] (رابطه‌ی ۲)	ماسیکوت و همکاران، [۳۰]
C۷T۳	دسای و کاریشن، [۲۵] (رابطه‌ی ۲)	واهالاسانتری و همکاران، [۳۱]



شکل ۶. نمایش عملکرد المان چسبانده.

۱.۳. معرفی پاسخ المان چسبانده

در پژوهش حاضر به دلیل بسیار ناچیز بودن ضخامت سطح واریز، پاسخ لایه‌ی چسبانده مستقیماً بر اساس رابطه‌ی کشش - جدایش^{۱۰} مطابق شکل ۷ تعریف شده است، که در آن t_n^* ، t_s^* و t_t^* به ترتیب مقادیر بیشینه‌ی تنش مقاوم اسمی در زمانی هستند که تغییر شکل‌ها کاملاً عمود بر سطح یا کاملاً در جهات ۱ یا ۲ برشی باشند و به همین ترتیب، δ_n^* ، δ_s^* و δ_t^* به ترتیب، جدایش‌های اسمی نظیر بیشینه‌ی تنش‌های مقاوم اسمی t_n^* ، t_s^* و t_t^* هستند. علاوه بر این، پاسخ اولیه‌ی المان چسبانده به صورت کشسان خطی فرض شده است. رفتار کشسان خطی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۳ نوشت:^[۳۲]

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = K\varepsilon \quad (13)$$

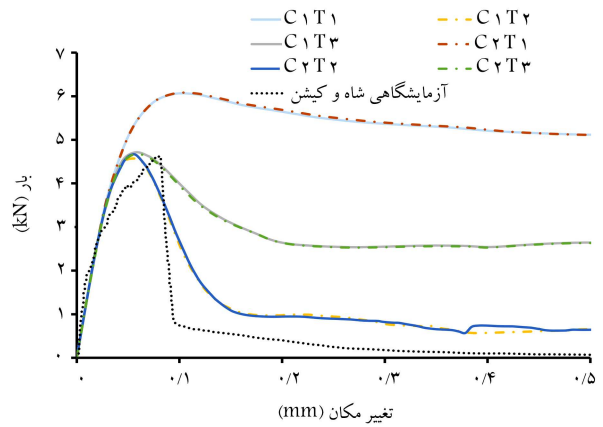
که در آن t_n ، t_s و t_t به ترتیب تنش نرمال (در امتداد محور محلی ۳) و دو تنش برشی (در امتداد محورهای محلی ۱ و ۲) هستند. به همین ترتیب، ε_n و ε_s و ε_t کرنش‌های اسمی نظیر هستند، که مطابق روابط ۱۴ تعریف می‌شوند:

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T}; \quad \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T}; \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T} \quad (14)$$

که در آنها، δ_n ، δ_s و δ_t به ترتیب جدایش‌های نظیر t_n ، t_s و t_t هستند. همچنین، T ضخامت اصلی المان چسبانده است، که با ضخامت هندسی المان چسبانده، که در مدل‌سازی هندسی در نظر گرفته می‌شود، متفاوت است و مقدار پیش‌فرض آن $1/0$ است، که به این ترتیب مقدار کرنش‌های اسمی با جدایش‌های نظیر برابر می‌شوند. در حقیقت، تنش‌های اسمی، حاصل تقسیم نیروی اجزاء بر سطح اصلی هر نقطه‌ی انتگرال‌گیری و نیز کرنش‌های اسمی، حاصل تقسیم جدایش‌ها بر ضخامت اصلی هر نقطه‌ی انتگرال‌گیری هستند.

در رابطه‌ی ۱۳، درایه‌های خارج از قطر اصلی در ماتریس کشسانی با فرض عدم همبستگی رفتار بین مؤلفه‌های نرمال و برشی، صفر در نظر گرفته شده‌اند.^[۳۲] هر مکانیزم شکست در خرابی پیش‌رونده و شکست در لایه‌های چسبانده در بخش‌هایی از پاسخ کشش - جدایش، شامل سه جزء: معیار شروع خرابی^{۱۱}، قانون تکامل خرابی^{۱۲} و انتخاب المان حذفی به محض رسیدن به حالت خرابی کامل تعریف می‌شوند. بر اساس معیار خرابی، فرض شده است که خرابی زمانی شروع می‌شود که مطابق رابطه‌ی ۱۵، نسبت بیشینه‌ی تنش اسمی به مقدار ۱ می‌رسد:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^*}, \frac{t_s}{t_s^*}, \frac{t_t}{t_t^*} \right\} = 1 \quad (15)$$



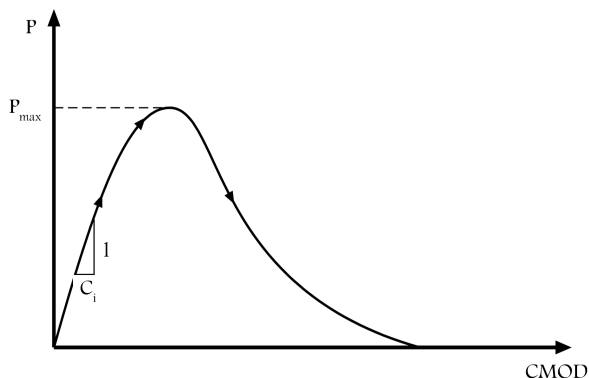
شکل ۵. مقایسه‌ی منحنی‌های بار - تغییر مکان.

بود. مشاهده می‌شود که شیب همه‌ی منحنی‌های عددی در ناحیه‌ی نرم‌شوندگی به سمت صفر میل کرده و انتهای منحنی‌ها به حالت تقریباً افقی در آمده است، که بیشترین اختلاف بین منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی مربوط به ناحیه‌ی مذکور است. همچنین مشاهده می‌شود که در صورت ادامه‌ی بارگذاری در تحلیل عددی، ناحیه‌ی افقی همچنان توسعه یافته و برخلاف آنچه در واقعیت اتفاق افتاده است، کمی ظرفیت باقی مانده و صفر نشده است. این موضوع مرتبط با نحوه‌ی تعریف منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی مطابق شکل‌های ۲ و ۴ است. در حقیقت در کارهای عددی، به دلیل جلوگیری از عدم هم‌گرایی در تحلیل، میزان ظرفیت در منحنی‌های تنش - کرنش در قسمت انتهایی به صفر نمی‌رسد. از طرفی، مدل CDP قادر به حذف المان‌هایی که کاملاً دچار خسارت شده‌اند، نیست. از این رو، اصولاً در این چنین تحلیل‌هایی، مقداری اضافه ظرفیت در قسمت بعد از خرابی کامل مشاهده می‌شود.

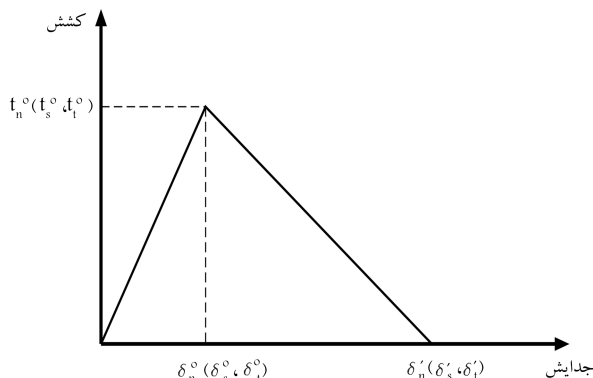
در بین ۶ نمودار حاصل از ترکیب‌های منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی مطابق جدول ۴، نمودارهای مربوط به ترکیب‌های C۱T۲ و C۲T۲ انطباق بیشتری را بین نتایج عددی و داده‌های حاصل از کار آزمایشگاهی نظیر نشان می‌دهند. هر چند تفاوت چندانی بین نمودارهای مربوط به ترکیب‌های C۱T۲ و C۲T۲ وجود ندارد، اما همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، رفتار پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی ۲ (رابطه‌ی دسای و کاریشان،^[۲۵]) برای نمودار تنش - کرنش فشاری در ناحیه‌ی پس‌خرابی، واقعی‌تر به نظر می‌رسد. از این رو، در پژوهش حاضر، ترکیب C۱T۲ برای مدل‌سازی تیر سه نقطه‌ی خمشی دارای اتصال سرد انتخاب شده است.

۳. مدل‌سازی اتصال سرد

خصوصیات مکانیک شکست برای اتصال سرد، متفاوت با بتن دو سمت آن هستند. از این رو، برای مدل‌سازی اتصال سرد از المان ۸ گره‌ی COH۲DA استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در محل اتصال سرد، مابین سطوح بتن قدیم و جدید، المان چسبانده‌ی مدل‌سازی و هر دو سطح بتنی به دو سمت المان چسبانده متصل شده‌اند. به علاوه، مابین سطوح دو سمت سطوح بتن، تماس تعریف شده است. نقش المان چسبانده به این ترتیب است که وظیفه‌ی انتقال تنش‌های برشی و تنش‌های عمود بر سطح را عهده‌دار می‌شود و در صورت تخریب المان چسبانده، دو سطح بتن قدیم و جدید به حالت تماسی در آمده و فقط انتقال تنش‌های فشاری بین آنها صورت پذیرفته است.^[۳۲]



شکل ۸. تعریف عکس شیب اولیه‌ی نمودار P-CMOD.



شکل ۷. پاسخ عمومی کشش - جدایش.

برشی را محاسبه کرد:

$$G = \frac{E}{\nu(1+\nu)} \quad (19)$$

انرژی شکست سطح واریز نمونه‌ها را می‌توان با استفاده از روش RILEM [25] که بر اساس مدل اثر اندازه‌ی باژنت برای بتن است، تعیین کرد. [26, 27] در روش RILEM، فقط بیشینه‌ی بارهای P_1, P_2, \dots, P_n ، برای نمونه‌های با ابعاد مختلف b_1, b_2, \dots, b_n و مدول کشسانی E برای تعیین مقدار انرژی شکست G_f نیاز هستند. انرژی شکست را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ محاسبه کرد: [2]

$$G_f = \frac{g(\alpha)}{EA} \quad (20)$$

که در آن، A ، شیب رگرسیون خطی مربوط به اثر اندازه است و $g(\alpha)$ از رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید:

$$g(\alpha) = \left(\frac{S}{b}\right)^2 \alpha \pi [1.5 g_1(\alpha)]^2 \quad (21)$$

عامل هندسی $g_1(\alpha)$ از رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$g_1(\alpha) = \frac{1.0 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1-\alpha)^{3/2}} \quad (22)$$

به منظور لحاظ کردن وزن نمونه‌ها، بارهای بیشینه به صورت P_1^*, \dots, P_n^* با استفاده از رابطه‌ی ۲۳ می‌شوند:

$$P_j^* = P_j + \frac{2S_j - L_j}{2S_j} g m_j \quad (23)$$

که در آن، P_j^* بار اصلاح شده‌ی هر نمونه با در نظر گرفتن وزن آن، P_j بار اعمال شده به هر نمونه، S_j ، L_j و m_j به ترتیب طول دهانه، طول تیر مطابق شکل ۱ و جرم هر نمونه و $g = 9/81 m/s^2$ هستند.

به منظور در نظر گرفتن اثر اندازه، یک رگرسیون خطی با توجه به ترسیم مختصات Y_j در مقابل X_j انجام شده است، که مقادیر آنها از روابط ۲۴ و ۲۵ به دست می‌آیند:

$$Y_j = \left(\frac{1}{\sigma_N}\right)^2 = \left(\frac{b_j t}{P_j^*}\right)^2 \quad (24)$$

$$X_j = b_j \quad (25)$$

جدول ۵. مقادیر پارامترهای پاسخ المان چسباننده.

t_n^0	t_s^0, t_t^0	$E(E_{nn})$	$G_1(E_{ss}), G_2(E_{tt})$	G_f
[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[N m/m°]
۳/۱۴۹	۰/۹۷۲	۱۰/۹۱۳	۴/۵۸۵	۱۱۱/۳۰

تکامل خرابی نیز بر اساس انرژی آزاد شده در نتیجه‌ی فرایند خرابی، که انرژی شکست نیز نامیده می‌شود، تعریف شده است.

۲.۳. مقداردهی برای پاسخ المان چسباننده

مقادیر مربوط به پارامترهای مورد استفاده برای تعریف پاسخ المان چسباننده با استفاده از رابطه‌ی کشش - جدایش در جدول ۵ ارائه و نحوه‌ی به دست آوردن آنها در ادامه توضیح داده شده است.

بیشینه‌ی مقدار تنش مقاوم اسمی کششی در حالتی که تغییرشکل کاملاً قائم بر سطح باشد، را می‌توان از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد. همچنین بیشینه‌ی تنش مقاوم اسمی در حالتی که تغییرشکل کاملاً در جهت اول یا دوم برشی (t_s^0 یا t_t^0) باشد، را می‌توان از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه کرد: [22]

$$v_c = \frac{1}{\phi} \sqrt{f_c'} \quad (16)$$

که در آن، f_c' مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال است.

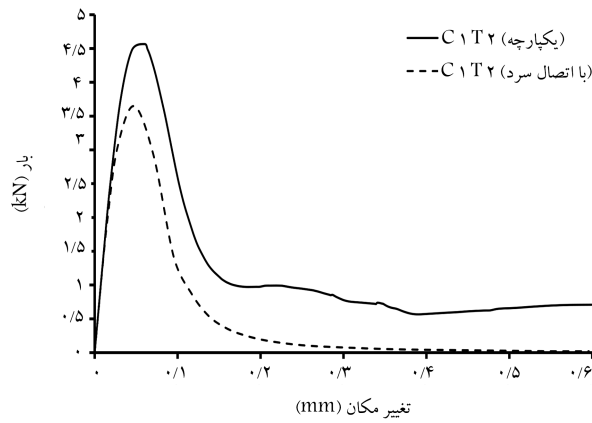
مدول کشسانی سطح واریز نمونه‌ها (E_{nn}) را می‌توان از منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک ۱۳ با استفاده از رابطه ۱۷ به دست آورد: [22]

$$E = \frac{6S a_0}{C_i b^2 t} g_2(\alpha) \quad (17)$$

که در آن S ، b و t در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. C_i مقدار عکس شیب اولیه (CMOD) ۱۴ منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک مطابق شکل ۸، $\alpha = a_0/b$ و $g_2(\alpha)$ عامل هندسی است، که از رابطه‌ی ۱۸ قابل محاسبه است:

$$g_2(\alpha) = \frac{1.73 - 8.56 + 31.2\alpha^2 - 46.3\alpha^3 + 25.1\alpha^4}{(1-\alpha)^{3/2}} \quad (18)$$

برای مصالح ایزوتروپ همگن، رابطه‌ی ساده بین ثابت‌های کشسان، نظیر: مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون وجود دارد، که با استفاده از آن می‌توان مدول



شکل ۱۱. مقایسه‌ی منحنی بار - تغییر مکان مربوط به حالت یک‌پارچه و با اتصال سرد.

برای استفاده از رابطه‌ی ۲۰ باید دست‌کم ۹ نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته و آزمایش شوند. چنانچه امکان انجام چنین آزمایش‌هایی فراهم نباشد و یا این‌که نتایج چنین آزمایش‌هایی برای رده‌ی بتن مورد نظر در دسترس نباشد، می‌توان به جای استفاده از رابطه‌ی ۲۰، از رابطه‌ی ۲۹ استفاده کرد: [۲۸]

$$G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (29)$$

که در آن، f_{cm} بر حسب مگاپاسکال و G_f بر حسب N/m است.

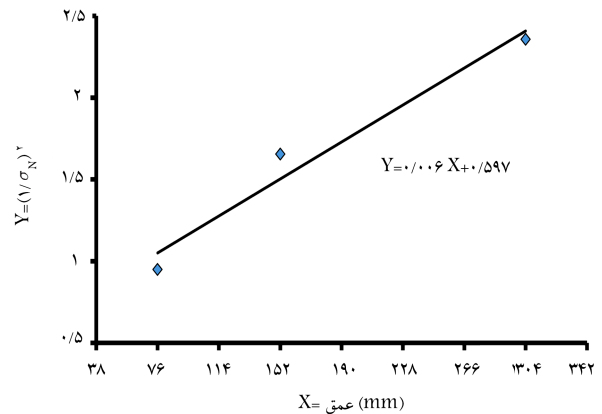
۴. نتایج و بحث و بررسی

در پژوهش حاضر، جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک در قسمت شکاف مدل‌های تیر سه نقطه‌یی خمشی اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۰، کانتورهای تنش فون میسز برای مدل تیر متوسط در جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک معادل ۰/۸ میلی‌متر، به عنوان نمونه مشاهده می‌شود، که مطابق آن، به طور عمده در نواحی نزدیک به قسمت باقیمانده از اتصال سرد و نیز در حوالی تکیه‌گاه‌ها، تمرکز تنش وجود دارد. با توجه به این موضوع و این‌که محل قرارگیری اتصال سرد در جایی واقع شده است که تحت تأثیر بیشترین تنش‌های کششی و فشاری ناشی از خمش است و نیز این‌که طبق خصوصیات مکانیک شکست و مقاومت مصالح، اتصال سرد وضعیت مستعدتری برای شکست نسبت به سایر نقاطی که یک‌پارچه هستند، دارد؛ می‌توان نتیجه گرفت که رفتار تیر به شدت تحت تأثیر رفتار اتصال سرد است. این موضوع را می‌توان از مقایسه‌ی دو منحنی بار - تغییر مکان مربوط به دو حالت یک‌پارچه و با اتصال سرد برای تیر بتنی کوچک شکل ۱۱ نتیجه گرفت.

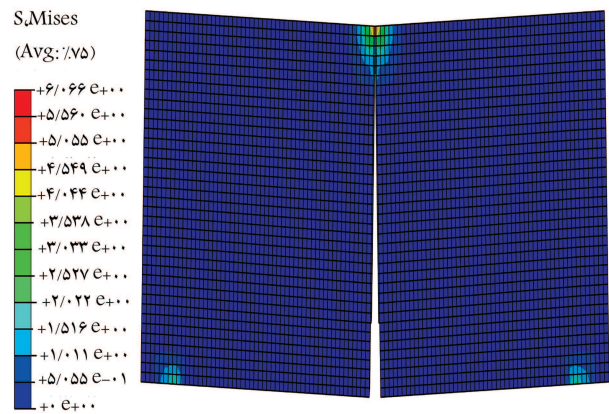
جهت بررسی صحت مقادیر و روابط پیشنهادی، منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک ۱۵ حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی شاه و کیشن (۲۰۱۰)، [۸] مقایسه شده است. شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، منحنی‌های بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک حاصل از تحلیل اجزاء محدود بر اساس روابط ۲۰ و ۲۹ و کار آزمایشگاهی برای سه اندازه‌ی مختلف تیر نشان می‌دهند که به طور کلی تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین، میزان بیشینه‌ی بار تحمل شده در هر یک از مدل‌های عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، دقت خوبی دارند.

جدول ۶. میانگین بیشینه‌ی بار تیرها. [۸]

اندازه‌ی تیر	کوچک	متوسط	بزرگ
میانگین بیشینه‌ی بار (kN)	۳/۹۰	۵/۹۱	۹/۹۰



شکل ۹. ترسیم تحلیل رگرسیون. [۸]



شکل ۱۰. کانتورهای تنش فون میسز بر حسب مگاپاسکال برای تیر متوسط.

شیب (A) و تلاقی (I) رگرسیون خطی $Y = AX + I$ با استفاده از روابط ۲۶ الی ۲۸ قابل محاسبه هستند: [۲۵]

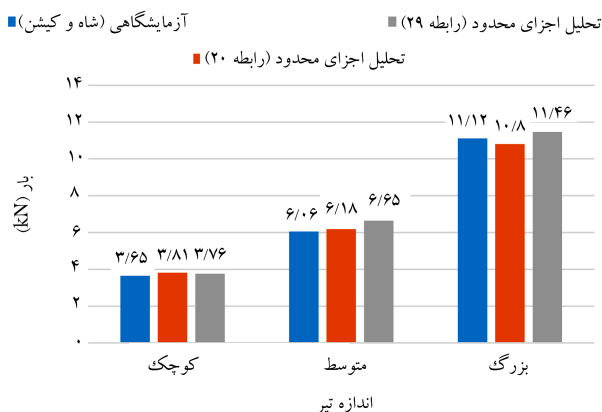
$$A = \frac{\sum_j (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_j (X_j - \bar{X})^2} \quad (26)$$

$$I = \bar{Y} - A\bar{X} \quad (27)$$

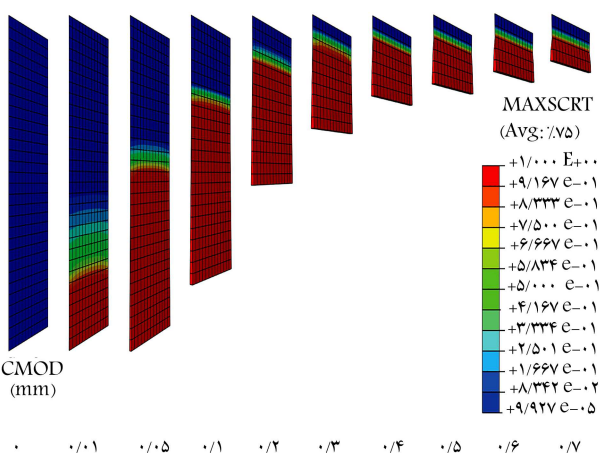
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_j X_j, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_j Y_j \quad (28)$$

بیشینه‌ی بارهای (P_j) حاصل از آزمایش برای تیر با ۳ اندازه‌ی کوچک، متوسط و بزرگ با عمق‌های به ترتیب ۷۶، ۱۵۲، ۳۰۴ میلی‌متر، نسبت دهانه به عمق ۲/۵، نسبت شکاف به عمق ۰/۲ و ضخامت یکسان ۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری و در جدول ۶ ارائه شده است. [۸] ترسیم حاصل از تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

استفاده از رابطه‌ی ۲۰، نیازمند داشتن تعدادی نتایج آزمایشگاهی است. در حقیقت، برای استفاده از رابطه‌ی اخیر به دست‌کم سه اندازه‌ی مختلف برای آزمایش تیر سه نقطه‌یی خمشی و برای حصول اطمینان نسبی در نتایج برای هر اندازه، دست‌کم به سه نمونه‌ی آزمایشگاهی مشابه برای میانگین‌گیری نتایج نیاز است. به این ترتیب،



شکل ۱۵. بیشینه‌ی بار تحمل شده در تحلیل اجزاء محدود (بر اساس روابط ۲۰ و ۲۹) در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی نظیر.

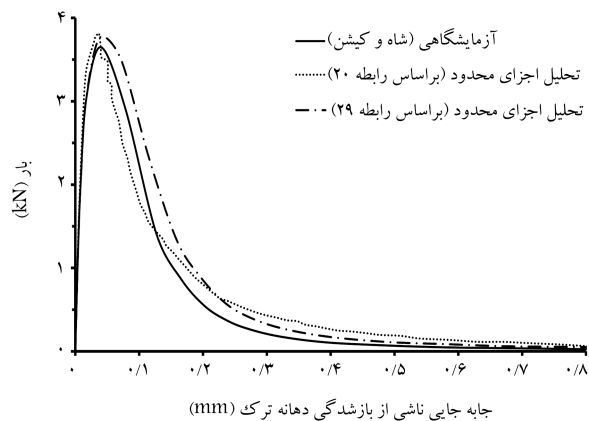


شکل ۱۶. فرایند زوال المان چسباننده با افزایش جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک برای مدل تیر متوسط.

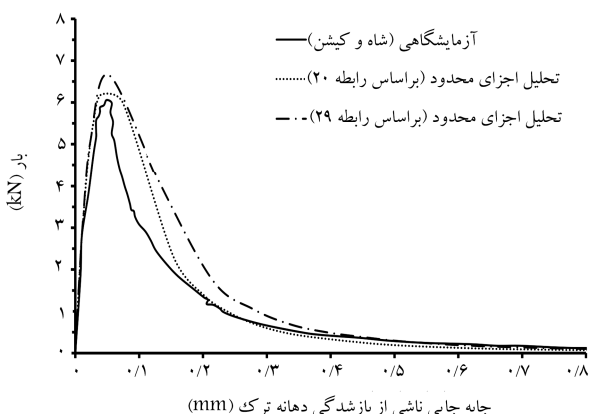
پارامتر اشاره شده نشان می‌دهد که آیا در یک نقطه‌ی مادی، معیار شروع خرابی بر اساس بیشینه‌ی تنش اسمی مطابق رابطه‌ی ۱۵ اقلان شده است یا خیر. طبق رابطه‌ی ۱۵، مقدار پارامتر ذکر شده بین صفر تا ۱ است. زمانی که برای یک نقطه‌ی مادی برابر ۱ شود، این بدان معناست که تغییر شکل غیرقابل بازگشت در المان مرتبط شکل گرفته است، که پس از آن، المان وارد مرحله‌ی تکامل خرابی بر اساس کمیت انرژی شکست تعریف شده می‌شود و در صورت تکامل خرابی، المان مربوطه حذف خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که لایه‌ی چسباننده تحت فشار خالص خراب نمی‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

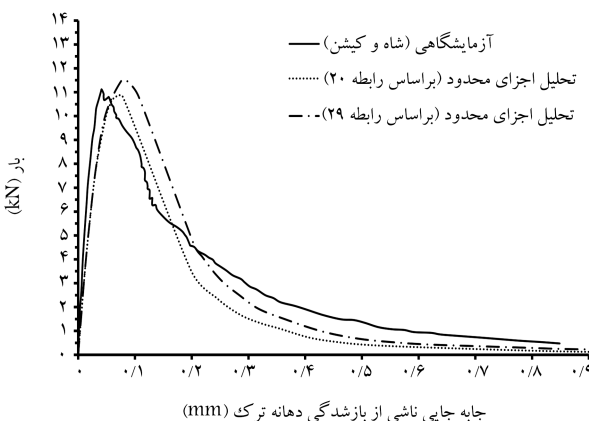
در نوشتار حاضر، تیر سه نقطه‌ی خمشی بتنی با یک اتصال سرد در وسط دهانه در ۳ اندازه‌ی مختلف با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی به وسیله‌ی نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. مود غالب در این وضعیت تیر، مود ۱ (مود بازشدگی) ۱۶ مکانیک شکست است. رفتار مصالح بتنی با استفاده از مدل خسارت خمیری مدل‌سازی شد. برای تعریف منحنی تنش - کرنش فشاری، ۶ رابطه‌ی نسبتاً معروف (روابط ۱ الی ۶) در نظر گرفته شدند و نشان داده شد که با تعریف صحیح پارامترهای مربوط به هر یک از روابط (خصوصاً مدل کشسانی)، منحنی حاصل



شکل ۱۲. مقایسه‌ی منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک برای مدل تیر کوچک.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک برای مدل تیر متوسط.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی منحنی بار - جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک برای مدل تیر بزرگ.

شکل ۱۶، نیز روند خرابی المان چسباننده را در نتیجه‌ی افزایش میزان جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک در مدل تیر متوسط به عنوان نمونه نشان می‌دهد. پارامتر استفاده شده در شکل مذکور، معیار شروع خرابی بر اساس بیشینه‌ی تنش اسمی است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، معیار شروع خرابی، یکی از سه جزء مکانیزم شکست در خرابی پیش‌رونده‌ی تعریف شده بر اساس پاسخ کشش - جدایش است.

- جدایش برای پاسخ آن مدل‌سازی شده است. به دلیل این‌که رفتار تیر به شدت تحت تأثیر رفتار اتصال سرد است، دقت در تعریف خصوصیات مکانیک شکست اتصال سرد بسیار مهم است. برای تعریف پارامترهای مربوط به اتصال سرد، نظیر $E_{ss} = E_{tt}$ و E_{nn} ، $t_s^0 = t_t^0$ ، t_n^0 به ترتیب از روابط 10^0 ، 16^0 ، 17^0 و 19^0 استفاده شد. همچنین برای تعریف G_f (انرژی شکست)، دو رابطه 20^0 و 29^0 پیشنهاد شد. برای استفاده از رابطه 20^0 ، نیاز به داشتن نتایج آزمایشگاهی تیر سه نقطه‌یی خمشی در ۳ اندازه‌ی مختلف برای رده‌ی بتن مورد نظر است. در صورت نداشتن چنین نتایج آزمایشگاهی، می‌توان به جای استفاده از رابطه 20^0 ، از رابطه 29^0 استفاده کرد. منحنی‌های بار-جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی استفاده شدند. بر اساس منحنی‌های بار-جابه‌جایی ناشی از بازشدگی دهانه‌ی ترک حاصل از تحلیل اجزاء محدود بر اساس روابط 20^0 و 29^0 و مقایسه‌ی آنها با نتایج آزمایشگاهی نظیر مشخص شد که هر دو رابطه‌ی اخیر، دقت مناسبی برای استفاده در شبیه‌سازی دارند و تطابق خوبی با منحنی‌های آزمایشگاهی در هر یک از ۳ اندازه‌ی مختلف تیرهای مفروض نشان می‌دهند. با استفاده از روش شبیه‌سازی پیشنهادی در نوشتار حاضر، می‌توان به بررسی رفتار قاب‌های بتنی با اتصال سرد و نیز قاب‌ها و قطعات بتنی که تعمیر، ترمیم، و بهسازی قرار شده‌اند، پرداخت.

از تمامی روابط در شاخه‌ی صعودی نمودار تا نقطه‌ی بیشینه‌ی مقاومت فشاری بتن بر همدیگر منطبق می‌شوند. اما روابط 1^0 ، 3^0 و 4^0 (دسته‌ی اول) در مقایسه با روابط 2^0 و 6^0 (دسته‌ی دوم) در قسمت شاخه‌ی نزولی نمودار، رفتاری نسبتاً متفاوت داشتند. از این رو، با توجه به انطباق روابط موجود در هر دسته، رابطه‌ی 1^0 از دسته‌ی اول و رابطه‌ی 2^0 از دسته‌ی دوم به منظور بررسی دقیق‌تر و استفاده از مناسب‌ترین آنها برای شبیه‌سازی انتخاب شدند. برای تعریف منحنی تنش-کرنش کششی نیز ۳ رابطه (رابطه‌ی 11^0 و مدل‌های شکل ۳-الف و شکل ۳-ب) در نظر گرفته شدند. از آن‌جا که رفتار یک تیر خمشی تحت تأثیر توأم فشار و کشش در مقطع عرضی آن است، از این رو، ۶ ترکیب متفاوت از دو رابطه‌ی تنش-کرنش فشاری در مقابل ۳ رابطه‌ی تنش-کرنش کششی در نظر گرفته شد. در نهایت، از بین ۶ ترکیب، با مقایسه‌ی منحنی‌های بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی بر روی تیر یک پارچه، ترکیب C1T2 که شامل رابطه‌ی 1^0 برای منحنی تنش-کرنش فشاری و مدل شکل ۳-الف برای منحنی تنش-کرنش کششی بتن بود، جهت استفاده در مدل CDP انتخاب و نشان داده شد که رفتار تیر بتنی تحت مود اول شکست، به شدت وابسته به رفتار تنش-کرنش کششی بتن است و به تناسب وابستگی بسیار ناچیزی نسبت به رفتار تنش-کرنش فشاری بتن دارد. اتصال سرد نیز با استفاده از المان چسباننده توسط قانون کشش

پانویس‌ها

1. bond properties
2. length of process zone
3. brittleness number
4. mode I fracture toughness
5. critical crack tip opening displacement
6. size effect method
7. cohesive zone model
8. bond-based peridynamics
9. concrete damage plasticity
10. traction-separation relation
11. damage initiation criterion
12. damage evolution law
13. crack mouth opening displacement
14. initial compliance
15. initial compliance
16. mode I (opening mode)

منابع (References)

1. Golewski, G.L. "Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash thanks to use of Digital Image", *Measurement*, **135**, pp. 96-105 (2019).
2. Kishen, J.C. and Rao, P.S. "Fracture of cold jointed concrete interfaces", *Engineering Fracture Mechanics*, **74**(1), pp. 122-131 (2007).
3. Lim, Y.M., Kim, M.K., Shin, S.K. and et al. "Numerical simulation for quasi-brittle interface fracture in cementitious bi-material system", *In Proceedings of the 4th*

International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, **1**, pp.73-80 (2001).

4. Shah, S.G. and Kishen, J.C. "Fracture behavior of concrete-concrete interface using acoustic emission technique", *Engineering Fracture Mechanics*, **77**(6), pp. 908-924 (2010).
5. Tschegg, E. and Stanzl, S. "Adhesive power measurements of bonds between old and new concrete", *Journal of materials science*, **26**(19), pp. 5189-5194 (1991).
6. Tschegg, E., Tan, D.M., Kirchner, H.O.K. and et al. "Interfacial and subinterfacial fracture in concrete", *Acta metallurgica et materialia*, **41**(2), pp. 569-576 (1993).
7. Kunieda, M., Kurihara, N., Uchida, Y. and et al. "Application of tension softening diagrams to evaluation of bond properties at concrete interfaces", *Engineering Fracture Mechanics*, **65**(2-3), pp. 299-315 (2000).
8. Shah, S.G. and Kishen, J.C. "Nonlinear fracture properties of concrete-concrete interfaces", *Mechanics of Materials*, **42**(10), pp. 916-931 (2010).
9. Spring, D.W. and Paulino, G.H. "A growing library of three-dimensional cohesive elements for use in ABAQUS", *Engineering Fracture Mechanics*, **126**, pp. 190-216 (2014).
10. Dugdale, D.S. "Yielding of steel sheets containing slits", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **8**(2), pp. 100-104 (1960).
11. Barenblatt, G.I. "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture, general ideas and hypotheses, axially-symmetric cracks", *Applied Mathematics and Mechanics*, **23**(3), pp. 622-636 (1959).

12. Park, K., Choi, H. and Paulino, G.H. "Assessment of cohesive traction-separation relationships in ABAQUS: A comparative study", *Mechanics Research Communications*, **78**, pp. 71-78 (2016).
13. Selivanov, M.F. and Chornoivan, Y.O. "A semi-analytical solution method for problems of cohesive fracture and some of its applications", *International Journal of Fracture*, **212**(2), pp. 113-121 (2018).
14. Muralidhara, S., Raghu Prasad, B.K., Eskandari, H. and et al. "Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission", *Construction and Building Materials*, **24**(4), pp. 479-486 (2010).
15. Park, K., Paulino, G.H. and Roesler, J. "Cohesive fracture model for functionally graded fiber reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, **40**(6), pp. 956-965 (2010).
16. Hoover, C.G. and Baüant, Z.P. "Comprehensive concrete fracture tests: size effects of types 1 & 2, crack length effect and postpeak", *Engineering Fracture Mechanics*, **110**, pp. 281-289 (2013).
17. Hoover, C.G. and Baüant, Z.P. "Universal size-shape effect law based on comprehensive concrete fracture tests", *Journal of Engineering Mechanics*, **140**(3), pp. 473-479 (2014).
18. Kumar, S., Pandey, S.R. and Srivastava, A. "Determination of double-K fracture parameters of concrete using peak load method", *Engineering Fracture Mechanics*, **131**, pp. 471-484 (2014).
19. Kozłowski, M., Kadela, M. and Kukielka, A. "Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams", *Procedia Engineering*, **108**, pp. 349-354 (2015).
20. Gil, D. and Golewski, G. "Effect of Silica Fume and Siliceous Fly Ash Addition on the Fracture Toughness of Plain Concrete in Mode I", in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing (2018).
21. Shah, S. and Kishen, J.C. "Fracture properties of concrete-concrete interfaces using digital image correlation", *Experimental Mechanics*, **51**(3), pp. 303-313 (2011).
22. Yang, D. Dong, W., Liu, X. and et al. "Investigation on mode-I crack propagation in concrete using bond-based peridynamics with a new damage model", *Engineering Fracture Mechanics*, **199**, pp. 567- 581 (2018).
23. Kmiecik, P. and Kamiński, M. "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **11**(3), pp. 623-636 (2011).
24. Owen, D. and Figueiras, J. *Ultimate Load Analysis Of Reinforced Concrete Plates and Shells Including Geometric Nonlinear Effects*, finite element software for plates and shells, pp. 327-388 (1984).
25. Desayi, P. and Krishnan, S. "Equation for the stress-strain curve of concrete", in *Journal Proceedings*, **61**(3), pp.345-350 (1964).
26. Institution, B.S. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, British Standards Institution, pp.27-37 (2004).
27. Majewski, S. *The Mechanics of Structural Concrete in Terms of Elasto-Plasticity*, silesian polytechnic publishing house, gliwice, pp.32-55 (2003).
28. Wang, T. and Hsu, T.T. "Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models", *Computers & Structures*, **79**(32), pp. 2781-2791 (2001).
29. Saenz, L. "Equation for the stress-strain curve of concrete", *ACI J.*, **61**(9), pp. 1229-1235 (1964).
30. Massicotte, B., Elwi, A.E. and MacGregor, J.G. "Tension-stiffening model for planar reinforced concrete members", *Journal of Structural Engineering*, **116**(11), pp. 3039-3058 (1990).
31. Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D., Chan, T. and et al. "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS", in *Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland University of Technology (2011).
32. ABAQUS, "ABAQUS 6.14 user's manual", Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA (2014).
33. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95)", *American Concrete Institute* (1995).
34. Shah, S.P., Swartz, S.E. and Ouyang, C. "Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials", *John Wiley & Sons*, pp.110-162 (1995).
35. Shah, S. "Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete", *Materials and Structures*, **23**(6), pp. 461-465 (1990).
36. Ba, Z.P. and Kazemi, M.T. "Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete", *International Journal of fracture*, **44**(2), pp. 111-131 (1990).
37. Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A. "Determination of fracture energy from size effect and brittleness number", *ACI Materials Journal*, **84**(6), pp. 463-480 (1987).
38. Beverly, P. "Fib model code for concrete structures 2010", *Ernst & Sohn*, pp.78-79 (2013).