

## مطالعه تاثیر الیاف فولادی جایگزین شده با خاموت بر رفتار خمشی تیرهای بتن الیافی

سعید نقاشی<sup>۱</sup>، مسعود فرزام\*<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، واحد علوم تحقیقات آذربایجان شرقی، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران سازه- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تبریز

Email: saeednaggashi@gmail.com

mafazam@tabrizu.ac.ir

کد موضوع مقاله: 137 A

### چکیده

بتن ماده ای ترد است که تحت فشار عملکرد خوبی دارد، اما در کشش ضعیف عمل می کند. در بتن مسلح، کرنش گسیختگی کششی بتن بسیار کوچکتر از کرنش تسلیم میلگردها بوده و به همین دلیل پیش از انتقال باری قابل توجه به میلگردها، بتن دچار ترک خوردگی می گردد. مطالعات عددی بر روی تیرهای بتن الیافی با خمش چهار نقطه ای، با استفاده از نرم افزار المان محدود ATENA 3D که ویژه شبیه سازی عددی رفتار سازه های بتن آرمه به صورت سه بعدی است، صورت گرفت. در این تحقیق ابتدا نتایج مدل عددی تیر بتنی الیافی با نتایج داده های آزمایشگاهی صحت سنجی شده و در ادامه تاثیر الیاف فولادی جایگزین شده با میلگرد برشی مورد بررسی قرار گرفت. در هر قسمت نتایج مربوطه ارائه می گردد. نتایج حاصل از نمونه تیر مدل شده با استفاده از الیاف فولادی و مقایسه آن با تیرهای بتنی بدون الیاف نشان داد که، با جایگزینی الیاف فولادی به جای خاموت مقاومت خمشی تیر کاهش پیدا کرده و تیر نیروی کمتری را تحمل می کند. این تحلیل ها نشان داد که ATENA 3D قادر است به خوبی رفتار بتنی الیافی را مدل کند.

کلمات کلیدی: تیر بتنی، الیاف فولادی، میلگرد برشی، رفتار خمشی

## مقدمه

بتن ماده ای ترد است که تحت فشار عملکرد خوبی دارد، اما در کشش ضعیف عمل می کند. در کاربردهای سازه ای، برای رفع این مشکل از میلگرد یا فولاد پیش تنیده استفاده می شود. در بتن مسلح، کرنش گسیختگی کششی بتن بسیار کوچکتر از کرنش تسلیم میلگردها بوده و به همین دلیل پیش از انتقال باری قابل توجه به میلگردها، بتن دچار ترک خوردگی می گردد. علاوه بر تحمل تنشهای کششی نظیر بار نهایی وارد شده به عضو بتنی، نقش دیگر میلگردها محدود نمودن عرض ترک های بوجود آمده در سازه تحت شرایط بهره برداری می باشد [۱].

الیاف ها در برخی کاربردها می تواند به عنوان جایگزین میلگردهای معمولی و یا مش استفاده شود. اگرچه نخستین کاربرد الیاف مربوط به ترمیم حفرات بوجود آمده در باند پرواز فرودگاه در اثر اصابت بمب حین جنگ جهانی دوم می باشد، اما کاربرد تجاری الیاف فولادی از دهه ۱۹۷۰ میلادی به ویژه در اروپا، ژاپن و ایالات متحده آمریکا شتاب بیشتری یافته است [۱]. امروزه کف های صنعتی و روسازی ها از کاربردهای اصلی بتن حاوی الیاف محسوب می شوند. از دیگر کاربردهای مهم بتن حاوی الیاف فولادی می توان به کفسازی های خارجی، بتن پاششی، دال های کامپوزیت روی عرشه فولادی و المان های پیش ساخته اشاره نمود. الیاف اغلب به عنوان جایگزین مش در دال های متکی به زمین استفاده می شوند. در سال های اخیر، کاربرد این الیاف در دال های متکی به شمع به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از میلگردها نیز روند رو به رشدی یافته است [۱]. در ذیل مطالعات تجربی انجام شده در این زمینه به صورت خلاصه بررسی می شود.

**J. Yin, Z.S. Wu و همکاران [۲]** در سال ۲۰۰۳، عملکرد تیرهای بتن مسلح با الیاف کوتاه فولادی تقویت شده با ورق FRP متصل شده بر سطح خارجی را، بررسی کرده اند. در این تحقیق جهت جلوگیری از انتشار سریع ترک های خمشی تیر های بتنی با ورق های FRP، از الیاف فولادی نیز در استفاده شده بود تا در محل های تشکیل ترک، اثر الیاف فولادی را بررسی نمایند طبق نتایج به دست آمده، استفاده از الیاف یک راه حل مناسبی برای جلوگیری و یا به تاخیر انداختن شکستگی است. کنترل انتشار ترک و افزایش چقرمگی بتن از طریق مخلوط کردن الیاف فولاد پذیر است. علاوه بر این آزمایش تجربی، تیر ها با نرم افزار المان محدود DIANA نیز مدل شده و نتایج با تجزیه و تحلیل های به دست آمده در مدل تجربی، صحت سنجی شده است. که در آن افزایش چقرمگی بتن و میزان جذب انرژی (انرژی شکست) بررسی شد. از این رو، ورق FRP می تواند بارهای بیشتری را در سازه های بتنی مرکب تحمل نموده و از طریق باند سطحی، چقرمگی بتن اصلی با مخلوط کردن الیاف فولادی افزایش چشمگیری داشته باشد.

**Calogero Cucchiara و همکاران [۳]** در سال ۲۰۰۴ اثر بخشی خاموت و الیاف فولادی به عنوان تقویت برشی را مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان می دهد در صورت استفاده از الیاف مکانیسم شکست از برشی به خمشی تغییر پیدا می کند. که این میزان تغییر شکست، از حالت برشی به خمشی با جایگزینی الیاف بجای، میلگرد های برشی امکان پذیر شده است.

**N. Banthia و همکاران [۴]** در سال ۲۰۰۷ افزایش سختی در بتن تقویت شده با الیاف فولادی از طریق ترکیب الیاف های چین دار را بررسی کرده اند، نتایج تجربی حاصل از آزمایش های انجام شده نشان داد که با جایگزینی بخشی از الیاف چین دار با قطر بزرگتر (۰.۸ میلیمتر) به جای الیاف چین دار با قطر کوچکتر (۰.۴۵ میلیمتر) افزایش سختی قابل توجهی به دست می آید.

**R.S. Olivito و همکاران [۵]** در سال ۲۰۱۰ مطالعه تجربی بر روی مقاومت کششی بتن مسلح حاوی الیاف فولادی انجام داده اند. آزمون های تجربی جهت بررسی مقاومت فشاری تک محوره و استحکام کششی و مقاومت خمشی تحت تیر خمشی چهار نقطه ای ساخته شد نتایج عبارتند از اینکه : در تیر های حاوی الیاف فولادی قبل از خروج الیاف توانایی برای توزیع مجدد تنش ها تحت ترک های متعدد وجود دارد. و تیر های (UHPC) با میلگرد کم و حاوی الیاف فولادی رفتار انعطاف پذیرتر و شکست خمشی تری نسبت به تیرهای (UHPC) با میلگرد بیشتر از خود نشان دادند. همچنین رفتار انعطاف پذیری بعد از تولید ترک در بتن با الیاف فولادی مشاهده شد که ترک خوردگی قابل کنترلی در تیر ایجاد می شود.

**Yining Ding و همکاران [۶]** در سال ۲۰۱۱ اثر ترکیبی از الیاف فولادی و خاموت بر رفتار برشی بتن تازه خود تحکیم

<sup>1</sup> Fibre reinforced polymer

(SCC<sup>۱</sup>) را بررسی کرده اند، نتایج حاصل از ترکیب خمش و برش نشان داد که استفاده از الیاف فولادی با ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مکعب، حالت شکست را از فروپاشی ترد و شکننده به یک ساز و کار خمشی شکل پذیر تغییر داد. همچنین الیاف فولادی با هر نسبت مقاومت برشی را افزایش می دهد. با استفاده از الیاف (استفاده همزمان الیاف با خاموت های برشی) میتوان فاصله خاموت ها را از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلیمتر افزایش داد.

**I. Merta و همکاران [۷]** در سال ۲۰۱۳ مطالعه تجربی بر روی انرژی شکست بتن مسلح تقویت شده با الیاف طبیعی کنف، موی فیل، و کاه گندم انجام دادند. در این تحقیق برای تقویت بتن از الیاف طبیعی: کنف، کاه گندم، و موی فیل استفاده شده است نتایج به دست آمده عبارتند از الیاف کنف انرژی شکست بتن را ۷۰ درصد افزایش داد. و الیاف موی فیل انرژی شکست بتن را ۵ درصد افزایش داد. همچنین الیاف کاه انرژی شکست بتن را ۲ درصد افزایش داد. با تجزیه و تحلیل های انجام شده و تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح الیاف ها با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر به این نتیجه رسیدند که این افزایش انرژی در کنف بیشتر به دلیل مقاومت کششی بالای کنف و میزان برجستگی سطح کنف می باشد.

**M.M. Kamal و همکاران [۸]** در سال ۲۰۱۴ رفتار و مقاومت تیرهای بتن با مقاومت فوق العاده بالا (UHPC<sup>۲</sup>) حاوی الیاف را بررسی کردند. دو نوع از الیاف از جمله الیاف فولادی و پلی پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت. ترک خوردگی اولیه، الگوی ترک خوردگی و بار نهایی از جمله پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق بوده است. در نمونه هایی که از الیاف استفاده شده بود، کاهش ترک مشاهده شد. مقاومت ۲۸ روزه به دست آمده ۱۳۵ مگاپاسگال بود. این در حالیست که کارایی بتن در حد مطلوبی بوده است. مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن ۲/۵ درصد و الیاف فولادی ۶ درصد نسبت به بتن بدون الیاف مقاومت ۲۸ روزه را افزایش داد. تیر هایی که در آن از الیاف فولادی استفاده شده بود ۱۳ درصد مقاومت خمشی را افزایش داد. مقاومت برشی الیاف پلی پروپیلن ۱۵ درصد و الیاف فولادی ۴۸ درصد نسبت به بتن بدون الیاف مقاومت ۲۸ روزه را افزایش داد.

**Ali Akbar Ramezani pour و همکاران [۹]** در سال ۲۰۱۴ اثر متاکائولن و پومیس را بر رفتار خمشی بتن مسلح الیاف هیبرید (HFRC) مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصله عبارتند از اینکه متاکائولن با بالاترین تعویض سیمان بهترین عملکرد مکانیکی را در خواص بتن می دهد. و پوزولان باعث افزایش در مقاومت فشاری در مقایسه با مخلوط شاهد می شود. بتن ساخته شده با ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی و ۰/۲۵ درصد الیاف پلی پروپیلن بالاترین سختی، مدول گسیختگی و مقاومت به ضربه را از خود نشان داد. همچنین تعویض سیمان برای ۱۵ درصد متاکائولن حداکثر افزایش در مقاومت فشاری ایجاد می شود.

**Doo-Yeol Yoo و همکاران [۱۰]** در سال ۲۰۱۴ عملکرد بتن با مقاومت بسیار بالای تقویت شده ی الیاف فولادی با چهار درصد مختلف را بررسی کردند. مقاومت فشاری به دست آمده برای ۱ درصد: ۱۹۶/۸ MPa، ۲ درصد: ۲۰۱/۸ MPa، ۳ درصد: ۲۰۷/۲ MPa، ۴ درصد: ۱۸۴/۹ MPa به دست آمده است. طبق تجزیه و تحلیل های انجام شده به این نتیجه رسیدند که بتن با الیاف ۳ درصد حجمی عملکرد خوبی از لحاظ مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته داشته است. همچنین آزمایش ها نشان داد که افزودن ۳ درصد حجمی الیاف فولادی رفتار خمشی را به صورت چشمگیری بهبود بخشیده و انرژی شکست را افزایش می دهد و مقدار بهینه ای می باشد.

**D. L. ARAÚJO و همکاران [۱۰]** در سال ۲۰۱۰ رفتار برشی تیر های بتن الیافی را با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی و مدل سازی المان محدود بررسی کردند.

در ادامه پارامترها و جزئیات این آزمایش شرح داده می شود، تا با استفاده از این داده ها تیر مورد نظر را مدل کرد. شبیه سازی تیر با نرم افزار ATENA 3D که ویژه شبیه سازی عددی رفتار سازه های بتن آرمه به صورت سه بعدی است، صورت می گیرد. هدف از ایجاد این مدل، شبیه سازی رفتار برشی با روش المان محدود به منظور تحقق یافته های تجربی و مقایسه و تعمیم نتایج آنالیزی می باشد.

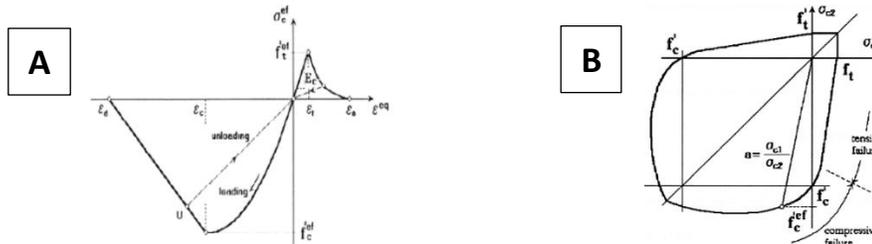
### مدل سازی تیر بتن آرمه با نرم افزار ATENA [۱۱]

ATENA نرم افزاری است که به منظور تحلیل غیرخطی اجسام و با قابلیت های ویژه برای سازه های بتن آرمه طراحی

<sup>1</sup> self-consolidating concrete

<sup>2</sup> Ultra-high performance concrete

شده است. همچنین قابلیت محاسبه ی ظرفیت باربری، تحلیل استاتیکی غیر خطی، عرض ترک، تغییر شکل دقیق و تعیین منطقه شکست را دارا می باشد. مدل مشخصه مصالح در ATENA به منظور تعریف رفتار غیر خطی بتن بر مفهوم ترک های آمیخته (Smeared crack) مکانیک آسیب (Damage mechanic) و مکانیک شکست (Fracture mechanic) پایه ریزی شده است. نرم افزار برای ایجاد مدل شکست-خمیری، مدل های مشخصه کششی (شکست) و رفتار فشاری (خمیری) را با هم ترکیب می کند. در حالت آمیخته، پیوستگی کامل بین بتن و میلگرد فرض می شود. در این حالت لغزش- پیوستگی را نمی توان به صورت مستقیم مدل نمود، مگر لغزش-پیوستگی که به شکل ذاتی در سخت شدگی کششی در نظر گرفته می شود. با این حال اگر بتن ترک خورده یا بشکند، در مقیاس بزرگ، تغییر مکان نسبی بین میلگرد و بتن در طول مشخص به وجود میاید. این وضعیت مربوط به مکانیزم واقعی گسیختگی پیوستگی در حالت استفاده از میلگرد آجدار می باشد. در هر دو روش آمیخته یا مجزا، میلگرد ها در حالت تنش تک محوری بوده و دیاگرام تنش- کرنش آنها چند خطی می باشد. خلاصه ای از مدل شکست خمیری بتن 3D<sup>1</sup> “Nonlinear cementitious user” در شکل (۱A) ارائه شده است.

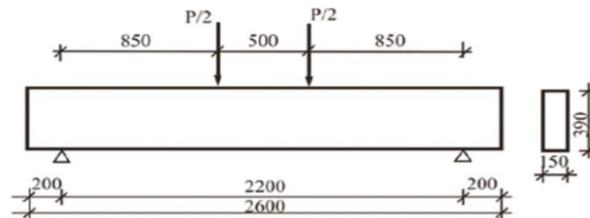


شکل ۱: نمودار تنش کرنش تک محوری بتن A و تابع گسیختگی دو محوره بتن B [۱۲]

برای شاخه افزایشی تنش کرنش فشاری بتن، فرمول CEB- FIP Model code 90 استفاده شده است. از معیار گسیختگی تنش دو محوره بتن که در شکل (۱B) نشان داده شده، استفاده می شود.

دو روش استاندارد Newton-Raphson و طول کمان، برای حل معادلات غیر خطی توسط نرم افزار ATENA بکار گرفته می شود. هر دو راه حل با روش جستجوی خطی ارتقا می یابند. از این روش برای افزودن یا تعدیل سرعت تحلیل رابطه بار- تغییر مکان استفاده می شود. در هر دو روش، در صورتی که مقدار خطا از معیار تعیین شده ی ضریب (با ضریب معین) تجاوز کند، می توان از معیار شرط قطع برای توقف تحلیل در حین تکرار یا در انتهای گام، استفاده می شود.

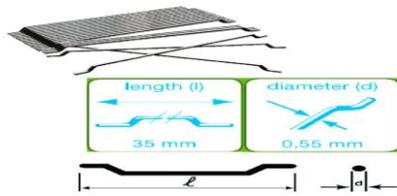
شش مدل تیر بتنی مورد آزمایش قرار گرفت. ضخامت تیر ۳۹۰ میلیمتر، عرض تیر ۵۰ میلیمتر و طول تیر میلیمتر ۲۶۰۰ بود. الیاف مورد استفاده صفر درصد، ۱/۰۰ درصد جرم حجمی بتن بود. شکل (۲) ابعاد نمونه ی تیر ساخته شده را نشان می دهد.



شکل ۲: ابعاد تیر مورد آزمایش [۱۰]

از بتن C60 در تیر ها استفاده شده است. الیاف مورد استفاده از شرکت BEKAERT نوع Dramix RC65/35 BN با ۱۰ درصد حجمی ۷۹ کیلوگرم بر متر مکعب و با مقاومت کششی ۱۱۵۰ MPa<sup>۱</sup> و انتها قلابدار<sup>۱</sup> شکل (۳) اطلاعات مربوط به الیاف در جدول (۱) و شکل (۳) آورده شده است.

<sup>1</sup>Hooked ends



شکل ۳: اطلاعات مربوط به ابعاد و نوع الیاف [۱۰]

جدول ۱: مشخصات الیاف فولادی [۱۰]

(L/D)	E	وزن مخصوص	$f_y$	$V$	مقدار در هر کیلوگرم
	Gpa	$\frac{kg}{m^3}$	MPa		FIBER /Kg
۶۴	۲۱۰	۷۸۵۰	۴۲۰	۰/۳	۱۴۵۰۰

مقدار مصالح مورد استفاده برای تهیه مخلوط بتن در جدول ۲ آورده شده است. حداکثر اندازه ماسه استفاده شده ۴/۸ میلیمتر و حداکثر اندازه شن ۱۲/۵ میلیمتر بوده است. نمونه های تهیه شده برای آزمایش از نمونه های استوانه ای شکل ۳۰×۱۵۰ میلیمتر و آزمایش های انجام شده طبق استاندارد برزیل<sup>۱</sup> می باشد. مشخصات مقاومت ۲۸ روزه نمونه های بتن بدون الیاف در جدول (۳) و با الیاف در جدول (۴) آمده است. اعداد پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و کرنش متناظر با مقاومت فشاری برای مقاومت ۲۸ روزه آورده شده است. همچنین برای مسلح کردن تیر ها از میلگرد های با قطر های مختلف با  $FY=420MPa$  و  $E=210 GPa$  استفاده شده است.

جدول ۲: مقدار مصالح مورد استفاده در مخلوط بتن [۱۰]

نوع مصالح	مقدار ( $\frac{kg}{m^3}$ )	نوع مصالح	مقدار ( $\frac{kg}{m^3}$ )	نوع مصالح	مقدار ( $\frac{kg}{m^3}$ )
ماسه طبیعی	۸۱۷	آب	۱۹۸	سیمان نوع ۳	۴۴۰
مصالح درشت دانه	۸۱۷	ولاستونیت	۷۲/۵ (۲/۵%)	میکروسیلیس	۳۵
روان کننده	۵/۸۶ (۱/۲%)	نسبت آب / (سیمان + میکروسیلیس)	۰/۴		

جدول ۳: مشخصات مقاومت ۲۸ روزه نمونه های بتن [۱۰]

مقدار الیاف	مقاومت فشاری $f_{cm}$	مقاومت کششی $f_{ct,num}$	$\varepsilon_{1,num} = \frac{f_{ct,num}}{E_C}$	$0.25 f_{ct,num}$	$\varepsilon_{2,num}$	$\varepsilon_{3,num}$
%	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	%
۰.۰۰%	۶۵	۴/۴۱	.	۱/۱	۲/۷	۱۸

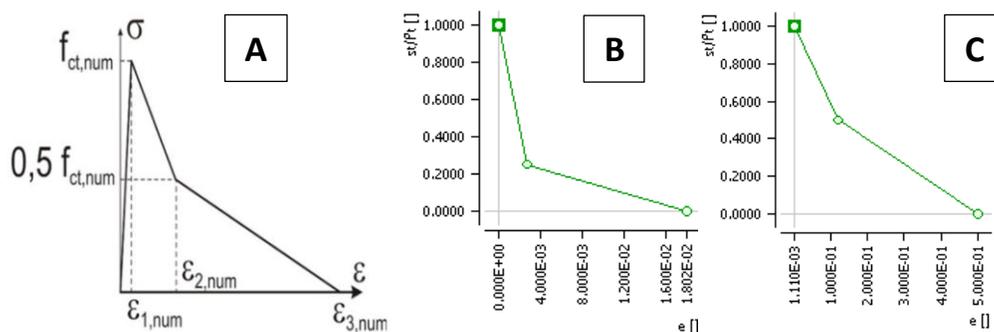
جدول ۴: مشخصات مقاومت ۲۸ روزه نمونه های بتن [۱۰]

مقدار الیاف	مقاومت فشاری $f_{cm}$	مقاومت کششی $f_{ct,num}$	$\varepsilon_{1,num} = \frac{f_{ct,num}}{E_C}$	$0.5 f_{ct,num}$	$\varepsilon_{2,num}$	$\varepsilon_{3,num}$
%	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	%
۱/۰۰%	۶۵/۲۷	۳/۲۸	۰/۱۱۱	۱/۶۴	۱۲	۵۰

محققین مدل های مختلفی برای تنش-کرنش بتن تحت کشش در نظر گرفته اند که در شکل (۴A) مدل استفاده شده در این آزمایش برای بتن الیافی را نشان داده شده است. نمودار تنش-کرنش بتن تحت کشش برای بتن بدون الیاف را در شکل (۴B) و با

<sup>1</sup>Brazilian standard NBR 7222

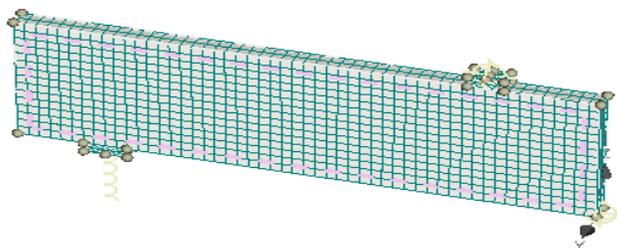
الیاف در شکل (۴C) آمده است.



شکل ۴: رابطه بین تنش- کرنش در بتن تقویت شده با الیاف A [۱۰] منحنی های کششی بتن با مقاومت فشاری بتن ۵MPa ب و بدون الیاف C

تیر به صورت ساده بر روی دو تکیه گاه صلب، به گونه ای قرار گرفته است که امکان دوران وجود داشته است. تکیه گاه ها به فاصله ۲۲۰۰ میلیمتر از همدیگر و ۸۵۰ میلیمتر از محل اعمال بار قرار داشته است. مکانیزم دستگاه آزمایش به گونه ای که یک اهرم فولادی در وسط تیر قرار می گیرد و بار به صورت آهسته به تیر وارد می گردد. با این مکانیزم در نواحی نزدیک وسط تیر کسپختگی اتفاق افتاد.

در مدل عددی به دلیل تقارن تیر حول محور X به منظور کاهش حجم آنالیز، از اصل تقارن استفاده نموده شده و فقط ۱/۲ تیر را مطابق شکل ۵ مدل شده است. با توجه به نوع بارگذاری انجام گرفته، جابه جایی بدست آمده توسط آنالیز ۱/۲ تیر، با جابه جایی کل تیر برابر می باشد و بار تحمل شده توسط بخش مدل شده تیر، ۱/۲ بار نهایی تحمل شده توسط کل تیر می باشد. بنابراین باید پس از بدست آوردن مقادیر بار در هر Step، آن را در عدد ۲ ضرب نماییم تا ظرفیت بار نهایی برای کل تیر بدست آید.



شکل ۵: شبکه بندی تیر مدل شده

همانطور که در این شکل نیز مشاهده می شود، تکیه گاه های زیرین در دو راستای X, Y، مقید شده و در راستای Z باز گذاشته شده است. این آزادی به صورت فنر سختی با ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

بارگذاری تیر به صورت زیر انجام پذیرفت:

Step1: اثر وزن تیر اعمال گردید تا تغییر شکل اولیه ناشی از اثر وزن تیر در روند آنالیز تاثیر داده شود.

Step2-final step: بارگذاری اصلی به صورت جابجایی کنترل<sup>۱</sup> (اعمال جابجایی مشخص و محاسبه بار در هر مرحله) و طی حداقل ۴۰ مرحله اعمال گردید. در هر مرحله از بارگذاری در مرکز تیر و بر روی صفحه فولادی، تغییر مکان ۰/۴ میلیمتر ایجاد می شود و در هر مرحله تغییر مکان و بار نهایی در مرکز تیر قرائت می گردد. با داشتن تغییر مکان قائم و بار در هر مرحله، نمودار بار جابجایی رسم می گردد.

<sup>1</sup>Deflection control

## بررسی صحت مدل

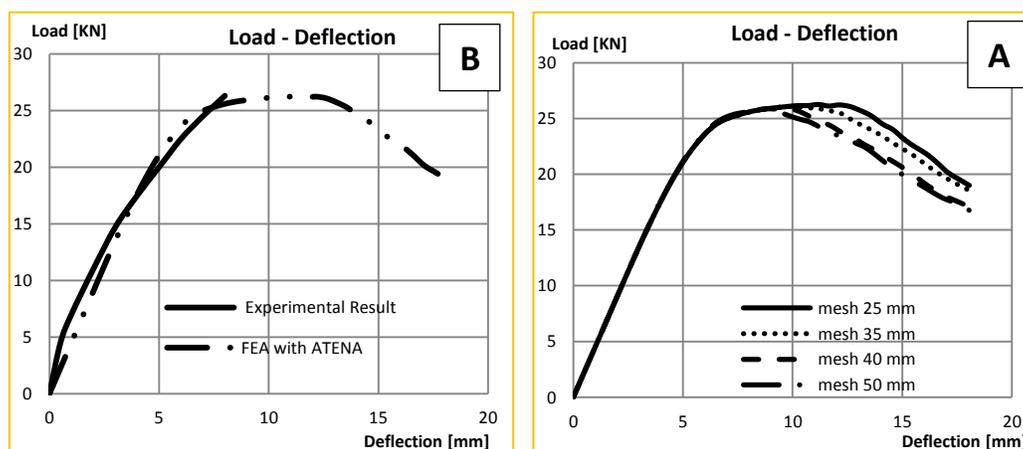
شبکه مورد استفاده در این تیر از نوع المان مکعبی Brick می باشد. با توجه به وقت گیر بودن و بالا بودن حجم شبکه و آنالیز، مینمایست مناسبترین ابعاد برای شبکه بندی تیر انتخاب گردد. برای بررسی تاثیر تعدادی از پارامتر ها، بر روی نتایج شبیه سازی، در ادامه به بررسی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات برخی از این پارامتر ها پرداخته می شود. حساسیت به اندازه شبکه، حساسیت به مقاومت کششی بتن، حساسیت به مقاومت فشاری بتن از جمله حساسیت های مورد بررسی در این تحقیق می باشد و در هر قسمت نتایج مربوطه ارائه می گردد.

## حساسیت به اندازه شبکه

برای بررسی این حساسیت تمامی پارامتر ها ثابت نگه داشته شد، و تنها ابعاد شبکه تغییر می کند. آنالیز حساسیت تیر با ۴ ابعاد مختلف شبکه صورت پذیرفت. در جدول (۵)، اطلاعات ابعاد شبکه در مقطع تیر و تعداد المان ها در عرض تیر، برای المان های با ابعاد متفاوت، آورده شده است. نمودار های بار- خیز شبکه های انتخاب شده در شکل (۶A) نشان داده شده است.

جدول ۵: اطلاعات شبکه

نوع شبکه	طول المان (m)	تعداد المان 3D	تعداد المان در عرض تیر
Mesh- 0.025 m	۰/۰۲۵	۱۸۱۲	۲
Mesh- 0.035 m	۰/۰۳۵	۸۹۳	۲
Mesh- 0.040 m	۰/۰۴	۶۹۶	۲
Mesh- 0.050 m	۰/۰۵	۲۴۶	۱

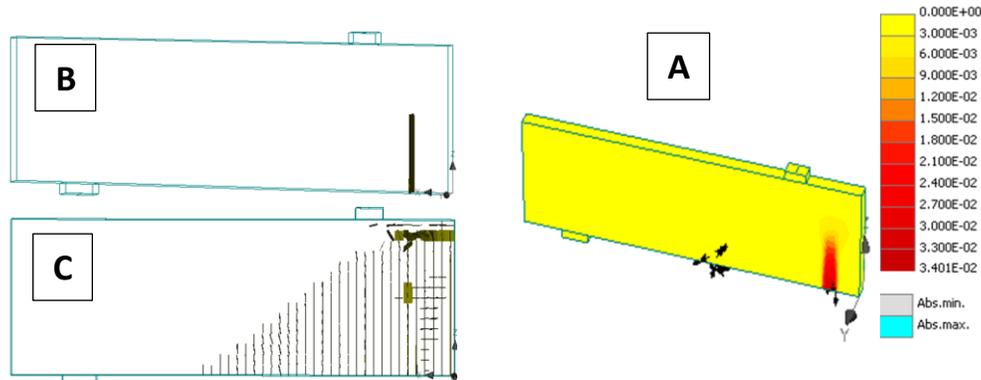


شکل ۶: حساسیت به ابعاد شبکه A مقایسه نمودار بار-خیز مدل آزمایشگاهی با مدل شبیه سازی شده B

با توجه به این منحنی ملاحظه می شود که تقریباً تا رسیدن منحنی ها به حداکثر بار منحنی ها بر هم منطبق می باشد و پس از حداکثر بار است که منحنی ها از یکدیگر جدا می گردد. با توجه به تفاوت نتایج در تغییرات اندازه شبکه و همچنین نمودار بار - خیز مدل آزمایشگاهی، تیر با اندازه شبکه ۰/۰۲۵ متر انتخاب گردید. هر چند مقدار زیاد المان ها موجب افزایش زمان تحلیل مدل می شود. شکل (۶B) مقایسه نمودار های بار - خیز مدل آزمایش شده و مدل شبیه سازی شده با نرم افزار ATENA را نشان می دهد.

## نمایش ترک های ایجاد شده در تیر

پس از صحت سنجی تیر، اولین مقایسه و بررسی بر روی ترک های ایجاد شده در تیر صورت پذیرفت.



شکل ۷: ترک های اولیه تیر A, B کلیه ترک های ایجاد شده در بار حداکثر C

با توجه به نوع مدل سازی، این ترک های در ناحیه زیرین تیر ایجاد می گردند. همچنین در شکل (A, B) ترک های اولیه نشان داده شده است که نشانگر صحت مدل ایجاد شده است. شکل (C) نیز نمای سه بعدی از تمامی ترک های ایجاد شده در گام مربوط به بار حداکثر را نشان می دهد.

### حساسیت به درصد میلگرد های برشی

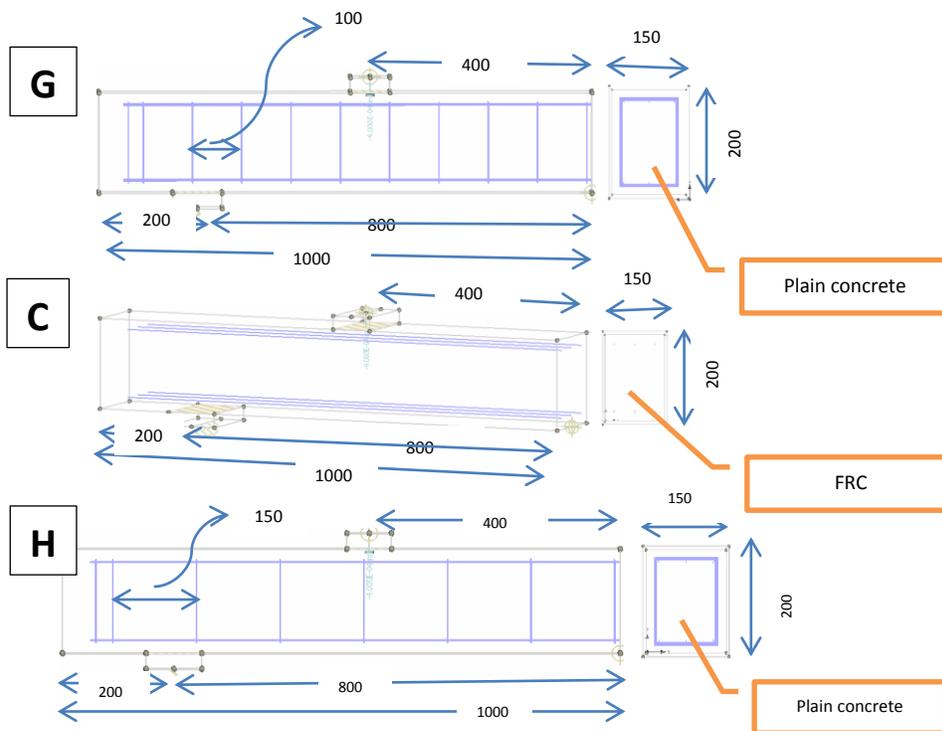
چون عرض تیر مدل شده در صحت سنجی ۵۰mm بود و امکان استفاده از میلگرد طولی و عرض وجود نداشت، به همین جهت برای بررسی حساسیت تیر به میلگردهای برشی، خمشی و پارامترهای مربوط به مسلح کردن بتن، تیرهایی به ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۲۰۰ میلیمتر در نرم افزار مدل شده است (شکل ۴-۹). همچنین نمونه ها در دو نوع بتن [A: بتن الیافی] و [B: بتن معمولی] مدل و مقاومت فشاری هر دو نوع ۶۵ Mpa تعریف شده است.

جدول ۴-۱: اطلاعات درصد میلگرد ها در تیرهای مدل شده برای سری های مختلف

سری مدل ها	نوع بتن	فاصله خاموت ها (cm)	نوع تیر	قطر میلگرد فشاری (mm)	قطر میلگرد کششی (mm)	قطر میلگرد برشی (mm)	ρ % برش	مقدار الیاف مصرفی (kg)	میلگرد برشی (kg)
C	FRC	-	Beam-C-F-1	۳×۲۰	۳×۲۵	-	-	۲/۳۷	-
G	PC	۱۰	Beam-G-P-1	۳×۲۰	۳×۲۵	۸/۰۴	۰/۹	-	۲/۳۷
H	PC	۱۵	Beam-H-P-1	۳×۲۰	۳×۲۵	۹/۸۴	۰/۹	-	۲/۳۷

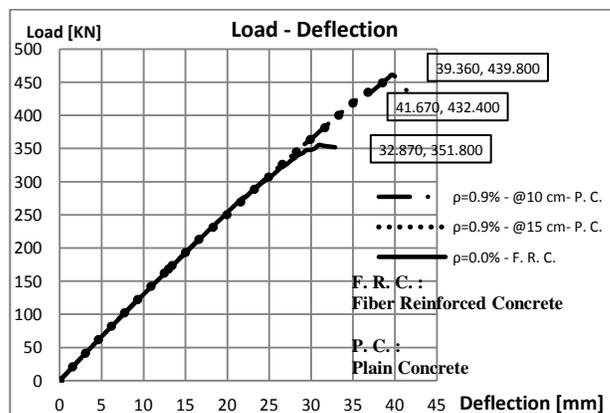
شکل ۴-۱۶ نمودار بار - خیز تیر بتنی را به ازای مقدار یکسانی از فولاد مصرفی در تیر به عنوان فولاد برشی نشان می دهد. یعنی به ازای یک درصد الیاف هم وزن آن از خاموت برشی در فواصل ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر قرار داده شده و تحلیل شده است. همانطور که نمودار نشان می دهد استفاده از تیر های با فاصله خاموت ۱۰ سانتیمتر بار بیشتری را در مقایسه با تیر های با فاصله خاموت ۱۵ تحمل می کند که منطقی به نظر می رسد. به علاوه بکار بردن الیاف به همان اندازه در کل تیر نیروی کمتری را در مقایسه با خاموت ها با فواصل ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر تحمل می کند که علت آن را شاید این گونه توجیه کرد که در کار گذاشتن میلگردهای برشی با توجه به جهت ترک های برشی میلگرد برشی این ترک ها را به اصطلاح می دوزد ولی در بکارگیری الیاف مقداری از آنها به موازات

ترک وجود خواهد داشت که تاثیر چندانی بر مقاومت برشی مقطع ندارد. ولی در کل بکارگیری الیاف موجب بالا بردن مقاومت برشی در مقایسه با تیر بدون الیاف است.

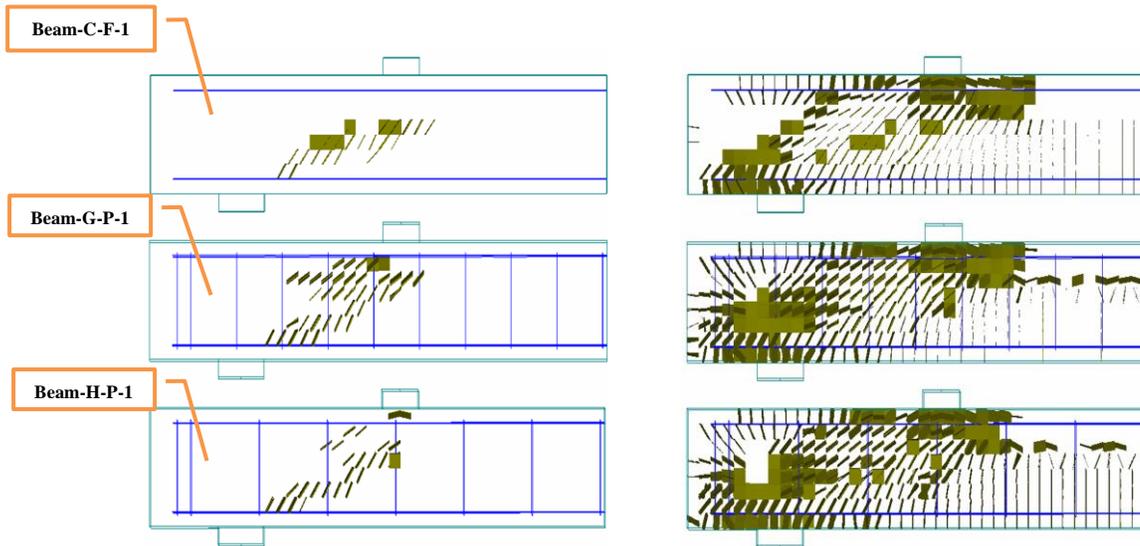


شکل ۴- ۱: ادامه ابعاد و چیدمان میلگردها برای تیرهای مدل شده در سری های مختلف

میلگردهای کششی در کلیه نمونه ها با قطر ۲۵ میلگرد و میلگرد های فشاری در کلیه نمونه ها با قطر ۲۰ میلگرد بوده ولی از میلگردهای برشی با درصد های مختلف از ۰/۵ درصد الی ۲ درصد استفاده شده است. فاصله میلگرد های برشی بسته به سری مدل ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر از هم قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به الیاف استفاده شده در جدول ۳-۱ و ۳-۵ آورده شده است. اطلاعات درصد میلگردها در تیرهای مدل شده برای سری های مختلف در جدول ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۴- ۲: منحنی های بار-خیز برای بتن PC با میلگرد برشی هم وزن الیاف ۱ درصد



شکل ۳- ترک های اولیه سری های مختلف تیرها در دو نوع با بتن الیافی (FRC) و بدون الیاف (PC)

شکل ۴- ترک های نهایی سری های مختلف تیرها در دو نوع با بتن الیافی (FRC) و بدون الیاف (PC)

### نتیجه گیری

با استفاده از نرم افزار المان محدود ATENA 3D که ویژه شبیه سازی عددی رفتار سازه های بتن آرمه به صورت سه بعدی است، می توان تیر بتنی الیافی را با نتایج داده های آزمایشگاهی صحت سنجی شده و مدل سازی عددی نمود. نتایج نشان می دهد که، علاوه بر آنکه با حفظ مقاومت تیر، می توان الیاف را جایگزین قسمتی از خاموت کرد بلکه به شکل پذیری بیشتری هم می توان دست یافت. در این تحقیق در بتن FRC با مقدار الیاف ۱ درصد و میلگرد برشی ۰/۵ درصد می توان به مقاومت یکسانی در بتن PC با میلگرد های برشی ۰/۹ درصد رسید.

بدون حضور میلگرد برشی افزودن ۱ درصد الیاف موجب بالا بردن مقاومت برشی به میزان ۱۸ درصد در مقایسه با تیر بدون الیاف در شرایط همسان است. این تحلیل ها نشان داد که ATENA 3D قادر است به خوبی رفتار بتنی الیافی را مدل کند.

### مراجع

۱. رحمانی، د.م.ش.ز.م.ت.، راهنمای کاربردی بتن حاوی الیاف فولادی. انتشارات علم و ادب، ۱۳۹۳.
۲. Cucchiara, C., L. La Mendola, and M. Papia, *Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement*. Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(7): p. 777-۷۸۶-
۳. Dancygier, A.N. and Z. Savir, *Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios*. Engineering Structures, 2006. **28**(11): p. 1503-1512.
۴. Banthia, N. and M. Sappakittipakorn, *Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization*. Cement and Concrete Research, 2007. **37**(9): p. 1366-1372.
۵. Holschemacher, K., T. Mueller, and Y. Ribakov, *Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete*. Materials & Design, 2010. **31**(5): p. 2604-2615.
۶. Ding, Y., Z. You, and S. Jalali, *The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear*

- behaviour of beams using self-consolidating concrete*. Engineering Structures, 2011. **33**(1): p. 107-117.
- ۷ Ding, Y., et al., *Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory*. Composite Structures, 2012. **94**(8): p. 2440-2449.
- ۸ Slater, E., M. Moni, and M.S. Alam, *Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials, 2012. **26**(1): p. 423-436.
- ۹ Yoo, D.-Y., et al., *Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers*. Composites Part B: Engineering, 2014. **58**: p. 122-133.
- ۱۰ ARAÚJO, D.L., *Computational modeling of steel fiber reinforced concrete beams subjected to shear*. 2010.
- ۱۱ Červenka, J., *ATENA Program Documentation Tutorial for Program ATENA 3D*. 2005.
- ۱۲ Červenka, J. and V.K. Papanikolaou, *Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete*. International Journal of Plasticity, 2008. **24**(12): p. 2192-2220.

## The effect of steel fibers are replaced by fibrous concrete beams bending behavior Bakhamvt

saeed naggashi <sup>1,2</sup>, masud farzam <sup>\*3</sup>

1. Graduate student of Civil Engineering - Structural Research East Azerbaijan Science and Research branch , Islamic Azad University , Tabriz, Iran
2. Graduate student of Civil Engineering - Structural Research Tabriz branch , Islamic Azad University , Tabriz, Iran
3. Department of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

### Abstract

Concrete material is brittle under pressure to perform well, but poorly in tension. In concrete, the concrete tensile fracture strain was much smaller than the yield strain of reinforcement and therefore considerable time before being transferred to the reinforcement, concrete cracking is experiencing. Case studies of fibrous concrete beams with four-point bending, using the finite element software for numerical simulation 3D ATENA that a three-dimensional behavior of reinforced concrete structures is carried out. In this study, the results of numerical modeling of concrete beam fiber with the results of laboratory data validation and then replaced with the effect of shear reinforcement steel fibers were studied. In each of the relevant results will be presented.

The results of the specimens with the use of steel fibers in comparison with concrete beams without fibers showed that, by replacing the steel fibers instead of stirrups bending beams and rafters dropped less force to bear. This analysis showed that ATENA 3D is able to model the good behavior of the fiber concrete.

**Keywords:** Concrete beams, steel fibers, reinforcing strength, flexural behavior