



بررسی مکانیک شکست پانل بتنی لایه‌ای تابعی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه

صفا پیمان^{۱*}، پویا حیدری دیگه‌سرا^۲

^۱ گروه عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۲۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۲۶

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۴-۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۰۸

کلمات کلیدی:

مکانیک شکست

ماده بتنی لایه‌ای تابعی

مدل آزمایش خمش سه نقطه‌ای

مدل ناحیه چسبنده

منحنی بار-بازشدگی نوک ترک

خلاصه: در این تحقیق مطالعات عددی مکانیک شکست مربوط به رشد ترک یک ماده بتنی لایه‌ای تابعی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه گلوله شامل بتن معمولی، مسلح الیافی و سنگدانه‌های سفت به وسیله مدلسازی آزمایش خمش سه نقطه‌ای در حضور ترک اولیه ارائه شده است. از مدل ناحیه چسبنده دو خطی برای بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های سفت و سه خطی برای بتن مسلح الیافی به منظور رفتار شکست در ناحیه فرآیند استفاده شده و روش محاسباتی المان محدود توسعه یافته (XFEM) برای آنالیز عددی به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از مدلسازی عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای به وسیله منحنی بار-بازشدگی نوک ترک (P-CMOD) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نمونه لایه‌ای تابعی در مقایسه با نمونه‌های همگن بتن معمولی، مسلح الیافی و سنگدانه‌های سفت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که نمونه مسلح الیافی همگن رفتار شکست به مراتب بهتری از نمونه‌های دیگر دارد و نمونه لایه‌ای تابعی نیز به دلیل دارا بودن لایه مسلح الیافی در لایه انتهایی در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های سفت دچار شکست ناگهانی نمی‌شود. همچنین اثرات هر یک از لایه‌ها و تغییر ضخامت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده گردید که لایه مسلح الیافی با توجه به انرژی شکست زیاد ناشی از پل‌بندی الیافها نسبت به سایر لایه‌ها، تاثیر مفیدی بر رفتار شکست نمونه دارد و با اتخاذ موقعیت و ضخامت مناسب برای این لایه می‌توان ضمن تامین کارایی مناسب در رفتار شکست، هزینه مصالح را نیز به میزان قابل توجهی کاهش داد.

۱- مقدمه

مکانیکی این مصالح در کنار دیگر فواید آن می‌باشد. فرآیند ساخت و طراحی مواد لایه‌ای تابعی یکی از موضوع‌های مورد علاقه در سه دهه اخیر می‌باشد.

مصالح لایه‌ای تابعی از تغییر پیوسته ویژگی‌های مصالح از قبیل ویژگی‌های مکانیکی، الکتریکی و دمایی با توجه به کاربردشان حاصل می‌شوند [۱]. دو ساختار اساسی از لایه‌ای کردن مواد [۱] در شکل ۱ نشان داده شده است. برای سازه لایه‌ای پیوسته، دو ماده مختلف به تدریج از یک فاز به دیگری تغییر می‌کنند (شکل ۱-الف). در حالی که در شکل ۱-ب مصالح در یک الگوی غیر پیوسته تغییر فاز می‌دهند. چنین لایه‌ای کردن پلکانی، مواد لایه‌ای تابعی قطعه‌ای (segmental FGMs) نامیده می‌شوند. در این تحقیق از لایه‌ای کردن

با توجه به افزایش تعداد حملات تروریستی، نیاز به تحقیق برای دستیابی و توسعه سازه‌های محافظ اقتصادی که قادر به تحمل بارهای شدید از قبیل امواج انفجار و بار ضربه ناشی از اصابت گلوله باشند، بیش از پیش پررنگ می‌شود. با توجه به توسعه تکنولوژی و مصالح، می‌توان به فرم‌های جدیدی از محافظت برای سازه‌های موجود دست یافت. یک سازه به طور کلی باید ایمنی، قابلیت سرویس‌دهی، شرایط اقتصادی بهینه و شرایط اجرایی مناسب را داشته باشد. مصالح سیمانی لایه‌ای تابعی (FGM) یک راهکار جدید در ارتباط با تکنولوژی مصالح سیمانی به منظور کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد

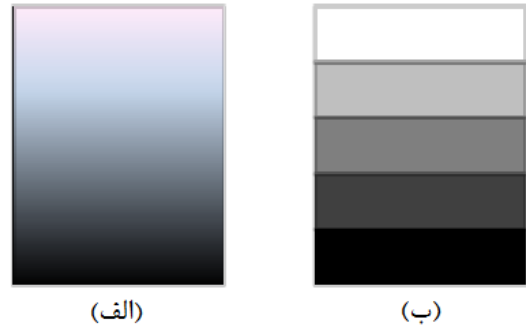
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: speyman@mail.kntu.ac.ir



می‌باشد. با افزایش مستقیم الیاف به مخلوط بتنی و یا مسلح کردن آن با فرم‌ها و شکل‌های مختلفی از پلیمرهای الیافی، مقاومت کششی و شکل‌پذیری بتن افزایش یافته و رفتار توزیع ترک آن بهبود می‌یابد [۸-۱۰]. تشکیل ترک اغلب بر رفتار سازه‌ای بتن حاکم می‌باشد. اما وقتی که یک ترک در بتن مسلح الیافی تشکیل می‌شود، الیاف‌ها با قرارگیری در محل ترک در برابر بازشدگی زیاد ترک مقاومت خواهند کرد و روی سطوح ترک، اثر پل‌بندی^۲ ترک را ایجاد می‌کنند. مدل‌های شکست مختلفی می‌تواند بسته به تاثیر الیاف در فراهم کردن پل‌بندی ترک نتیجه شود.

رفتار شکست کششی مصالح بر پایه بتن می‌تواند به وسیله منحنی تنش کششی در برابر بازشدگی ترک (مدل ناحیه چسبنده) بیان شود، که پارامترهای این مدل می‌تواند به صورت آزمایشگاهی تعیین شود و اگر هیچ نتایج آزمایشی موجود نباشد، مقادیر انرژی شکست در مدل CEB-FIP کد ۱۹۹۰ [۱۱] توصیه شده است. وقتی که انرژی شکست و مقاومت کششی تعیین شد، ارتباط کشش-بازشدگی ترک را می‌تواند به صورت‌های خطی [۷]، دو خطی [۱۱، ۱۲ و ۱۳]، چند خطی [۱۴ و ۱۵] و چند جمله‌ای یا نمایی [۱۶-۱۸] تقریب زد. عملکرد چنین روشی براساس تعریف یک رابطه ساختاری کشش-بازشدگی ترک روی سطوح ترک می‌باشد، به طوری که تنش روی سطوح ترک در برابر افزایش بازشدگی ترک کاهش یابد. مدل ناحیه چسبنده اولین بار توسط بارنالت [۱۹ و ۲۰] و داگدال [۲۱] پیشنهاد شد.

در این تحقیق یک ماده بتنی لایه‌ای تابعی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه گلوله با توجه به مطالعات و تحقیقات قبلی [۲۲] اختیار گردیده و رفتار مکانیک شکست آن بررسی و کارایی مناسب آن به طور کامل شرح داده شده است. این ماده بتنی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه گلوله متشکل از بتن مسلح الیافی برای جذب انرژی بارگذاری و جلوگیری از خرد شدن و بالطبع آن پرتاب شدن تکه‌های بتن خرد شده به اطراف و همچنین کنترل رشد ترک، بتن با سنگدانه‌های سفت با هدف جلوگیری از نفوذ گلوله و بتن معمولی با ضخامت عمده به منظور کاهش هزینه‌ها می‌باشد. در واقع با استفاده عملکردی از انواع مختلف نمونه‌های بتنی، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف مصالح صورت می‌گیرد.



شکل ۱. ساختار لایه‌ای کردن (الف) پیوسته (ب) پلکانی
Fig. 1. Graded structures (a) Continuous (b) stepwise

پلکانی استفاده شده است. از آنجایی که نمی‌توان از وجود ترک‌ها در بتن اجتناب کرد، بنابراین برای مطالعه رفتار بتن در حضور ترک، استفاده از معیارهای مکانیک شکست یک ضرورت است. به وجود آمدن مکانیک شکست به وقوع حوادث فاجعه‌آمیز در تاریخ اخیر مربوط می‌شود [۲]. مکانیک شکست رفتار مصالح را در حضور ترک‌ها و نقص‌های مانند آن بررسی می‌کند و ابزار مناسبی را برای اندازه‌گیری مقاومت شکست یا دوام مصالح ارائه می‌دهد [۳]. رفتار اکثر مواد در مکانیک شکست ناشی از رفتار ماده در ناحیه فرآیند^۱ می‌باشد [۴]. تفاوت بین مصالح در شکل و ابعاد ناحیه فرآیند شکست است که در جلوی نوک ترک قبل از شکست و مکانیزم مصرف انرژی تشکیل می‌شود. به طوری که در مصالح ترد، انرژی‌های الاستیک در قالب انرژی سطحی بدون هیچ ناحیه فرآیند شکست مصرف می‌شوند [۵]. در مصالح شکل‌پذیر، ناحیه فرآیند شکست ناحیه پلاستیکی است که می‌تواند مقدار قابل توجهی از انرژی را مصرف کند (بسیار بیشتر از انرژی سطحی) [۶]. برای مصالح شبه ترد، معمولاً یک ناحیه فرآیند شکست بزرگی که مقدار زیادی از انرژی را قبل از شکست مصرف می‌کند، تشکیل می‌شود [۷]. این مورد بتن را با یک پاسخ نرم‌شدگی غیرخطی پس از نقطه اوج فراهم می‌کند.

بتن معمولی به صورت گسترده در مهندسی عمران به خاطر هزینه تولید پایین آن، قابلیت فرم‌پذیری و رفتار مطلوب در برابر فشار کاربرد دارد. معایب اصلی این مصالح مربوط به مقاومت کششی ضعیف و ظرفیت تغییر شکل محدود به دلیل وجود ترک در آن

تعریف می‌شود:

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2} \quad (1)$$

که Δ_n و Δ_t به ترتیب جدایی نرمال و مماسی هستند. زمانی که جدایی موثر از جدایی بحرانی موثر ($\bar{\delta}_c$) کوچکتر است، کشش‌های نرمال و مماسی (T_n, T_t) نسبتی از جدایی‌های نرمال و مماسی به صورت زیر هستند:

$$T_n = K_p \Delta_n \quad (2)$$

$$T_t = K_p \Delta_t \quad (3)$$

که K_p سختی پنالتی است. زمانی که جدایی به جدایی بحرانی موثر می‌رسد، حالت جدایی متناظر با شروع خرابی یا شروع ترک است. یک معیار شکست درجه دو برای تعیین شروع خرابی استفاده می‌شود که به جدایی بحرانی موثر زیر منجر می‌شود:

$$\bar{\delta}_c = \delta_{nc} \delta_{tc} \sqrt{\frac{1 + \beta_e^2}{\delta_{tc}^2 + (\beta_e \delta_{nc})^2}} \quad (4)$$

که δ_{tc} و δ_{nc} به ترتیب به صورت نسبتی بین مقاومت چسبندگی نرمال و مماسی (σ_{max}, τ_{max}) و سختی پنالتی تعریف می‌شوند و β_e نسبتی بین جدایی‌های مماسی و نرمال می‌باشد. نکته اینکه چنانچه مقاومت چسبندگی نرمال برابر مقاومت چسبندگی مماسی باشد، جدایی بحرانی برابر یک مقدار ثابت می‌باشد:

$$\bar{\delta}_c = \frac{\sigma_{max}}{K_p} \quad (5)$$

زمانی که جدایی موثر بزرگتر از جدایی بحرانی موثر ($\bar{\delta}_c$) و کوچکتر از جدایی شکست کامل موثر ($\bar{\delta}_f$)، یعنی $\bar{\delta}_c < \bar{\Delta} < \bar{\delta}_f$ باشد، حالت جدایی متناظر با نرم‌شدگی حاصل می‌شود. کشش‌های چسبندگی نرمال و مماسی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T_n = (1-d)K_p \Delta_n \quad (6)$$

$$T_t = (1-d)K_p \Delta_t \quad (7)$$

که d متغیر آسیب اسکالر است.

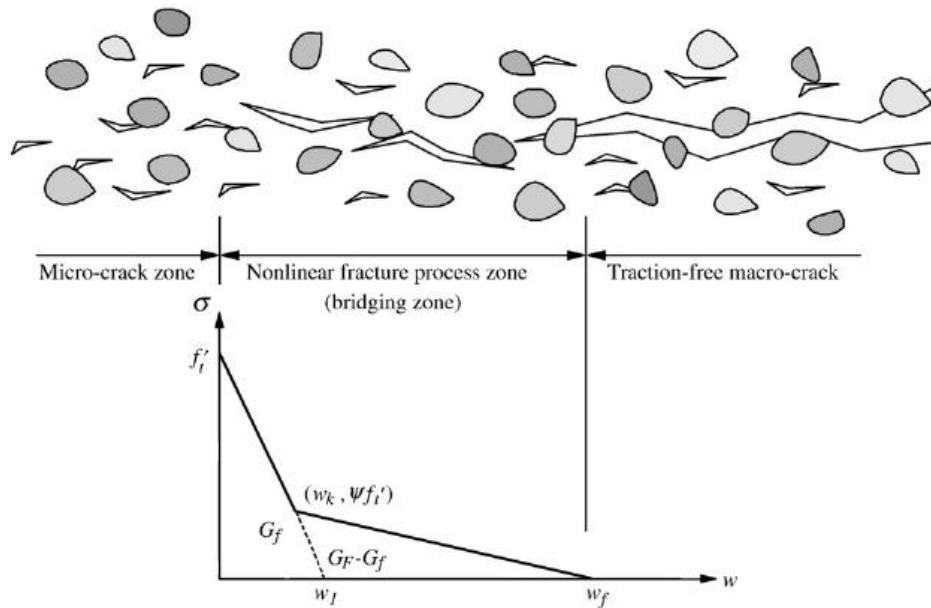
هدف اصلی این مطالعه، دست‌یابی به الگوی رشد و گسترش ترک در اعضای بتن FG مذکور به وسیله مدل آزمایش خمش سه نقطه‌ای در حضور ترک اولیه می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، برنامه المان محدود سه بعدی ABAQUS اختیار گردیده است. در این مطالعه سعی بر آن است که با بهره گرفتن از یک رفتار مناسب از مکانیک شکست بتن به وسیله اعتبارسنجی با تحقیقات موجود، الگوی مدلسازی به صورتی اختیار گردد که شبیه‌سازی نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای به صورت سه بعدی و بدون هیچ‌گونه ساده‌سازی در مصالح و هندسه باشد. در واقع از مدل سه بعدی کامل بدون اثرات ساده‌سازی‌های مربوط به تقارن‌سازی استفاده شود، به طوری که برای مثال شرایط تکیه‌گاهی به طور دقیقی در نظر گرفته شود.

۲- فرضیات مدلسازی و اعتبارسنجی

در این تحقیق به منظور آنالیز رشد ترک، از روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) استفاده شده است. روش المان محدود توسعه یافته، یک روش عددی مناسب برای مسائل شامل ناپیوستگی‌ها، تغییر شکل‌های موضعی و هندسه‌های پیچیده می‌باشد و می‌تواند به طور چشمگیری راه‌حل بسیاری از این دست مسائل از قبیل رشد ترک‌ها را ساده کند [۲۳ و ۲۴]. ایده کلیدی در فرمولبندی این روش، بهبود توابع تغییر مکانی روش المان محدود رایج (FEM) با تعریف توابع غنی‌سازی شده اضافی می‌باشد [۲۳]. در روش المان محدود رایج به منظور تکمیل آنالیز رشد ترک، مش‌بندی باید به طور مناسبی اصلاح شود، این در حالی است که روش المان محدود توسعه یافته یک روش بسیار موثر برای شبیه‌سازی شروع و رشد یک ترک در طول یک مسیر دلخواه و بدون نیاز به مش‌بندی مجدد می‌باشد.

به منظور اعتبارسنجی رفتار رشد ترک در نرم‌افزار آباکوس از مقاله روسلر و همکارانش [۲۵] استفاده شده است. در مقاله مزبور با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای، پارامترهای شکست به دست آمده و روابط کشش-جدایی دو خطی و سه خطی برای بتن معمولی و بتن مسلح الیافی برای رشد ترک ارائه گردیده است.

رابطه کشش-جدایی در آباکوس در ابتدا به وسیله کامانو و همکارانش [۲۶] گسترش یافت. این مدل تغییر سختی شکست را به صورت تابعی از یک نسبت ترکیب مدی در نظر می‌گیرد. به منظور محاسبه برای شرایط مد ترکیبی، جدایی موثر ($\bar{\Delta}$) به صورت زیر



شکل ۲. مکانیزم شکست بتن معمولی و پارامترهای شکست براساس مدل نرم‌شدگی دوخطی [۲۵]

Fig. 2. Plain concrete fracture mechanisms and experimental fracture parameter based softening model

برای بتن معمولی و مدل نرم‌شدگی سه خطی برای بتن مسلح الیافی استفاده شده است. مکانیزم شکست تدریجی بتن معمولی می‌تواند به صورت یک ناحیه میکرو ترک، یک ناحیه پل‌بندی و یک ناحیه ماکرو ترک آزاد از کشش مطابق شکل ۲ ایده‌آل‌سازی شود [۲۹]. پارک و همکارانش [۳۰] به منظور تقریب زدن ناحیه فرآیند شکست غیرخطی بتن معمولی، مدل نرم‌شدگی دو خطی مطابق شکل ۲ را پیشنهاد دادند. مدل نرم‌شدگی دو خطی به وسیله چهار پارامتر شکست آزمایشگاهی، مقاومت کششی f_t' ، انرژی شکست اولیه G_f ، انرژی شکست کل و بازشدگی بحرانی نوک ترک (CTOD_c) تعریف می‌شود.

ω_1 از برخورد شیب نرم‌شدگی اولیه با محور افقی به دست می‌آید [۳۰]:

$$\omega_1 = \frac{2G_f}{f_t'} \quad (8)$$

عرض بازشدگی ترک در نقطه تغییر شیب (ω_k) به صورت زیر فرض شده است [۳۰]:

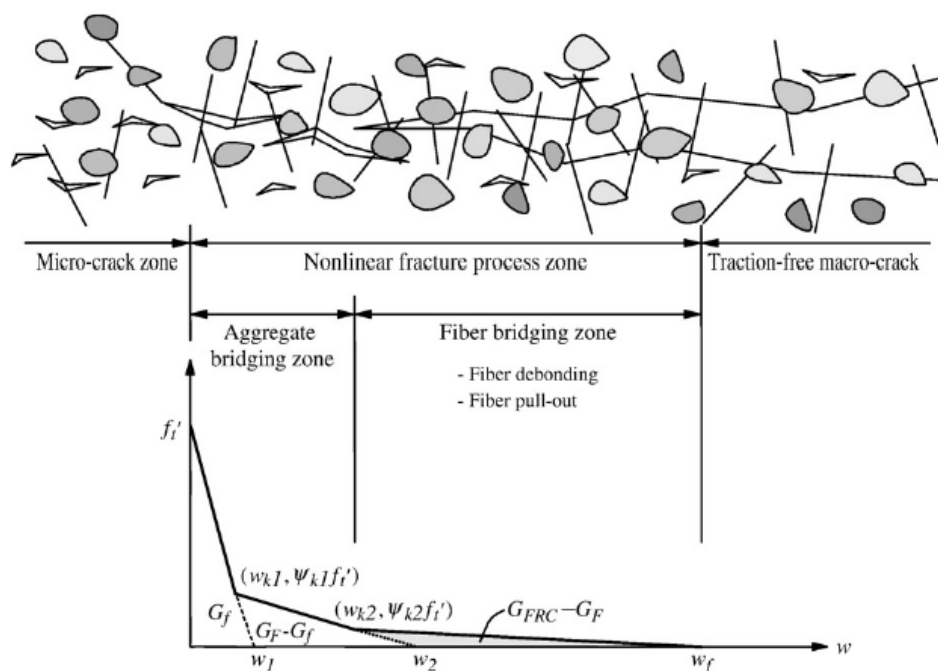
$$\omega_k = CTOD_c \quad (9)$$

که منجر به تعیین نسبت تنش (ψ) در نقطه شیب می‌شود [۳۰]:

در نرم‌افزار آباکوس تکامل رشد آسیب می‌تواند براساس تغییرمکان یا انرژی فراهم شود. در حالت رشد آسیب براساس تغییرمکان، تکامل رشد ترک می‌تواند به صورت خطی، نمایی و جدولی به نرم‌افزار اختصاص داده شود. برای نرم‌شدگی خطی و نمایی، جدایی شکست کامل موثر ($\overline{\delta}_f$) نسبت به جدایی بحرانی موثر ($\overline{\delta}_c$) و برای نرم‌شدگی جدولی، متغیر آسیب d به صورت مستقیم و به صورت تابعی از $\overline{\delta}_c - \Delta$ به نرم‌افزار اختصاص داده می‌شوند.

در مدل ناحیه چسبنده تنش اعمالی به سطوح ترک با افزایش بازشدگی ترک کاهش می‌یابد و به صورت ناگهانی به صفر افت نمی‌کند. به طور کلی روابط کشش-جدایی مدل ناحیه چسبنده می‌توانند به مدل‌های مبتنی بر انرژی و مدل‌های مبتنی بر غیرانرژی تقسیم‌بندی کرد [۲۷]. مدل‌های مبتنی بر انرژی از معیار پتانسیل انرژی چسبنده استفاده می‌کنند (برای مثال مقاله نیدلمن [۲۸] را ببینید). برای مدل‌های مبتنی بر غیرانرژی، مدل‌های کشش-جدایی با شکل‌های مختلف گسترش یافته‌اند، که برای مثال می‌توان از نرم‌شدگی خطی، دوزنقه‌ای، نرم‌شدگی دوخطی، نرم‌شدگی سه خطی و مدل‌های نمایی نام برد.

در مقاله حاضر همان‌طور که اشاره شد از روابط کشش-جدایی مقاله روسلر و همکارانش [۲۵] به صورت مدل نرم‌شدگی دو خطی



شکل ۳. مکانیزم شکست بتن مسلح الیافی و پارامترهای شکست براساس مدل نرم‌شدگی سه‌خطی [۲۵]

Fig. 3. Fiber reinforced concrete Fracture mechanisms and the experimental fracture parameter based softening model

انرژی شکست اولیه G_f ، انرژی شکست کل بتن معمولی G_F ، بازشدگی بحرانی نوک ترک ($CTOD_c$)، انرژی شکست کل FRC (G_{FRC}) و طول الیاف L_f تعیین می‌شود.

چهار پارامتر اول، نرم‌شدگی دوخطی بتن معمولی را تعریف می‌کنند و روابط آن مشابه قبل می‌باشد. عرض بازشدگی ترک نهایی (ω_p) که متناظر با متوسط طول بیرون کشیدگی برای توزیع تصادفی الیاف‌ها می‌باشد، می‌تواند به صورت یک چهارم تا یک دوم طول الیاف ($L_f/4$, $L_f/2$) تخمین زده شود [۳۲-۳۴]. موقعیت نقطه شکست دوم (ω_{k2} , $\psi_2 f_t'$) از انرژی شکست اضافی ($G_{FRC} - G_F$) ناشی از حضور الیاف‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\psi_2 = \frac{2(G_{FRC} - G_F)}{f_t'(\omega_f - \omega_2)} \quad (12)$$

$$\omega_{k2} = \omega_2 - \frac{\psi_2}{\psi_1}(\omega_2 - \omega_{k1}) \quad (13)$$

در مقاله حاضر با در نظر گرفتن این روابط برای رشد ترک در ناحیه فرایند برای نمونه‌های بتنی و با مدلسازی عددی نمونه آزمایش

$$\psi = 1 - \frac{CTOD_c f_t'}{2G_f} \quad (10)$$

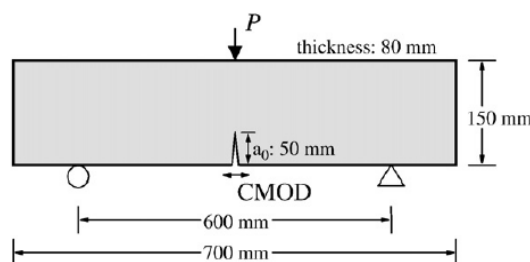
عرض نهایی بازشو ترک به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$\omega_f = \frac{2}{\psi f_t'} [G_F - (1 - \psi)G_f] \quad (11)$$

مکانیزم شکست FRC به علت گنجاندن الیاف از بتن معمولی متفاوت می‌باشد و باعث افزایش اندازه ناحیه فرآیند شکست می‌شود [۲۹]. ناحیه فرآیند شکست غیر خطی بتن FRC شامل ریز ترک‌ها، سنگدانه‌های به هم چسبیده، عدم پیوند الیاف با ملات و بیرون کشیدن الیاف می‌باشد [۲۹ و ۳۱]. با گنجاندن الیاف‌ها در بتن معمولی، انرژی اضافی برای عدم پیوند الیاف با ملات و بیرون کشیدن الیاف موردنیاز می‌شود. انرژی اضافی با اختلاف بین انرژی شکست کل بتن معمولی و انرژی شکست کل بتن FRC متناظر می‌باشد که در مدل نرم‌شدگی سه خطی شکل ۳ به صورت ناحیه سایه خورده می‌باشد [۲۵]. مدل نرم‌شدگی پیشنهادی توسط روسلر و همکارانش [۲۵] به وسیله ۶ پارامتر شکست آزمایشگاهی، مقاومت کششی f_t'

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی و شکست بتن معمولی و بتن مسلح الیافی
Table 1. mechanical and fracture parameters of plain concrete and fiber reinforced concrete

CTODc [mm]	G_F or G_{FRC} [N.m/m ²]	G_f [N.m/m ²]	f_t [MPa]	ν	E [GPa]	مواد
0/016	120	38/3	3/44	0/2	27/2	بتن معمولی
0/016	3531	37/1	4/22	0/2	26/5	بتن مسلح الیافی



شکل ۴. هندسه تیر در نمونه‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای [۲۵]
Fig. 4. The geometry of the beam in the three-point bending test

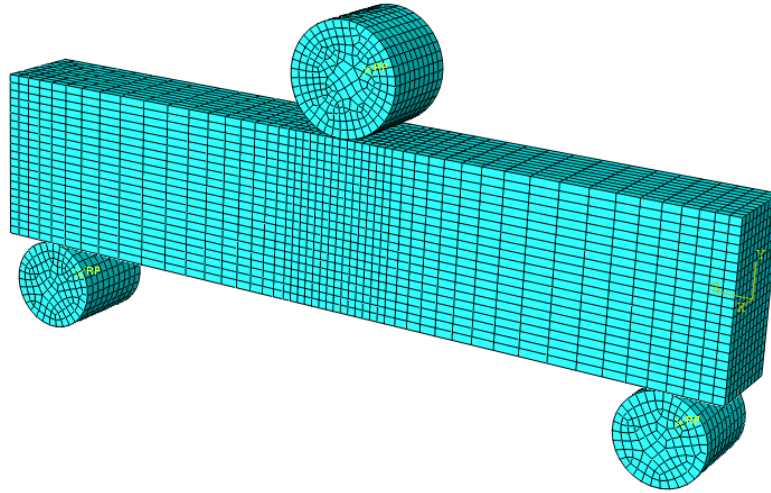
مکعبی هشت گرهی تعریف شده است. ترک اولیه از المان صفحه‌ای می‌باشد و به صورت یک ترک XFEM در یک روش آنالیز استاتیکی به نرم‌افزار معرفی شده است. مدل نرم‌افزاری نهایی از نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است. شرایط مرزی در مرکز استوانه‌های صلب نشان داده شده در شکل ۵ به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده و اتصال استوانه‌ها با تیر بتنی به صورت اصطکاکی لحاظ گردیده است. بارگذاری کنترل شده تغییر مکانی به مرکز تیر از طریق استوانه میانی اعمال شده است.

همان‌طور که ذکر شد، روابط کشش-جدایی مدل ناحیه چسبنده برای رشد ترک به کار گرفته شده است. در نرم‌افزار آباکوس از معیار حداکثر تنش اصلی برای شروع رشد ترک و از معیار تغییر مکانی (بازشدگی ترک) برای تکامل رشد ترک استفاده شده است. معرفی روابط کشش-جدایی دو خطی و سه خطی به ترتیب برای بتن معمولی و بتن مسلح الیافی به منظور تکامل رشد ترک به وسیله نرم‌شدگی جدولی در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده است و همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، در این حالت متغیر آسیب d به

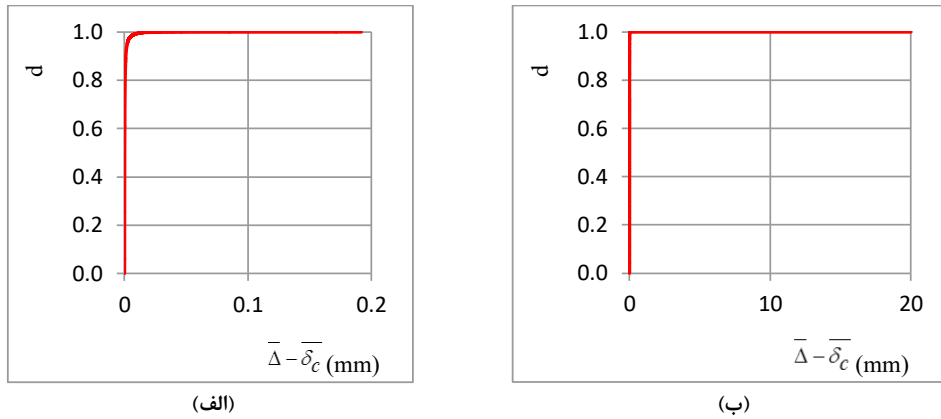
خمش سه نقطه‌ای مقاله [۲۵] برای بتن معمولی و مسلح الیافی به صورت جداگانه، صحت‌سنجی به وسیله منحنی بار در برابر بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) صورت گرفته است. پارامترهای مکانیکی و شکست حاصل از آزمایش‌ها [۲۵] در جدول ۱ خلاصه شده است. در بتن مسلح الیافی از الیاف فولادی با درصد حجمی ۰/۷۸ درصد، طول ۴۰ میلی‌متر و با مقطع مستطیلی ۱/۵×۱۰۵/۱۰ (نسبت ابعادی ۹۰) استفاده شده است.

نمونه‌های با ضخامت کامل بتن معمولی و بتن مسلح الیافی جهت این امر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هندسه تیر در نمونه‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای روسلر و همکارانش [۲۵] در شکل ۴ نشان داده شده است.

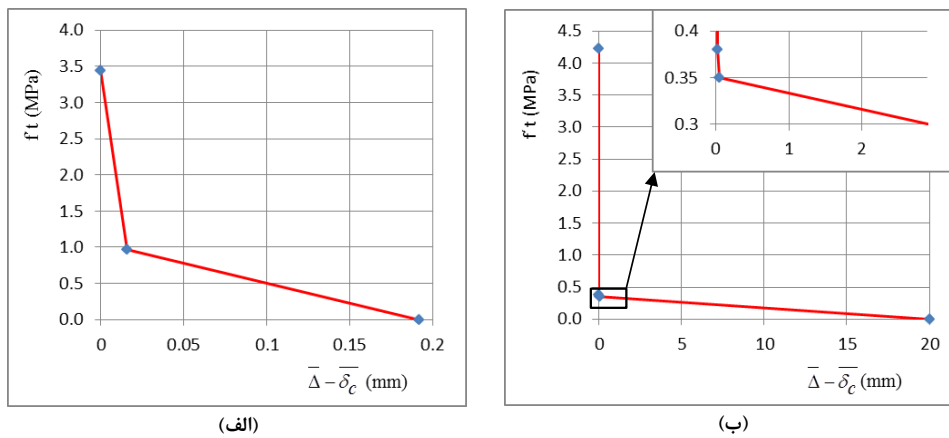
مدلسازی آزمایش خمش سه نقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس به گونه‌ای صورت گرفته که مشابه نمونه‌های آزمایش باشد. این امر با اتخاذ مدل سه بعدی برای نمونه‌های مورد بررسی و همچنین در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب حاصل شده است. مدلسازی تیر و تکیه‌گاه‌ها در نرم‌افزار آباکوس، با استفاده از المان‌های سه بعدی سالیید



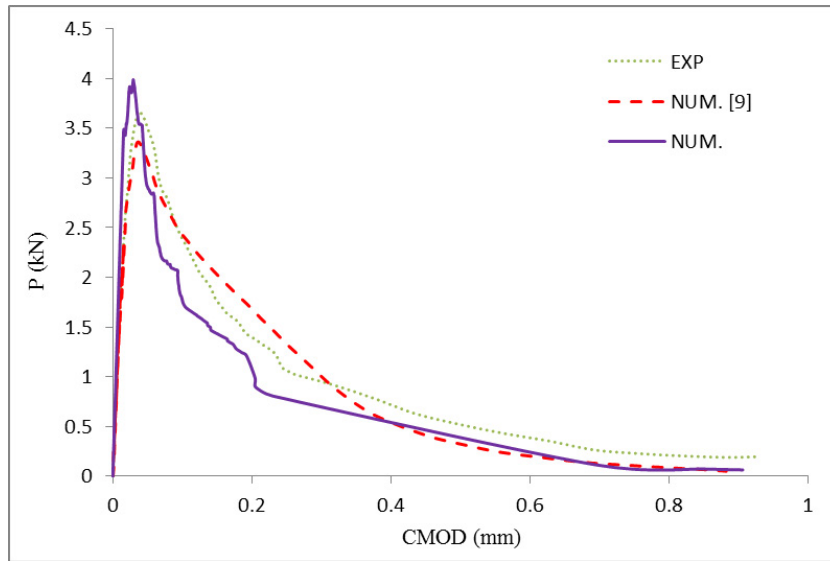
شکل ۵. مدل نرم‌افزاری نهایی از نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای
 Fig. 5. Software model of three-point bending test



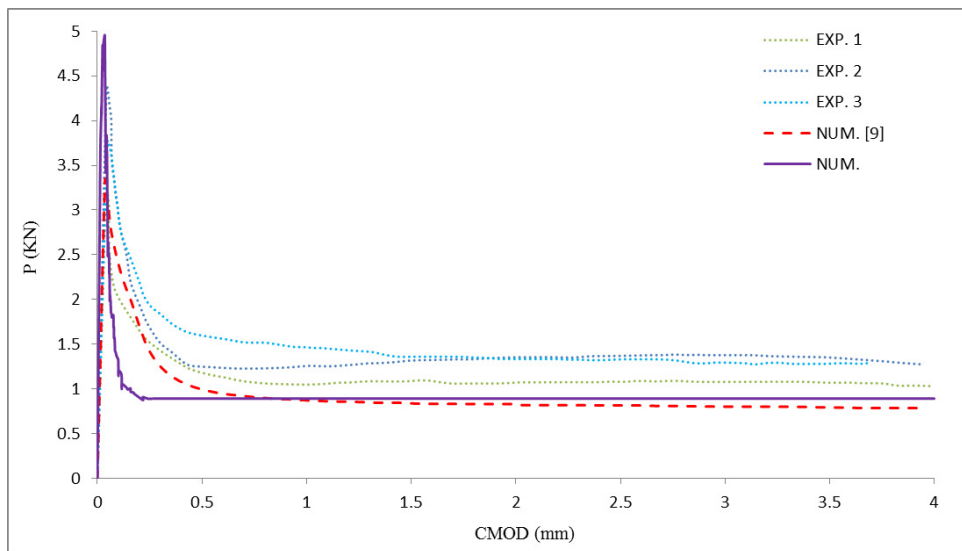
شکل ۶. منحنی متغیر آسیب d در برابر $\overline{\Delta - \delta_c}$ (الف) بتن معمولی (ب) بتن مسلح الیافی
 Fig. 6. damage variable (d) versus $\overline{\Delta - \delta_c}$ curves (a) plain concrete (b) fiber reinforced concrete



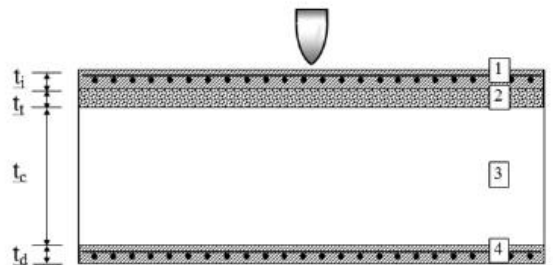
شکل ۷. منحنی نرم‌شدگی روابط کشش-جدایی (الف) بتن معمولی (ب) بتن مسلح الیافی
 Fig. 7. Curves of traction-separation relationship (a) plain concrete (b) fiber reinforced concrete



شکل ۸. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) برای بتن معمولی
 Fig. 8. Comparison results of load versus load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for plain concrete



شکل ۹. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) برای بتن مسلح الیافی
 Fig. 9. Comparison results of load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for fiber reinforced concrete



شکل ۱۰. مقطع عمومی پانل سیمانی لایه‌ای تابعی پیشنهادی توسط کوئک و همکارانش [۲۲]
 Fig. 10. Typical section of functionally graded cementitious panel [22]

جدول ۲. نمونه‌های مصالح سیمانی مختلف مورد بررسی در این تحقیق
Table 2. Summary of studied cementitious specimens

علامت مشخصه نمونه	توضیحات	
Plain	بتن معمولی کامل	
FRC	بتن مسلح الیافی کامل	
Tough agg.	بتن با سنگدانه‌های سفت کامل	
FG-1:1:7:1	نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد	
FG-2:1:6:1	افزایش ضخامت لایه بتن مسلح الیافی در وجه اصابت گلوله در نمونه لایه‌ای تابعی	
FG-1:1:1:6:1	افزودن لایه بتن مسلح الیافی زیر لایه بتن با سنگدانه‌های سفت	
FG-1:2:6:1	افزایش ضخامت لایه بتن با سنگدانه‌های سفت در نمونه لایه‌ای تابعی	

عمده ضخامت از بتن معمولی رایج تشکیل شده است.

در مقاله حاضر، با در نظر گرفتن الگوی هندسی پیشنهادی توسط کوئک و همکارانش به صورت یک ماده لایه‌ای تابعی سیمانی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه گلوله، رفتار مکانیک شکست آن به صورت مدلسازی آزمایش خمش سه نقطه‌ای در حضور ترک اولیه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر می‌باشد که در این تحقیق، کاربرد میلگرد در لایه‌های بتن مسلح الیافی در نظر گرفته نشده است.

نام‌گذاری هر پانل لایه‌ای تابعی با استفاده از مجموعه‌ای از شماره‌های متناظر با ده درصد ضخامت کل نمونه برای هر لایه صورت گرفته است. برای مثال اولین شماره "۲" در FG-2:1:6:1 به معنی ضخامت ۳۰ میلی‌متر لایه اول برای ضخامت کل نمونه برابر ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. الگوی هندسی برای نمونه لایه‌ای تابعی به صورت FG-1:1:7:1 که توسط کوئک و همکارانش در برابر بارگذاری ضربه گلوله پیشنهاد شد، به عنوان الگوی استاندارد در این تحقیق انتخاب شده است. همچنین به منظور تاثیر بتن مسلح الیافی روی کنترل رشد ترک، الگوهای FG-2:1:6:1 و FG-1:1:1:6:1 مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و تاثیر ضخامت لایه بتن با سنگدانه‌های سفت به وسیله الگوی FG-1:2:6:1 تحقیق شده است. نمونه‌های مصالح سیمانی مختلفی که به منظور بررسی رفتار مکانیک شکست مورد

صورت تابعی از $\bar{\Delta} - \bar{\delta}_c$ به نرم‌افزار اختصاص داده می‌شود. در شکل ۶ منحنی متغیر آسیب d در برابر $\bar{\Delta} - \bar{\delta}_c$ برای بتن معمولی و بتن مسلح الیافی که به نرم‌افزار معرفی شده، نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که برای محاسبه روابط کشش-جدایی بتن مسلح الیافی، عرض بازشدگی ترک نهایی (w_f) برابر یک دوم طول الیاف در نظر گرفته شده است. منحنی نرم‌شدگی روابط کشش-جدایی برای بتن معمولی و بتن مسلح الیافی در شکل ۷ نشان داده شده است.

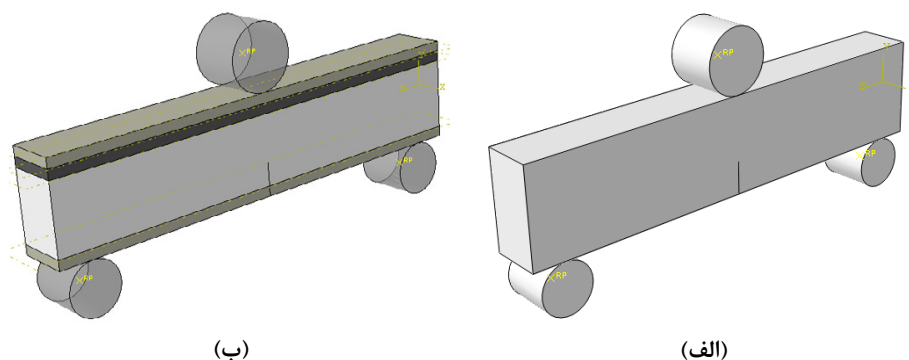
نتایج صحت‌سنجی از شبیه‌سازی‌های المان محدود با استفاده از مدل رفتاری روابط کشش-جدایی برای بتن معمولی و بتن مسلح الیافی در مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی روسلر و همکارانش [۲۵] به وسیله منحنی‌های بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، نتایج نشان‌دهنده سازگاری مناسب پاسخ‌های شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر با پاسخ‌های روسلر و همکارانش [۲۵] می‌باشد.

۳- طرح مسئله

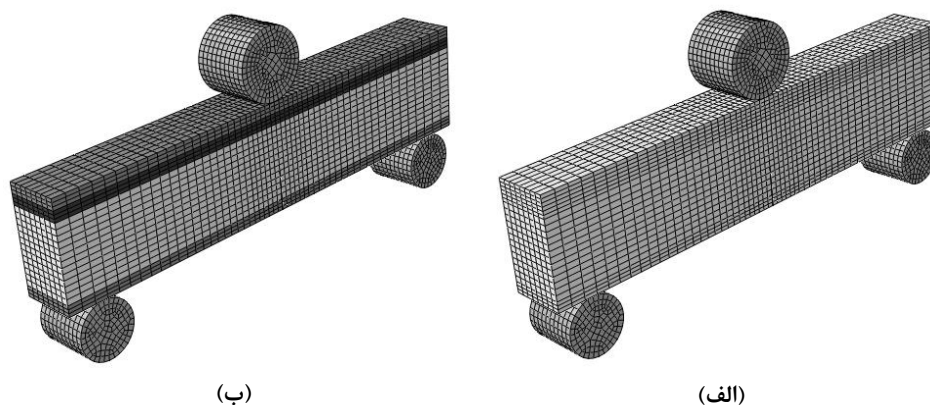
مصالح لایه‌ای تابعی همان‌طور که بیان شد، ضمن تامین عملکرد مناسب با توجه به نیاز سازه، کاهش هزینه‌ها را نیز در پی دارند. در این تحقیق با هدف در نظر گرفتن ملاحظات پدافندی، الگوی هندسی انتخابی برای مقطع مصالح لایه‌ای تابعی سیمانی با توجه به مقاومت در برابر بارگذاری ضربه گلوله حاصل از مطالعات آزمایشگاهی پیشین، اختیار گردیده است. کوئک و همکارانش [۲۲] با توجه به ویژگی‌های مکانیکی بتن در برابر مقاومت ضربه‌ای، پانل سیمانی لایه‌ای تابعی نشان داده شده در شکل ۱۰ را پیشنهاد دادند. وجه‌های در برابر ضربه و پستی (لایه‌های ۱ و ۴) از پانل موردنظر با مصالح مسلح با الیاف و میلگرد ساخته شده است. هدف از استفاده از این مصالح در دو وجه سطحی، بهبود ویژگی‌های کششی در سطح آزاد پانل به منظور غلبه بر تنش‌های کششی ایجاد شده ناشی از انعکاس موج‌های تنش فشاری ضربه گلوله می‌باشد. لایه دوم در سمتی که در معرض اصابت گلوله قرار دارد از بتن با سنگدانه‌های سفت و با اندازه مناسب می‌باشد. این لایه بخش قابل توجهی از انرژی جنبشی گلوله را جذب می‌کند و مقاومت در برابر نفوذ گلوله را بهبود می‌بخشد. به منظور کاهش هزینه ساخت این عضو سیمانی لایه‌ای تابعی، هسته عضو با

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی و شکست بتن معمولی و بتن مسلح الیافی و بتن با سنگدانه‌های سفت
Table 3. mechanical and fracture parameters of plain concrete, fiber reinforced concrete and tough aggregate concrete

CTODc [mm]	GF or GFRC [N.m/m ²]	Gf [N.m/m ²]	f _t [MPa]	ν	E [GPa]	مواد
0/02	120	40	2/46	0/2	32/72	بتن معمولی
0/02	2100	40	2/58	0/2	19/83	بتن مسلح الیافی
0/02	160	40	3/19	0/2	40/42	بتن با سنگدانه‌های سفت



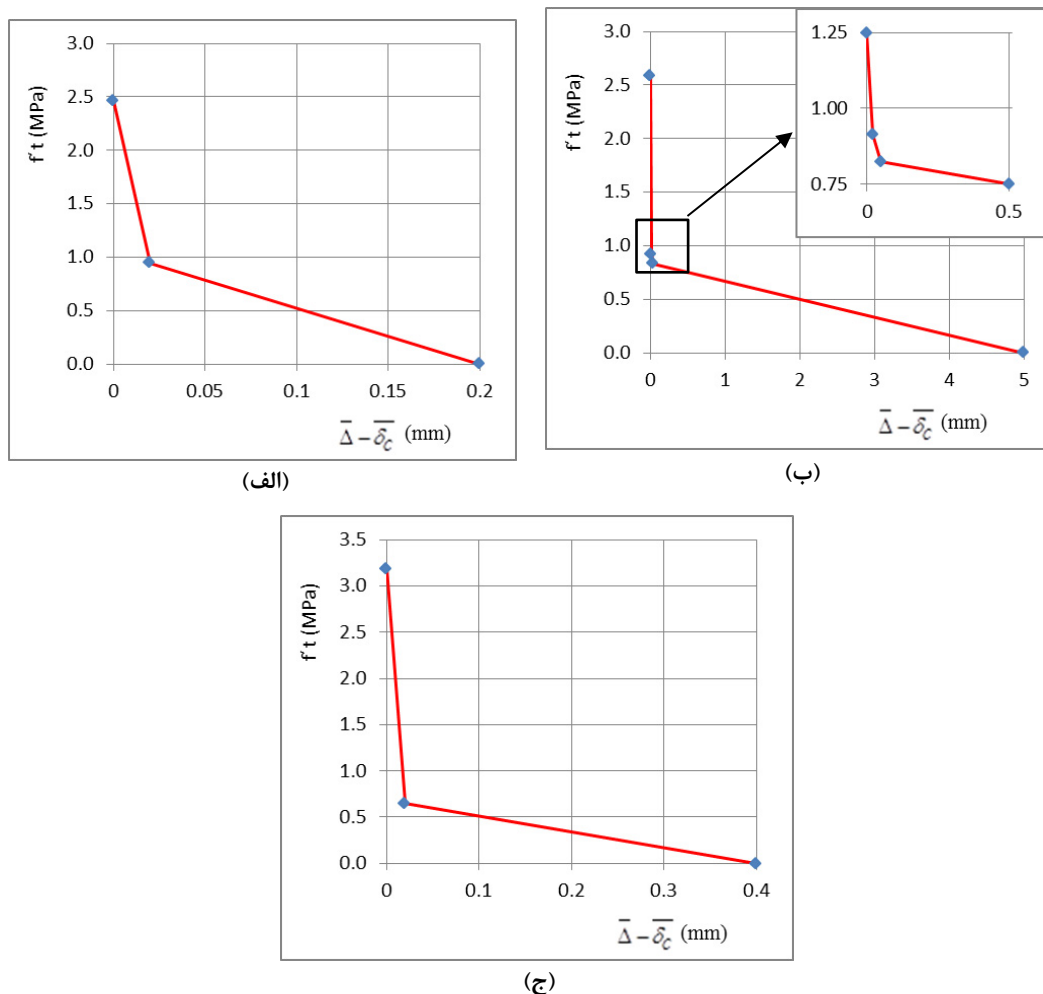
شکل ۱۱. نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای در حضور ترک اولیه (الف) نمونه بتن معمولی (ب) نمونه بتن لایه‌ای تابعی استاندارد
Fig. 11. Simulation of three-point bending test in the presence of initial cracks (a) plain concrete (b) standard FG-cementitious



شکل ۱۲. مش بندی مدل‌های سه بعدی المان محدود (الف) نمونه بتن معمولی (ب) نمونه بتن لایه‌ای تابعی استاندارد
Fig. 12. Mesh for 3D finite element models (a) plain concrete (b) standard FG-cementitious

و نیز مطالعات پیشین، اتخاذ شده است. ابعاد هندسی نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای که در مدلسازی عددی این بخش مورد استفاده قرار گرفته، مشابه نمونه مطالعه شده توسط روسلر و همکارانش شکل ۴ می‌باشد.

استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۲ خلاصه شده است. مشخصات مکانیکی و شکست برای سه نمونه بتن معمولی، مسلح الیافی و سنگدانه‌های سفت به صورت جدول ۳ فرض شده است. این موارد با توجه به مشخصات ارائه شده توسط کوئک و همکارانش [۲۲]



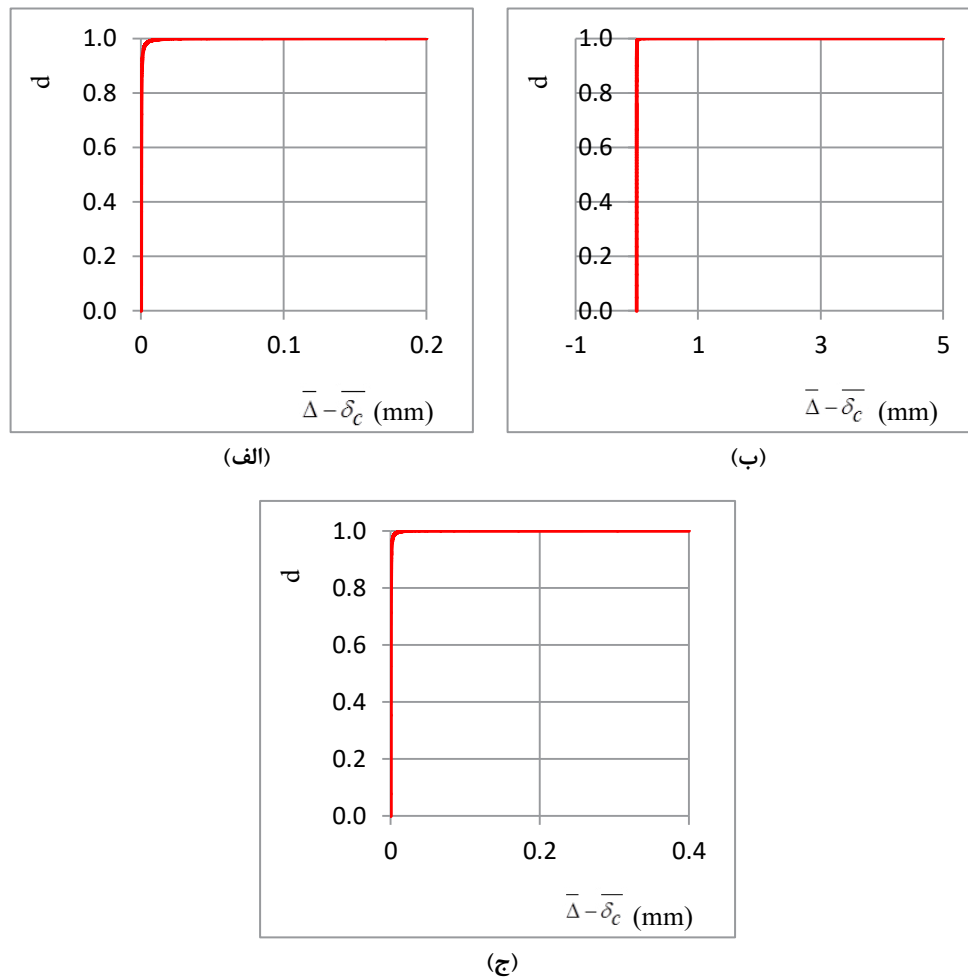
شکل ۱۳. منحنی نرم‌شدگی روابط کشش-جدایی (الف) بتن معمولی (ب) بتن مسلح الیافی (ج) بتن با سنگدانه‌های سفت
Fig. 13. Curves of traction-separation relationship (a) plain concrete (b) fiber reinforced concrete (c) tough aggregate concrete

اشاره شده در بخش اعتبارسنجی می‌باشد. مش‌بندی مدل‌های سه بعدی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس برای دو نمونه بتن معمولی و بتن لایه‌ای تابعی استاندارد در حضور ترک اولیه در شکل ۱۲ نشان داده شده که در همه نمونه‌ها یکسان و تابع نمونه‌های لایه‌ای تابعی بوده است.

همان‌طور که اشاره شد، از روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) برای آنالیز رشد ترک استفاده و شروع و گسترش ترک با استفاده از روابط کشش-جدایی حاصل از مدل ناحیه چسبیده در نرم‌افزار آباکوس فراهم شده است. در شکل ۱۳ نرم‌شدگی تنش کششی در برابر بازشدگی نوک ترک برای بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های سفت به صورت دو خطی و برای بتن مسلح الیافی به صورت سه خطی نمایش داده شده است.

به منظور مطالعه رفتار شکست نمونه‌های معرفی شده، از ترک اولیه در وجه پشتی اصابت گلوله استفاده شده است. در واقع با اعمال بار به وجه اصابت گلوله، تغییر شکل سازه به نحوی است که وجه پشتی در ابتدا تحت کشش و ترک قرار می‌گیرد. بنابراین ترک اولیه در وجه پشتی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که لایه بتن مسلح الیافی وجه پشتی در نمونه‌های لایه‌ای تابعی به منظور کنترل رشد ترک تحت بارگذاری آسیب ضربه گلوله می‌باشد، با در نظر گرفتن طول ترک ۵۰ میلی‌متری، تاثیر این لایه بررسی نشده و اثر لایه‌های دیگر مورد تحقیق قرار گرفته است. در شکل ۱۱ دو نمونه بتن معمولی و بتن لایه‌ای تابعی استاندارد در حضور ترک اولیه به عنوان نمونه نشان داده شده است.

مدلسازی نمونه‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای مشابه موارد



شکل ۱۴. منحنی متغیر آسیب d در برابر $\bar{\Delta} - \bar{\delta}_c$ (الف) بتن معمولی (ب) بتن مسلح الیافی (ج) بتن با سنگدانه‌های سفت

Fig. 14. damage variable (d) versus $\bar{\Delta} - \bar{\delta}_c$ curves (a) plain concrete (b) fiber reinforced concrete (c) tough aggregate concrete

حاصل از مدل آزمایش خمش سه نقطه‌ای مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۴-۱- مقایسه نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد با نمونه‌های با مقطع

همگن

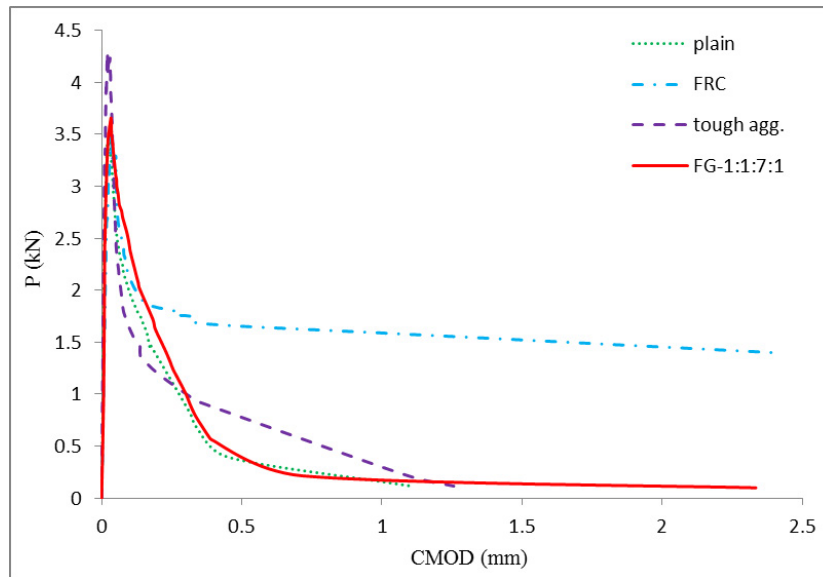
به منظور مقایسه رفتار شکست این چهار نمونه در مدلسازی آزمایش خمش سه نقطه‌ای از منحنی‌های نیرو-بازشدگی نوک ترک (P-CMOD) ارائه شده در شکل ۱۵ استفاده شده است. مقدار نیرو در نقطه اوج (حداکثر نیرو) در نمونه با سنگدانه‌های سفت بیشتر می‌باشد که دلیل این امر، زیاد بودن مقاومت کششی این نوع بتن جدول ۳ در مقایسه با نمونه‌های دیگر می‌باشد. از آنجایی که انتهای ترک اولیه در نمونه لایه‌ای تابعی در لایه بتن معمولی قرار دارد، رفتار تا نقطه

به منظور اختصاص این منحنی‌های نرم‌شدگی به نرم‌افزار آباکوس

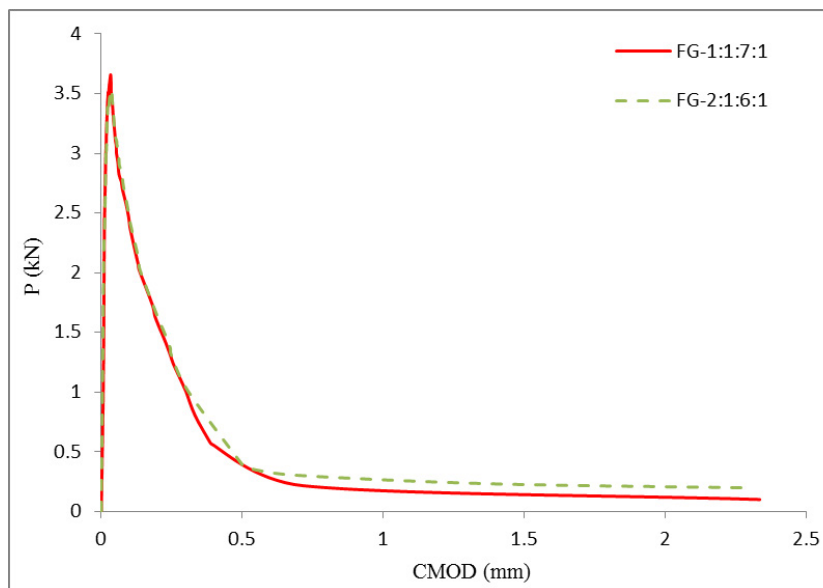
از نرم‌شدگی جدولی که در آن متغیر آسیب d به صورت تابعی از $\bar{\Delta} - \bar{\delta}_c$ در نظر گرفته می‌شود، استفاده شده است (شکل ۱۴).

۴- نتایج و بحث در مورد آن

در این بخش ابتدا نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد با نمونه‌های با مقطع همگن از بتن معمولی، بتن مسلح الیافی و بتن با سنگدانه‌های سفت مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه آن، اثر ضخامت دو لایه در وجه اعمال بار نمونه لایه‌ای تابعی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نتایج تاثیر افزودن یک لایه بتن مسلح بین لایه‌های بتن با سنگدانه‌های سفت و بتن معمولی در نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد ارائه شده است. نتایج در قالب منحنی‌های نیرو-بازشدگی نوک ترک



شکل ۱۵. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) در مقایسه نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد با نمونه‌های با مقطع همگن
Fig. 15. Comparison results of load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for standard FG-cementitious specimen compared with full depth specimens of PC, FRC and Tough agg

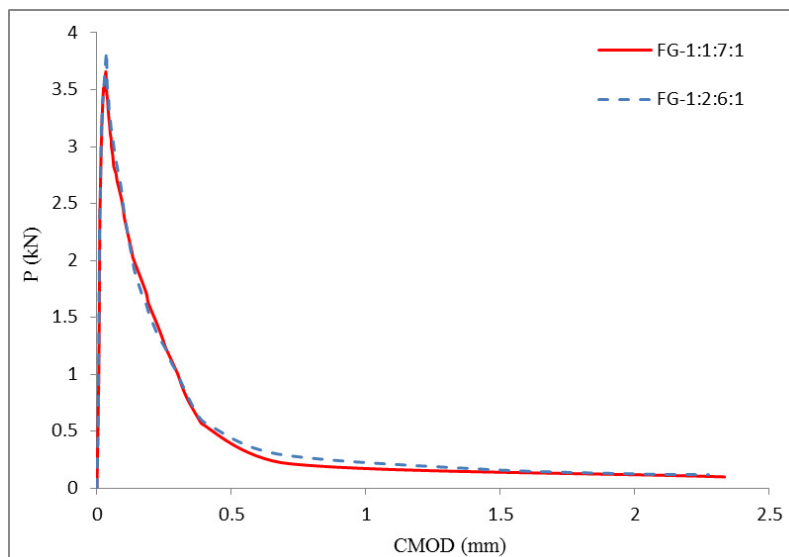


شکل ۱۶. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) در بررسی اثر افزایش ضخامت لایه بتن مسلح در وجه اعمال بار
Fig. 16. Comparison results of load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for FG-1:1:7:1 and FG-2:1:6:1

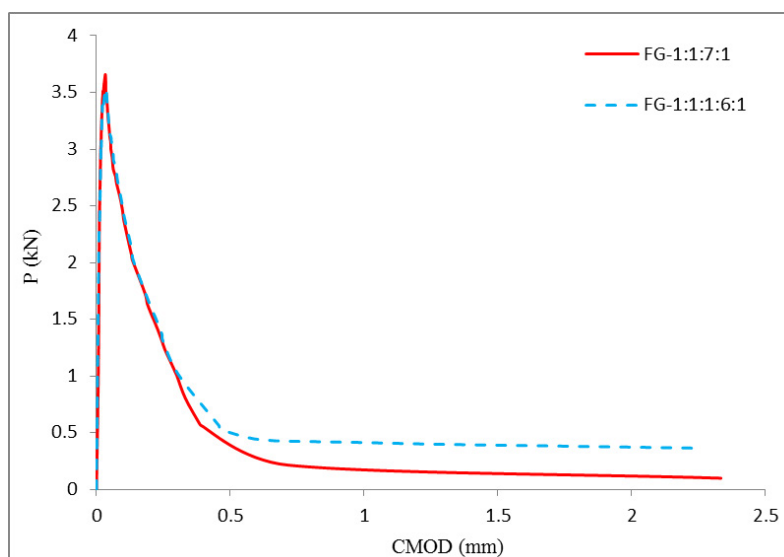
۱۵ قابل مشاهده است. این پل‌بندی الیاف‌ها، انرژی شکست لازم برای بیرون کشیدن الیاف‌ها از داخل بتن در طول بازشدگی ترک می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، در نمونه لایه‌ای تابعی، شیب نرم‌شدگی منحنی دارای دو شکست می‌باشد که ناشی از تغییر لایه می‌باشد و شیب هر قسمت از این منحنی‌های نرم‌شدگی در نمونه لایه‌ای تابعی وابسته به نوع مصالح استفاده شده در آن لایه و برابر

اوج این نمونه مشابه نمونه بتن معمولی می‌باشد. هم‌چنین به دلیل نزدیکی مقاومت کششی بتن الیافی و بتن معمولی، نقطه اوج بار در این دو نمونه نیز نزدیک به هم می‌باشد.

برای رفتار پس از نقطه اوج، نمونه بتن مسلح الیافی با توجه به دارا بودن انرژی شکست زیاد ناشی از پل‌بندی الیاف‌ها، رفتار به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد که به وضوح در شکل



شکل ۱۷. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) در بررسی اثر افزایش ضخامت لایه بتن با سنگدانه‌های سفت
 Fig. 17. Comparison results of load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for FG-1:1:7:1 and FG-1:2:6:1



شکل ۱۸. مقایسه نتایج منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) در بررسی اثر افزودن یک لایه بتن مسلح الیافی بین بتن با سنگدانه‌های سفت و بتن معمولی

Fig. 18. Comparison results of load versus crack mouth opening displacement (CMOD) curves for FG-1:1:7:1 and FG-1:1:1:6:1

اعمال بار با دو برابر کردن ضخامت آن مورد بررسی قرار گرفته است. این نمونه لایه‌ای تابعی به صورت FG-2:1:6:1 نشان داده شده و با نمونه لایه تابعی استاندارد FG-1:1:7:1 مقایسه شده است. مقایسه رفتار دو نمونه لایه‌ای تابعی FG-1:1:7:1 و FG-2:1:6:1 نیز به وسیله منحنی بار-بازشدگی نوک ترک (P-CMOD) حاصل از مدل عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای صورت گرفته که در شکل ۱۶ ارائه شده است. از آنجایی که در این دو نمونه، انتهای نوک ترک اولیه در لایه

نمونه‌های همگن می‌باشد. تاثیر انرژی شکست زیاد ناشی از پل‌بندی الیافها در لایه انتهایی نمونه لایه‌ای تابعی نسبت به نمونه‌های همگن بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های سفت که باعث جلوگیری از شکست ناگهانی نمونه می‌شود، به وضوح در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد.

۲-۴- اثر افزایش ضخامت لایه بتن مسلح در وجه اعمال بار
 در این بخش، تاثیر افزایش ضخامت لایه بتن مسلح الیافی در وجه

شده است. مقایسه دو نمونه FG-1:1:1:6:1 و FG-1:1:1:7:1 نیز به وسیله منحنی بار-بازشدگی نوک ترک (P-CMOD) مدل آزمایش خمش سه نقطه‌ای صورت گرفته که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، در رفتار قبل از نقطه اوج بار و در محدوده شیب تند نرم‌شدگی، دو منحنی با توجه به مشخصات یکسان مصالح دارای رفتار یکسانی می‌باشند. در محدوده شیب کم منحنی نرم‌شدگی، نمونه FG-1:1:1:6:1 عملکرد به مراتب بهتری را از نمونه FG-1:1:1:7:1 نشان می‌دهد. مقدار نیرو در بازشدگی نوک ترک به اندازه ۱/۵ میلی‌متر در نمونه FG-1:1:1:6:1 برابر ۰/۴ کیلونیوتن می‌باشد که نسبت به نمونه FG-1:1:1:7:1 در حدود ۶۰ درصد افزایش یافته است. همچنین نمونه FG-1:1:1:6:1 نسبت به نمونه FG-2:1:6:1 با کاربرد حجم یکسان مصالح، کارایی بهتری از خود نشان داده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انتخاب الگوی هندسی مناسب برای مصالح لایه‌ای تابعی سیمانی مقاوم در برابر بارگذاری ضربه، آنالیز رفتار شکست و در نهایت ارزیابی رفتار رشد ترک نمونه‌های لایه‌ای تابعی موردنظر در قالب مدل عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای و مقایسه آن با نمونه‌های همگن بتنی و تاثیر هر یک از لایه‌های آن بر رفتار شکست نمونه با استفاده از منحنی‌های بار-بازشدگی دهانه ترک (P-CMOD) فراهم گردید. در زیر نتیجه‌گیری حاصل از نتایج تحقیق ارائه شده است:

۱- در منحنی‌های بار-بازشدگی نوک ترک حاصل از مدلسازی عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای، مقدار نیرو در نقطه اوج (ماکزیمم نیرو) وابسته به موقعیت انتهای ترک اولیه در نمونه و در واقع ویژگی مقاومت کششی ماده بتنی که انتهای ترک در آن واقع شده است، می‌باشد.

۲- نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد بر خلاف نمونه‌های بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های همگن به دلیل وجود لایه بتن مسلح الیافی در وجه انتهایی اصابت بار، دچار شکست ناگهانی نشد.

۳- نمونه بتن مسلح الیافی همگن، رفتار شکست به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر از خود نشان داد، ولی استفاده از این نمونه هزینه قابل ملاحظه‌ای را در بر دارد.

بتن معمولی می‌باشد، رفتار تا نقطه اوج بار در هر دو نمونه یکسان می‌باشد. در محدوده نرم‌شدگی نیز ابتدا دو منحنی بر هم منطبق می‌باشند، اما در محدوده‌ای که شیب منحنی نرم‌شدگی کاهش می‌یابد، به دلیل زیاد بودن ضخامت لایه بتن مسلح الیافی در نمونه FG-2:1:6:1، قسمت انتهایی منحنی نرم‌شدگی بالاتر از نمونه FG-1:1:7:1 قرار دارد. در مقدار بازشدگی نوک ترک برابر ۱/۵ میلی‌متر، مقدار نیرو در دو نمونه FG-2:1:6:1 و FG-1:1:7:1 به ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۰/۲۳ کیلونیوتن می‌باشد که نشان‌دهنده این است که با دو برابر کردن ضخامت لایه بتن مسلح الیافی در نمونه‌های موردی مورد مطالعه، نیروی موردنیاز برای بازشدگی ترک به اندازه ۱/۵ میلی‌متر، در حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است.

۴-۳- اثر افزایش ضخامت لایه بتن با سنگدانه‌های سفت

در این بخش، نمونه‌های FG-1:1:7:1 و FG-1:2:6:1 به وسیله مدلسازی آزمایش خمش سه نقطه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در واقع تاثیر افزایش ضخامت لایه بتن با سنگدانه‌های سفت بررسی شده است. در شکل ۱۷ منحنی بار-بازشدگی نوک ترک (P-CMOD) برای دو نمونه مورد مقایسه ارائه شده است. در محدوده قبل از نقطه اوج بار، عملکرد دو نمونه یکی می‌باشد. در محدوده نرم‌شدگی (پس از نقطه اوج بار)، دو منحنی ابتدا بر هم منطبق می‌باشند، سپس تا حدودی منحنی نرم‌شدگی در نمونه FG-1:2:6:1 بالاتر می‌باشد و در نهایت دو منحنی باز بر هم منطبق شده‌اند. این طور به نظر می‌رسد که لایه بتن با سنگدانه‌های سفت بر رفتار شکست نهایی نمونه تاثیر چندانی ندارد که با توجه به نوع کاربرد آن در این نمونه‌های لایه‌ای تابعی، مورد انتظار بوده است.

۴-۴- اثر افزودن یک لایه بتن مسلح الیافی بین بتن با سنگدانه‌های

سفت و بتن معمولی

با توجه به نتایجی که در بخش‌های قبل حاصل گردید و مورد انتظار نیز بود، لایه بتن مسلح الیافی تاثیر بسیار مثبتی بر رفتار شکست نمونه‌های بتنی دارد. به همین دلیل در این بخش، یک لایه بتن مسلح الیافی با ضخامت ۱۵ میلی‌متر بین لایه‌های بتن با سنگدانه‌های سفت و بتن معمولی به نمونه لایه‌ای تابعی افزوده شده و رفتار شکست آن در مقایسه با نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد بررسی

of fracture mechanics and finite elements, Cement and concrete research, 6(6) (1976) 773-781.

- [8] S.A. Ashour, G.S. Hasanain, F.F. Wafa, Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams, Structural Journal, 89(2) (1992) 176-184.
- [9] S.P. Shah, Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrix?, Materials Journal, 88(6) (1992) 595-602.
- [10] V.C. Li, M. Maalej, Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites, Cement and Concrete Composites, 18(4) (1996) 239-249.
- [11] C.-F.M. Code, 90,(1993) Bulletin d'Information N 213/214, Final version printed by Th, Telford, London,(1993, 460.
- [12] P.-E. Petersson, Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, (1981).
- [13] K. Gylltoft, Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures, Luleå tekniska universitet, 1983.
- [14] P. Nanakorn, H. Horii, S. Matsuoka, A fracture mechanics-based design method for SFRC tunnel linings, Doboku Gakkai Ronbunshu, 1996(532) (1996) 221-233.
- [15] Y. Kitsutaka, Fracture parameters by polylinear tension-softening analysis, Journal of Engineering Mechanics, 123(5) (1997) 444-450.
- [16] H. Stang, Evaluation of properties of cementitious fiber composite materials, in: High performance fiber reinforced cement composites, E & FN Spon London, 1992, pp. 388-406.
- [17] H.W. Reinhardt, Fracture mechanics of an elastic softening material like concrete, HERON, 29 (2), 1984, (1984).
- [18] H. Cornelissen, D. Hordijk, H. Reinhardt, Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight, Heron, 31(2) (1986) 45-46.
- [19] G.I. Barenblatt, The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 23(3) (1959) 622-636.

۴- با دو برابر کردن ضخامت لایه انتهایی بتن مسلح الیافی در وجه اصابت گلوله بار، عملکرد نمونه لایه‌ای تابعی بهبود یافت، به طوری که برای بازشدگی نوک ترک به اندازه ۱/۵ میلی‌متر در مدل آزمایش خمش سه نقطه‌ای، مقدار نیروی موردنیاز در حدود ۳۰ درصد افزایش نشان داد.

۵- لایه بتن با سنگدانه‌های سفت همان‌طور که مورد انتظار بود، با توجه به انرژی شکست نه چندان زیاد آن نسبت به بتن معمولی، با وجود دو برابر شدن ضخامت آن، تاثیر چندانی بر رفتار شکست نهایی نمونه نداشت.

۶- با افزودن یک لایه بتن مسلح الیافی بین لایه‌های بتن با سنگدانه‌های سفت و بتن معمولی در نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد، بهبود قابل توجهی در رفتار شکست نمونه حاصل گردید، به طوری که برای بازشدگی نوک ترک برابر ۱/۵ میلی‌متر در مدل عددی آزمایش خمش سه نقطه‌ای، مقدار نیروی موردنیاز در حدود ۶۰ درصد نسبت به نمونه لایه‌ای تابعی استاندارد افزایش نشان داد.

مراجع

- [1] A. Neubrand, Functionally graded materials, (2001).
- [2] S. Mojiri, Numerical analysis of cohesive crack growth using extended finite element method (X-FEM), Master of Science Thesis. Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, France, (2010).
- [3] Y. Mohammadi, S. Kaushik, Investigation of mechanical properties of steel fibre reinforced concrete with mixed aspect ratio of fibres, Journal of ferrocement, 33(1) (2003) 1-14.
- [4] K.B. Broberg, Cracks and fracture, Elsevier, 1999.
- [5] A.A. Griffith, VI. The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221(582-593) (1921) 163-198.
- [6] D. Motamedi, Nonlinear XFEM modeling of delamination in fiber reinforced composites considering uncertain fracture properties and effect of fiber bridging, University of British Columbia, 2013.
- [7] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means

- of cohesive traction-separation relationships in ABAQUS: A comparative study, *Mechanics Research Communications*, 78 (2016) 71-78.
- [28] A. Needleman, A continuum model for void nucleation by inclusion debonding, (1987).
- [29] J.G. Van Mier, *Fracture processes of concrete*, CRC press, 2017.
- [30] K. Park, G.H. Paulino, J.R. Roesler, Determination of the kink point in the bilinear softening model for concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(13) (2008) 3806-3818.
- [31] S.P. Shah, S.E. Swartz, C. Ouyang, *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*, John Wiley & Sons, 1995.
- [32] T.-S. Lok, J.-S. Pei, Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 10(2) (1998) 86-97.
- [33] S.-Y. Fu, B. Lauke, Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers, *Composites Science and Technology*, 56(10) (1996) 1179-1190.
- [34] V.S. Gopalratnam, S.P. Shah, Tensile failure of steel fiber-reinforced mortar, *Journal of Engineering Mechanics*, 113(5) (1987) 635-652.
- [20] G.I. Barenblatt, The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in applied mechanics*, 7(1) (1962) 55-129.
- [21] D.S. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2) (1960) 100-104.
- [22] S. Quek, V. Lin, M. Maalej, Development of functionally-graded cementitious panel against high-velocity small projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, 37(8) (2010) 928-941.
- [23] J.H. Song, P.M. Areias, T. Belytschko, A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67(6) (2006) 868-893.
- [24] G. Abaqus, *Abaqus 6.11*, Dassault Systemes Simulia Corp Providence, RI, USA, (2011).
- [25] J. Roesler, G. Paulino, C. Gaedicke, A. Bordelon, K. Park, Fracture behavior of functionally graded concrete materials for rigid pavements, *Transportation Research Record*, 2037(1) (2007) 40-49.
- [26] P.P. Camanho, C.G. Davila, M. De Moura, Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials, *Journal of composite materials*, 37(16) (2003) 1415-1438.
- [27] K. Park, H. Choi, G.H. Paulino, Assessment

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Peyman, P. Heydari, Investigation of crack propagation behavior of impact-resistant functionally graded concrete, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(6) (2020) 1111-1128.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14226.5618](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14226.5618)



