

تحلیل و طراحی تونل پوشش دار با قطعات مرکب بتن مسلح الیافی: مطالعه‌ی موردی - تونل خط ۷ متروی تهران

محمد رضا عدل پرور*، دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

محمد حسین تقوی پارسا، دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

Email: adlparvar@qom.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

چکیده

استفاده از قطعات بتنی در تونل‌سازی همواره با ترک‌های عریض ناشی از ضربه جک تراست دستگاه مکانیزه حفاری در طول نصب قطعات و یا نیروهای به‌وجود آمده در مرحله انتقال همراه است. از سوی دیگر، به دلیل هزینه‌های نیروی انسانی و زمان ساخت طولانی، امروزه استفاده از بتن الیافی مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از الیاف، خواص مکانیکی قطعه بتنی بهبود یافته و در مقابل تنش‌های کششی بسیار زیاد، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد. تحقیق حاضر، با هدف تجزیه و تحلیل اثر جایگزینی الیاف فولادی با آرماتور در قطعه‌های بتن مسلح تونل‌سازی با استفاده از روش مبتنی بر فاصله انجام شده است. در این پژوهش، ابتدا به بررسی آئین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی قطعه‌های بتن الیافی مورد استفاده در تونل پرداخته شده است. سپس، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، قطعه‌های بتن مسلح در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. قطعه‌های مدل‌سازی شده شامل سه نوع قطعه بتن مسلح با آرماتور و قطعه مسلح شده با آرماتور و الیاف، از طریق جایگزینی آرماتور با الیاف به میزان ۰/۵ و ۱/۰ درصد حجمی بتن است. در نهایت، با توجه به خواص مکانیکی نظیر ظرفیت فشاری، کششی و خمشی و همچنین، تحلیل اقتصادی صورت گرفته بر مبنای روش مبتنی بر فاصله، قطعه طراحی شده با بتن الیافی ۱/۰ درصد نسبت به دو نوع قطعه دیگر ۳۳ درصد برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: تونل، قطعه بتنی، بتن الیافی، شبیه‌سازی عددی، رفتار کششی خمشی، الیاف فولادی، آباکوس، DBA

۱. مقدمه

دوام، کاهش افت و مقاومت در برابر سایش و خوردگی، در دو دهه اخیر بسیار رواج یافته است. استفاده از بتن الیافی در صنعت تونل‌سازی نیز باعث بهبود بسیاری از عملکردها در پوشش تونل شده است،

استفاده از بتن الیافی در صنایع مختلفی همچون راه-سازی و صنایع پیشرفته ساختمانی، به دلیل افزایش مقاومت کششی و فشاری، افزایش چقرمگی، افزایش

تقویت شده با الیاف فولادی پیش‌ساخته است، یا از توصیه‌نامه DBV (۱۹۹۴) که به اصول طراحی بتن تقویت شده با الیاف فولادی برای کارهای تونلی است، بهره برد. علاوه بر این، توصیه‌نامه DAUB (۲۰۰۶) به طراحی، تولید و نصب حلقه قطعه‌ای توجه دارد. مباشر و همکاران (۲۰۱۵) با توجه به یک برنامه‌ی تحت اکسل آئین‌نامه ACI 544.8R-16 (۲۰۱۶) به شبیه‌سازی منحنی بار-خیز با استفاده از داده‌های تست خمشی پرداختند. آن‌ها شش مرحله برای شبیه‌سازی عددی منحنی بار-خیز یک نمونه‌ی تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای انجام دادند. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن مدل رفتاری بتن مسلح الیافی از روش سوراناکوم استفاده شده است. پژوهش آرنائو و مولینز (۲۰۱۱) مبنای کار بسیاری از محققین در زمینه‌ی شبیه‌سازی تونل در دهه‌ی اخیر شده است. آن‌ها در پژوهش خود به اهمیت سه پارامتر تأثیر الیاف فولادی پس از ترک‌خوردگی، رفتار اتصالات بین قطعه‌ها در شبیه‌سازی و تعامل زمین و تونل پرداختند. دلا فوئته و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی در قطعه‌های طراحی شده با آرما تور می‌تواند تا ۷۰ درصد، سبب کاهش آرما تورهای قطعه در خط ۹ بارسلونا شود. این تحقیق آن‌ها سبب افزایش تست‌های آزمایشگاهی در اسپانیا و پدید آمدن آئین‌نامه‌ی جدید اسپانیا شد. تیرتی و همکاران (۲۰۱۴) در مقاله‌ای به بررسی یک مدل بهینه‌ی مسلح از ترکیب میلگردهای معمولی و الیاف پرداختند. آن‌ها برای بهینه‌سازی آرما تورها با الیاف، تحلیل‌های غیرخطی عددی انجام دادند که این روند به صورت یک مورد واقعی روی یک تونل جاده‌ای اعمال شده است. راه‌حل پیشنهادی بهینه شده‌ی آن‌ها باعث کاهش حدود ۷۵٪ آرما تورها شده است. طبق این پژوهش، میلگردها فقط در دو ناحیه مهم تونل قرار می‌گیرند، اول در اتصالات سرد (جایی که مقاومت کششی ناچیز است) و دوم جایی که تغییر ضخامت رخ می‌دهد.

به طوری که در بسیاری از تونل‌های ساخته شده در دهه‌ی اخیر از بتن الیافی استفاده شده است. از میان آئین‌نامه‌های طراحی قطعه، آئین‌نامه‌های ACI.544-7R-16 (۲۰۱۶) و ITA WG2 (۲۰۱۷) بسیار حائز اهمیت می‌باشند.

در قطعه‌های بتنی، برای مقاومت در برابر تنش‌های کششی ایجاد شده تحت تمامی حالت‌های بارگذاری از زمان ساخت تا شرایط سرویس، عموماً از میلگردهای فولادی استفاده می‌شود. با این حال، مشکلاتی از جمله ترک‌های عریض، هزینه‌های زیاد نیروی انسانی و زمان زیاد ساخت میلگردهای منحنی در اثر استفاده از میلگرد در قطعه وجود دارد. به عنوان یک گزینه، بتن الیافی (بتن مسلح الیافی) در مقابل تنش‌های کششی بسیار زیاد گسترش یافته، از قبیل نیروهای جک تراست دستگاه TBM در طول نصب قطعات و یا نیروهای به وجود آمده در مرحله انتقال قطعه، رفتار قابل قبولی نشان می‌دهند (ACI.544-7R-16, ۲۰۱۶).

مقاومت کششی پسماند یکی از مشخصات تعیین کننده بتن الیافی است. به طوری که در محاسبات طراحی به عنوان یک پارامتر دارای ضریب است. این مقاومت به طور غیر مستقیم و از طریق تست‌های خمشی به‌دست می‌آید. از زمانی که آئین‌نامه‌ی *fib* Model code (دی پریسکو و همکاران، ۲۰۱۳) مشخصات تعیین چقرمگی را از آزمایش خمشی سه-نقطه‌ای استاندارد EN 14651 (۲۰۰۵) استفاده کرد، این آئین‌نامه به عنوان استاندارد مرجع شناخته شد. علاوه بر این، استاندارد ASTM C1609/C1609M (بانتیا و اسلام، ۲۰۱۳) نیز از مهمترین و پرکاربردترین استانداردها در این زمینه است. همچنین، برای به‌دست آوردن رفتار بتن مسلح الیافی می‌توان از آئین‌نامه‌ی RILEM TC 162-TDF (واندروال، ۲۰۰۰) بهره گرفت. همچنین، برای انتخاب آئین‌نامه طراحی قطعه می‌توان از توصیه‌نامه AFTES (آرتیگائو و ماسدو، ۱۹۹۳) که در رابطه با طراحی، ابعادبندی و اجرای قطعه‌های بتن

این آئین‌نامه پرداختند. آن‌ها یک روش جایگزین پیشنهاد کردند که با شرایط یافت شده در برخی تونل‌ها سازگاری دارد. پیامدهای هر دو رویکرد برای خط ۹ متروی بارسلونا، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده در یک برنامه آزمایشی با مقیاس کامل، ارزیابی شد. این مطالعه نشان داد که رویکرد جایگزینی الیاف با آرماتور ممکن است تحت شرایط خاصی منجر به کاهش مصرف الیاف شود.

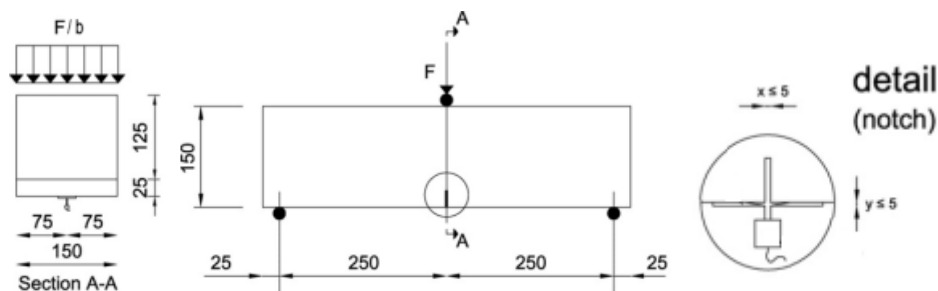
یکی از مسائلی که همواره در زمینه مهندسی به آن توجه شده، استفاده از مصالح ارزان‌تر و در عین حال با بازدهی بیشتر بوده است که منجر به انتخاب بهینه‌ترین گزینه می‌گردد. یکی از روش‌های آماری به منظور انتخاب گزینه بهینه، روش مبتنی بر فاصله (DBA¹) است. کومار و گرگ (۲۰۱۰) به بررسی بهینه‌ترین ماشین‌آلات موجود در صنعت با استفاده از روش مبتنی بر فاصله پرداختند. آن‌ها براساس ظرفیت باربری ماشین‌آلات، قابلیت استفاده مجدد، سرعت و هزینه ساخت اقدام به بهینه‌سازی نموده‌اند. مطابق نتایج به دست آمده از این تحقیق، ماشین‌آلاتی که دارای کم‌ترین هزینه ساخت و در عین حال ظرفیت باربری قابل قبولی بودند، به عنوان بهترین گزینه معرفی گردیدند. لازم به ذکر است که یک گزینه بهینه لزوماً در تمامی ویژگی‌ها در بهترین حالت قرار نمی‌گیرد. در یک تحقیق دیگر، ویدیانتو و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از روش مبتنی بر فاصله، بهینه‌ترین سیستم تولید برق قابل استفاده در تونل را معرفی نمودند. در این تحقیق، ویژگی‌هایی نظیر هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری سیستم، مصرف سوخت، حجم گاز دی‌اکسید کربن تولید شده و مقدار آب مصرفی، تعیین‌کننده گزینه بهینه بوده‌اند. در نهایت، محققین با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها یک نوع سیستم تولید برق را به عنوان گزینه بهینه انتخاب نموده‌اند. بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن پلیمری با استفاده از روش

مینگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر کامپوزیت الیاف فولادی و میلگردهای فلزی بر رفتار مکانیکی قطعات تونل پیش‌ساخته‌ی الیاف فولادی با مقیاس کامل ساخته شده برای تونل مترو در چین پرداختند، نتایج نشان می‌دهد که میلگرد طولی در ناحیه‌ی کششی در کاهش فشار کشش و انحراف در بخش میانی نسبت به الیاف فولادی کمک بیشتری کرده است. با این حال، الیاف فولادی در بهبود بار ترک‌خوردگی و مقاومت در برابر ترک بهتر عمل می‌کنند. علاوه بر این، الیاف فولادی سبب کاهش قابل توجه در عرض ترک شده‌اند و معیارهای طراحی برای توانایی حمل بار و عرض ترک را برآورده کرده‌اند. ترکیبی از الیاف و میلگرد فولادی نشانگر انتخاب بهینه‌ی تقویتی برای یک بخش تونل است. گنگ و همکاران (۲۰۱۷) تست‌هایی در مقیاس کامل برای بررسی ظرفیت تحمل نهایی بتن مسلح معمولی (RC) و اتصالات بتن مسلح به الیاف فولادی، در شرایط مختلف بارگذاری، با توجه ویژه به فرایند ترک‌خوردگی مربوطه، انجام دادند. نتایج تجربی نشان داد که ظرفیت تحمل بار اوج اتصالات بتن مسلح به الیاف فولادی کمی بیشتر از اتصالات RC بوده و علاوه بر این، اتصالات بتن مسلح به الیاف فولادی ظرفیت بارگذاری بیشتری برای ترک‌خوردگی اولیه دارد. همچنین، انعطاف‌پذیری کافی در بارگذاری فشاری، ظرفیت جذب انرژی بیشتر در ترک اولیه و کاهش قابل توجه در عرض ترک از ویژگی‌های دیگر بتن مسلح به الیاف فولادی است. شن و جیانگ (۲۰۱۸) به بررسی اثر زاویه‌ی الیاف با جهت تنش کششی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنظیم زاویه بین الیاف می‌تواند رشد ترک را به تأخیر بیاورد. همچنین، دریافتند که کاهش زاویه الیاف با جهت تنش کششی از ۹۰ درجه به ۳۰ درجه سبب افزایش ۲۴ درصدی ظرفیت کششی می‌شود. لیائو و همکاران (۲۰۱۵) برای بهبود طراحی قطعه‌های تونل، با توجه به آئین‌نامه‌ی Model code 2010، به بهبود شکل‌پذیری در

1- Distance-based approach

۲-۱. آئین نامه ی fib Model code 2010

با توجه به این که بهبود عملکرد کششی مهمترین ویژگی بتن های الیافی است، آزمون های مختلفی برای تعیین این رفتار در آئین نامه های مختلف مشخص گردیده است. در آئین نامه fib Model code 2010، آزمون خمش، با هدف تعیین رابطه بار-خیز به منظور به دست آوردن روابط تنش-بازشدگی ترک با استفاده از تحلیل معکوس توصیه می شود. همچنین، مقادیر اسمی مشخصات مصالح را می توان با انجام آزمایش خمش سه نقطه ای در یک تیر شیاردار مطابق دستورالعمل EN 14651 (۲۰۰۵) تعیین نمود. آزمایش های دیگر در صورتی که با ضرایب تصحیح با پارامترهای استاندارد EN 14651 (۲۰۰۵) مطابقت داده شوند، می توانند مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۱، جزئیات این آزمایش نشان داده شده است.



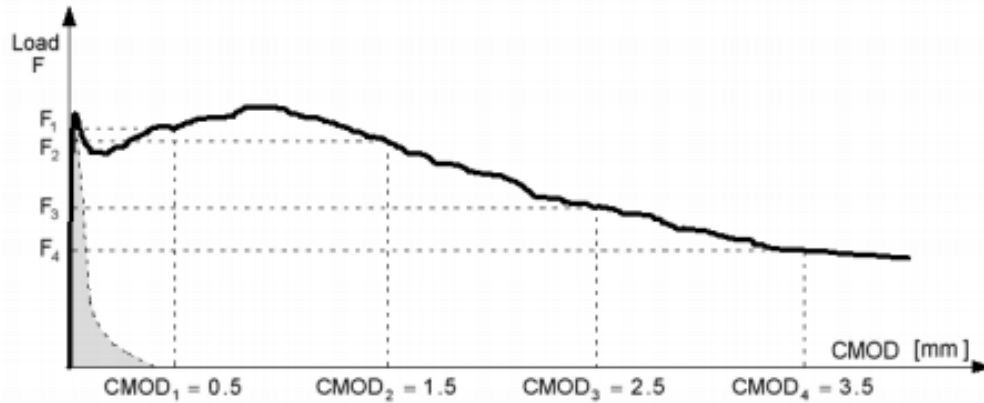
شکل ۱. جزئیات آزمایش استاندارد EN 14651 (۲۰۰۵)

DBA توسط مودی و همکاران (۲۰۱۸) صورت گرفت. آنها با استفاده از ویژگی های مکانیکی بتن شامل مقاومت های فشاری، کششی و خمشی و همچنین هزینه تهیه اپوکسی و لاتکس به عنوان مصالح پلیمری، بهینه ترین طرح اختلاط بتن پلیمری را معرفی کردند. با وجود تحقیقاتی که اخیراً در حوزه ی قطعه بتن الیافی صورت گرفته، تا کنون پژوهش جامعی به مقایسه ی این نوع قطعه با قطعه های متداول نپرداخته است. در این تحقیق، ابتدا به مطالعه ی رفتار قطعه های بتن الیافی در آئین نامه های بین المللی نظیر ACI، Fib و RILEM پرداخته شده است. سپس، ضمن طراحی قطعه تقویت شده با آرماتور و بررسی اثر افزودن الیاف فولادی، به مقایسه این دو نوع قطعه در دو حالت تقویت شده با استفاده از الیاف و آرماتور، براساس هزینه و مقاومت، مطابق روش مبتنی بر فاصله، پرداخته شده است.

۲. رفتار کششی قطعه های بتن الیافی

در این آئین نامه، تغییر شکل تیر به صورت بازشدگی دهانه ترک^۱ بیان می شود. نمودار نیروی اعمالی در مقابل بازشدگی دهانه ی ترک در شکل ۲ مطابق آئین نامه fib Model code (دی پریسکو و همکاران، ۲۰۱۳) نشان داده شده است.

^۱- Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)



شکل ۲. منحنی نیرو- بازشدگی وسط دهانه تیر بتنی ساده و الیافی (fib Model code، ۲۰۱۰)

الیاف فولادی با استفاده از معادلات (۲) تا (۴) به دست می‌آید.

$$f_{fctm,ax} = 0.3(f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$f_{fctk,ax} = 0.7f_{fctm,ax} \quad (3)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.7f_{fctm,fl} \quad (4)$$

در روابط فوق، f_{ck} مقاومت فشاری مشخصه (استوانه‌ای)، مقدار میانگین $f_{fctm,fl}$ و $f_{fctk,fl}$ مقاومت کششی خمشی مشخصه بر حسب N/mm^2 و E_{fcm} مدول الاستیسیته سکانتی بر حسب kN/mm^2 است. همچنین، پسوند (ax) اشاره به فشار محوری دارد. در جدول ۱، کلاس‌های مختلف مقاومتی بتن مسلح به الیاف فولادی بر اساس این آئین‌نامه ارائه شده است.

جدول ۱. کلاس‌های مختلف مقاومتی بتن مسلح به الیاف فولادی

C50/60	C45/55	C40/50	C35/45	C30/37	C25/30	C20/25	کلاس مقاومت
50	45	40	35	30	25	20	f_{ck}
6/8	6/3	5/8	5/3	4/8	4/3	3/7	$f_{fctm,fl}$
37	36	35	33/5	32	30/5	29	E_{fcm}

در انتهای پاسخ الاستیک- خطی مطابق شکل ۳ نشان داده شده است. طبق این دستورالعمل، زمانی که نقطه انتهای قسمت الاستیک خطی به طور واضح معلوم نباشد، حد تناسب بیشترین بار در خیز ۰/۰۵ میلی‌متر تعریف می‌شود.

مطابق رابطه موجود در آئین‌نامه fib Model code

(دی‌پریسکو و همکاران، ۲۰۱۳)، پارامتر $f_{R,J}$ نشان-دهنده‌ی مقاومت کششی خمشی پسماند است که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$f_{R,J} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

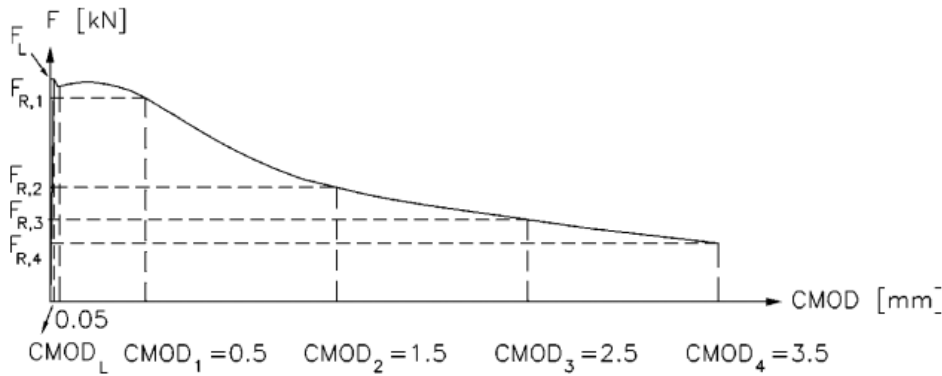
که در آن $f_{R,J}$ تنش پسماند در نقاط تعیین شده، F_j نیروی به دست آمده از خروجی تست در نقاط تعیین شده، L طول دهانه‌ی تیر، b عرض تیر نمونه و h_{sp} فاصله بین نوک شیار و بالای تیر است.

۲-۲. آئین‌نامه‌ی RILEM TC 162-TDF

در آئین‌نامه RILEM TC 162-TDF (واندروال، ۲۰۰۰)، مقاومت کششی خمشی و میانگین تخمینی بتن مسلح به

۲-۳. آئین‌نامه ACI 544.8R-16

بر اساس آئین‌نامه‌ی ACI 544.8R-16، پارامتر $f_{t,fl}$ مقاومت کششی خمشی بوده که به عنوان ماکزیمم تنش کششی خمشی در مقطع بحرانی، در یک سطح بار معادل، تعریف می‌شود. F_L حد تناسب باری است که



شکل ۳. منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (ACI 544.8R-16, ۲۰۱۶)

تونل از جمله نیروهای چک تراست و طراحی برای بارهای سرویس از جمله بارهای زمین و سرباره، تقسیم شده‌اند. مطابق آئین‌نامه ACI 544.7R-16 (۲۰۱۶) برای به‌دست آوردن نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی از معادلات استاتیک استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نمودار اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی در سه ناحیه مختلف A، B و C با توجه به نقاط بحرانی نمودار محاسبه می‌شود.

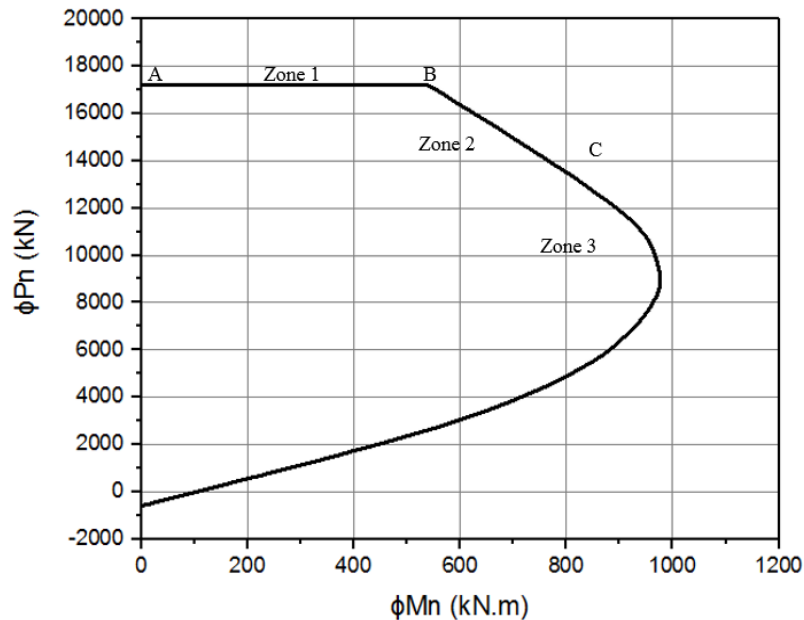
مطابق شکل ۴، مقاومت طراحی قطعه بتن مسلح الیافی در نواحی ۱ و ۲ تحت تأثیر مقاومت فشاری و در ناحیه ۳ مقاومت کششی است. همچنین، نقاط بحرانی A، B و C در شکل ۴ بر اساس پارامترهای طراحی کلیدی f'_c و σ_p محاسبه می‌شوند.

در این آئین‌نامه، مشابه مدول گسیختگی بتن معمولی f_r ، مقاومت کششی خمشی $f_{t,fl}$ با فرض توزیع تنش خطی در مقطع بحرانی به‌دست می‌آید. زمانی که تست تیر خمشی سه‌نقطه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، b و L به ترتیب عرض تیر و طول دهانه‌ی تیر می‌گیرند و h_n ارتفاع خالص مقطع، $f_{t,fl}$ مقاومت کششی خمشی مطابق با آئین‌نامه ACI 544.8R-16 (۲۰۱۶) به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$f_{t,fl} = \frac{3F_L L}{2bh_n} \quad (5)$$

۴-۲. آئین‌نامه ACI 544.7R-16

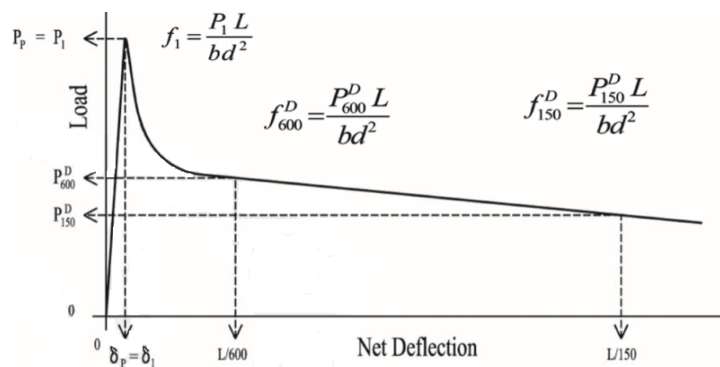
بارگذاری‌های ارائه شده در این آئین‌نامه به صورت خاص به سه بخش: طراحی برای بارهای مرحله تولید، ذخیره‌سازی و انتقال قطعه، طراحی برای بارهای ساخت



شکل ۴. نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی مقطع قطعه پیش ساخته بتن مسلح الیافی (ACI 544.7R-16, ۲۰۱۶)

و دیگر پارامترهای طراحی کلیدی شامل f_c (مقاومت ماکزیمم) و f_{600}^D (مقاومت خمشی پسماند در تغییر مکان خالص $L/600$) به دست می‌آید.

مطابق شکل ۵، این محاسبات به دنبال مطالعه پارامتریک روی اثر مقاومت خمشی پسماند f_{150}^D (مقاومت خمشی پسماند در تغییر مکان خالص $L/150$)



شکل ۵. نمودار بار- تغییر مکان خالص مقطع قطعه پیش ساخته بتن مسلح الیافی (ACI 544.7R-16, ۲۰۱۶)

میلی‌متر تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفته که نتیجه آن مطابق شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، آنها برای محاسبه‌ی عددی مدل رفتاری کششی بتن مسلح شده به الیاف با استفاده از نمودار حاصل از آزمایش بار-خیز، طی شش مرحله زیر رفتار کششی بتن مسلح شده به الیاف را بررسی نمودند:

- مرحله اول: تعیین ابعاد نمونه و روش آزمون

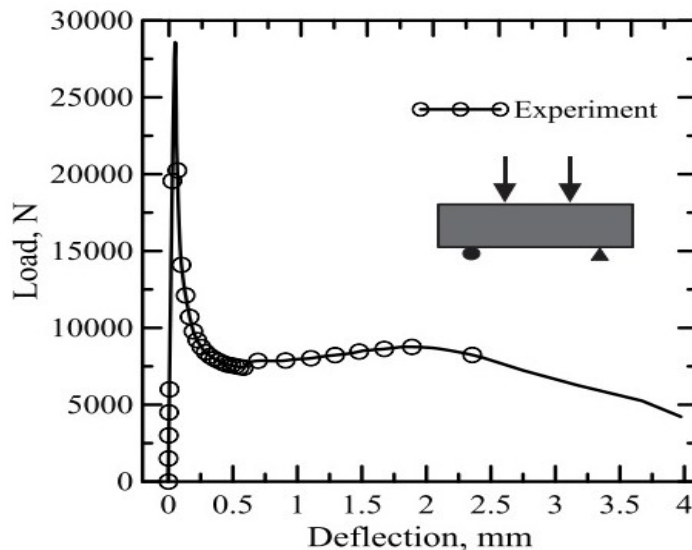
۳. صحت سنجی

۳-۱. رفتار کششی تیر بتن مسلح الیافی

برای راستی آزمایی روش تعیین رفتار کششی بتن مسلح الیافی، پژوهش مباشر و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی شده و نتایج آن با محاسبات به دست آمده مقایسه گردید. در این پژوهش تجربی، تیر بتن مسلح الیافی به ابعاد $150 \times 150 \times 600$ میلی‌متر و طول دهانه ۴۵۰

تحلیل و طراحی تونل پوشش دار با قطعات مرکب بتن مسلح الیافی: مطالعه ی موردی- تونل خط ۷ متروی تهران

- مرحله دوم: تعریف منحنی بار- خیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی
- مرحله پنجم: تعریف رفتار پس از ترک- خوردگی
- مرحله سوم: تعریف رفتار خطی متناسب با منحنی بار- خیز
- مرحله ششم: یکسان سازی رفتار مدل شبیه- سازی شده با نمونه ی آزمایشگاهی.
- مرحله چهارم: تعریف رفتار غیرخطی متناسب با منحنی بار- خیز



شکل ۶. منحنی تست خمش چهار نقطه‌ای مباشر و همکاران (۲۰۱۵)

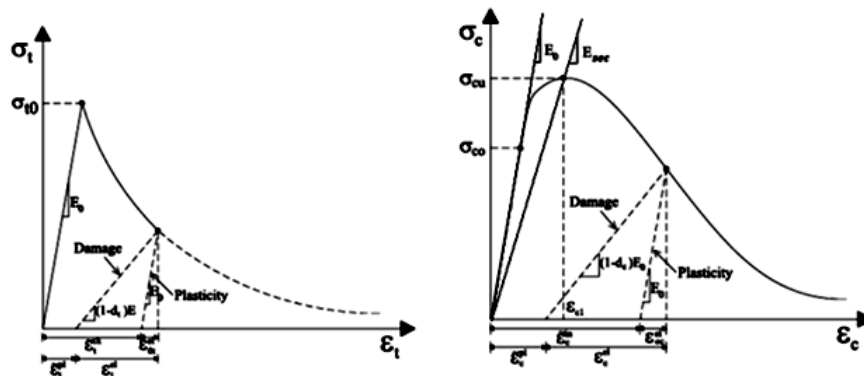
به منظور راستی‌آزمایی شبیه‌سازی عددی تیر مذکور، از مدل خرابی فشاری و کششی بتن^۱ ارائه شده در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در شکل ۷، رفتار کششی و فشاری بتن تحت این مدل نشان داده شده است. برای مدل‌سازی، پس از به‌دست آوردن متغیرهای بی‌بعد پارامتریک، اقدام به رسم نمودارهای تنش- کرنش کششی و فشاری می‌شود. برای این کار، از روابط (۶) و (۷) مطابق با تحقیق حافظ‌القرآنی اصفهانی و همکاران (۲۰۱۷) استفاده می‌گردد.

$$\varepsilon_t^{pl} = b_t \varepsilon_t^{in} \quad (6)$$

$$\varepsilon_t^{in} = \varepsilon_t - \sigma_t E_C^{-1} \quad (7)$$

در روابط فوق، ε_t^{pl} کرنش پلاستیک کششی، ε_t^{in} کرنش غیرالاستیک کششی، b_t ضریب خرابی کششی برابر ۰/۷ و d_t پارامتر خرابی کششی می‌باشد. در محاسبات عددی تنها تنش کششی بتن و پارامتر خرابی به همراه کرنش غیرالاستیک وارد نرم‌افزار می‌شود.

^۱ - Concrete Damage Plasticity (CDP)



شکل ۷. مدل خرابی فشاری و کششی بتن ارائه شده در نرم افزار آباکوس (حافظ القرآنی اصفهانی و همکاران، ۲۰۱۷)

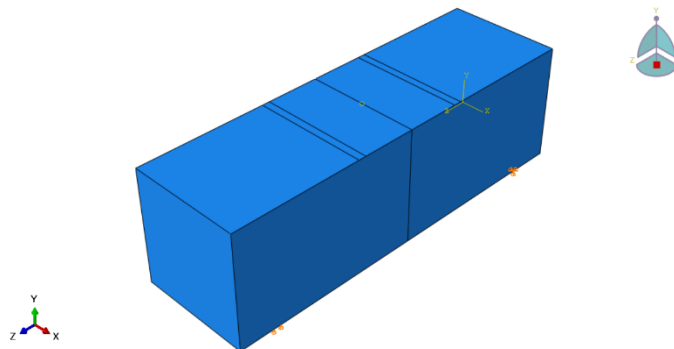
$$\sigma_c = \frac{f'_c \beta \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^\beta} \quad (10)$$

در روابط فوق، β کرنش کششی نرمال شده، σ_c تنش فشاری بتن و ϵ_0 کرنش فشاری بتن در بیشینه‌ی تنش است. در شکل ۸، تیر مدل‌سازی شده نشان داده شده است.

برای به دست آوردن رفتار فشاری، براساس تحقیق مباشر و همکاران (۲۰۱۵)، روابط (۸) تا (۱۰) بر اساس میزان الیاف (V_f) و مقاومت فشاری مشخصه بتن (f'_c) ارائه شده است:

$$\epsilon_0 = 0.00076 + [(0.626 \frac{f'_c}{f^*} - 4.33) \times 10^{-7}]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

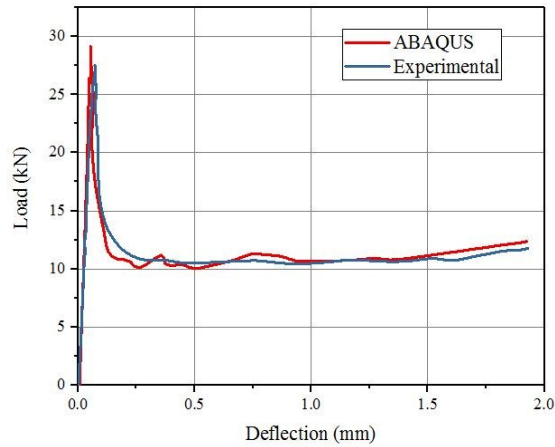
$$\beta = [0.0536 - 0.5754 V_f] f'_c \quad (9)$$



شکل ۸. تیر مدل‌سازی شده در نرم افزار آباکوس

خطای کمتر از ۷٪ را نشان می‌دهد. همچنین، اختلاف بارها در تغییر مکان‌های ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ میلی‌متر در دو نمودار به ترتیب برابر ۲/۱، ۰/۲ و ۰/۹ درصد بوده که همگی از مقدار خطای مجاز کمتر است. بنابراین، می‌توان بیان نمود که رفتار کششی تیر بتن مسلح الیافی با دقت خوبی شبیه‌سازی شده است.

پس از اعمال رفتار به نرم افزار عددی آباکوس و ایجاد شرایط مرزی مناسب با استفاده از مش ۲/۵ سانتی‌متر، تیر تحلیل عددی گردید. نتیجه‌ی تحلیل آباکوس و مقایسه آن با نمودارهای بار-خیز آزمایشگاهی در شکل ۹ آمده است. مطابق با این شکل، بار نهایی به دست آمده از تحلیل عددی و بررسی آزمایشگاهی به ترتیب ۲۹/۱ و ۲۷/۶ کیلونیوتن است که



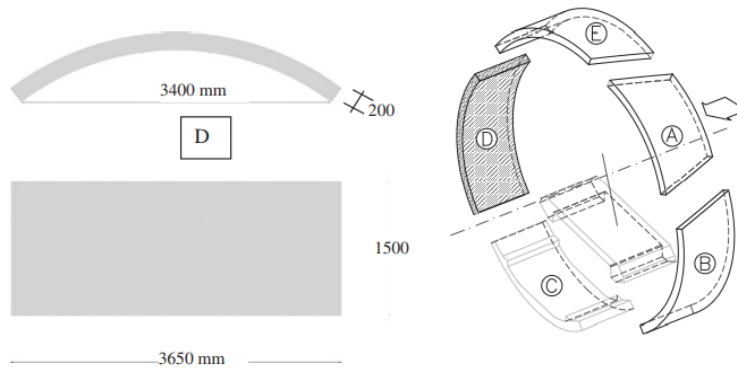
شکل ۹. مقایسه نمودارهای بار-خیز آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در آباکوس

۲-۳. قطعه بتن مسلح تحت بار خمشی

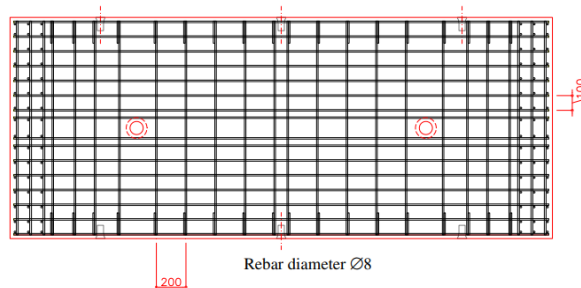
سه‌نقطه‌ای

در این قسمت، صحت‌سنجی قطعه تقویت شده با آرماتور بررسی شده است. برای راستی‌آزمایی، تحقیق آزمایشگاهی

کاراتلی و همکاران (۲۰۱۱) جهت بررسی رفتار خمشی قطعه‌های تونلی استفاده شده است. شکل ۱۰، تصویری از ابعاد تونل و قطعه است و در شکل ۱۱ جزئیات آرماتوربندی نشان داده شده است

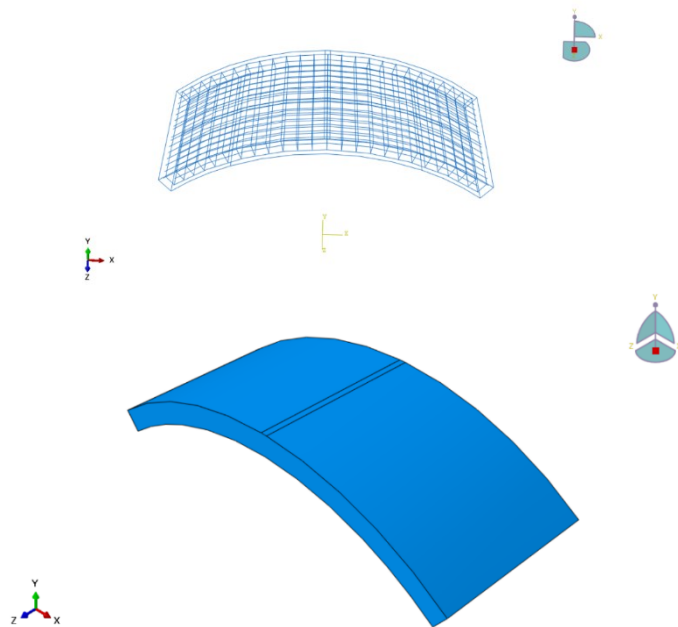


شکل ۱۰. ابعاد و هندسه تونل و قطعه مورد نظر برای آزمایش مورد نظر (کاراتلی و همکاران، ۲۰۱۱)



شکل ۱۱. جزئیات آرماتورگذاری در قطعه (کاراتلی و همکاران، ۲۰۱۱)

در شکل ۱۲، مدل عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس و نیز جزئیات آرماتورگذاری نشان داده شده است.

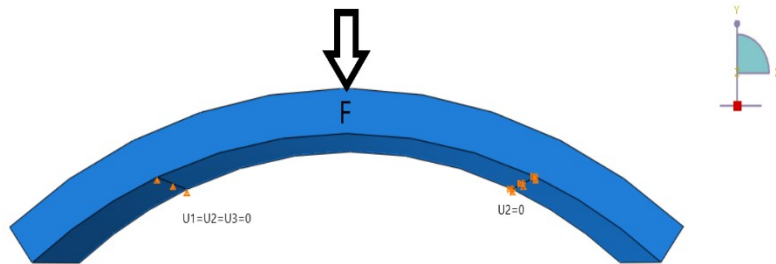


شکل ۱۲. هئندسه و آرماتور قطعه ایجاد شده در نرم افزار

همچنین، مصالح مصرفی در این صحت سنجی به شرح جدول ۲ تعریف شده است. در شکل ۱۳ نیز شرایط مرزی و بارگذاری نشان داده شده است.

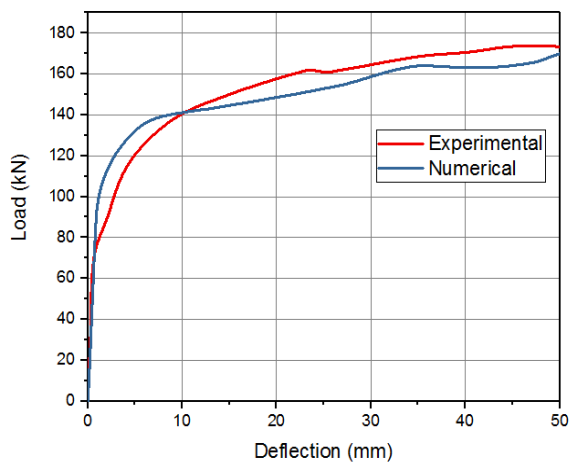
جدول ۲. مصالح مورد استفاده و مشخصات آنها

مقاومت فشاری بتن معمولی (مگاپاسکال)	نوع میلگرد مورد استفاده	قطر میلگرد (میلی متر)	مقاومت میلگرد (مگاپاسکال)
۵۰	S۳۰۰	۸	۳۰۰



شکل ۱۳. شرایط مرزی ایجاد شده در نرم افزار

مطابق شکل ۱۴، اختلاف بارها در تغییر مکان های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی متر در دو نمودار به ترتیب برابر ۱، ۶، ۳ و ۲ درصد بوده که همگی دارای خطای کمتر از ۷٪ است. بنابراین، نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی رفتار قطعه تقویت شده با آرماتور معمولی از تطابق نسبتاً مناسبی برخوردار است.



شکل ۱۴. صحت سنجی قطعه تقویت شده با آرماتور

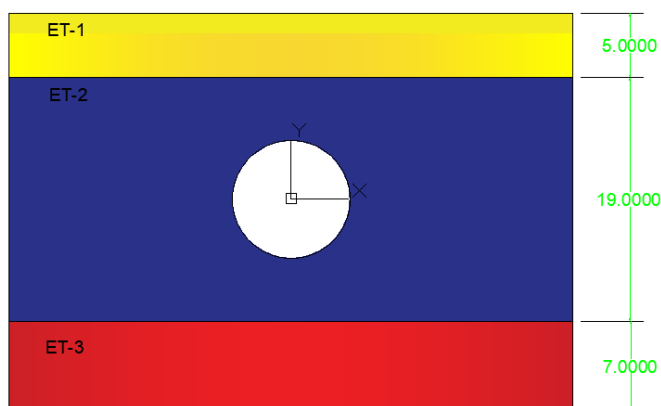
ضخامت آن به ترتیب برابر $1/5$ و $0/35$ متر که در پروفیل زمین مطابق شکل ۱۵ قرار گرفته است. این تونل با استفاده از شش قطعه با زاویه قطاع $56/85$ درجه و یک قطعه کلید با زاویه $18/90$ درجه ساخته شده است. مشخصات ژئوتکنیک خاک محل احداث تونل مطابق جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، در این شبیه سازی از سه نوع آرماتور استفاده شده در خط ۷ متروی تهران استفاده گردیده که در شکل ۱۶ مشاهده می شود.

۴. شبیه سازی عددی

۴-۱. مدل سازی هندسی

در این بخش، مدل سازی، تحلیل و طراحی تونل تحت بار زمین و سرباره بررسی می شود. تونل خط ۷ متروی تهران به عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده و بارهای طراحی تحت بار زمین و همچنین نمودارهای اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی با استفاده از آئین نامه ی ACI 544.7R-16 (۲۰۱۶) برای این تونل به دست آمده است.

قطر داخلی این تونل برابر $9/16$ متر، عرض و

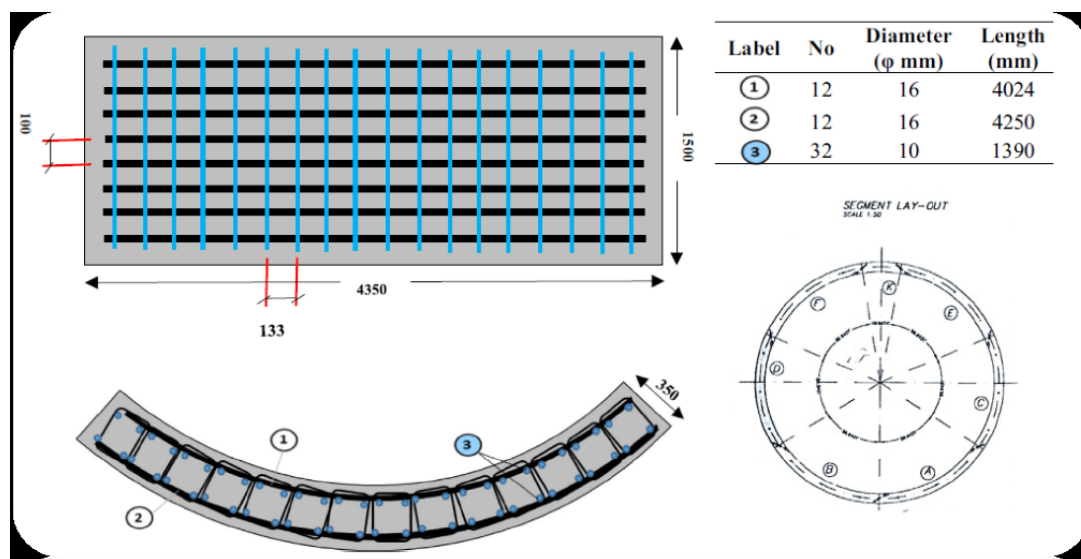


شکل ۱۵. پوشش قطعه ای تونل و پروفیل ژئوتکنیک پیرامون تونل

جدول ۳. مشخصات ژئوتکنیک خاک پیرامون تونل

ET-3	ET-2	ET-1	لایه ی خاک
------	------	------	------------

۳۰	۱۵	۳۱	چسبندگی (kPa)
۳۳	۳۳	۲۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰/۳۲	۰/۳	۰/۳۵	نسبت پواسن
۵۰	۷۰	۳۵	مدول الاستیسیته
۱/۹۰	۱/۸۴	۱/۷۰	وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)



شکل ۱۶. نقشه‌ی آرماتور قطعه خط ۷ متروی تهران


۲-۴. مدل‌سازی بتن الیافی

بنابراین، در این تحقیق از فوق روان کننده بر پایه پلی-کربوکسیلات به میزان ۰/۵ درصد وزنی سیمان استفاده و الیاف در چندین مرحله به مخلوط اضافه شده است تا از پخش یکنواخت الیاف در مخلوط اطمینان حاصل گردد.

به منظور جایگزینی الیاف فولادی با آرماتور، چهار طرح اختلاط بتن با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد حجمی الیاف در آزمایشگاه بررسی مقاومتی گردید. بدین منظور، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی برای نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. در جداول ۴ و ۵ به ترتیب مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی و نتایج مربوط به خواص مکانیکی آورده شده است. لازم به ذکر است که ملاحظات ویژه‌ای به منظور پخش یکنواخت الیاف در بتن صورت گرفت تا از تجمع الیاف در یک حجم معین از بتن جلوگیری شود. مطابق با تحقیقات صورت گرفته (طباطبائیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ خالو و همکاران، ۲۰۱۴)، استفاده از فوق‌روان‌کننده و افزودن الیاف در چندین مرحله از پدیده گلوله شدن^۱ جلوگیری می‌کند.

^۱ - Balling

جدول ۴. مشخصات الیاف فولادی مصرفی

مشخصات	الیاف فولادی	شکل ظاهری
شکل	قلابدار- موجدار	
طول (mm)	۵۰	
قطر (mm)	۰/۸	
نسبت طول به قطر	۶۲/۵	
وزن مخصوص	۷/۸۵	
مقاومت کششی (MPa)	۱۷۰۰	

جدول ۵. نتایج مربوط به خواص مکانیکی

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)		مقاومت کششی (MPa)		مقاومت خمشی (MPa)	
	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
۰/۵ درصد الیاف فولادی	۳۹/۸	۴۴/۲	۳/۶	۳/۹	۴/۳	۵/۳
۱/۰ درصد الیاف فولادی	۴۳/۰	۴۷/۸	۴/۵	۴/۹	۵/۷	۷/۰
۱/۵ درصد الیاف فولادی	۴۱/۹	۴۷/۵	۵/۵	۶/۳	۶/۷	۸/۲
۲/۰ درصد الیاف فولادی	۴۱/۰	۴۷/۱	۶/۴	۷/۸	۸/۰	۹/۰

استفاده بیش از ۱/۰ درصد الیاف در کنار آرماتورگذاری در قطعه‌های تونل‌سازی مقرون به صرفه نیست. از این رو، با توجه به نتایج آزمایشگاهی، در این تحقیق از دو نوع طرح اختلاط ۰/۵ و ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی برای بتن الیافی مطابق جدول ۶ استفاده شده است. مدل رفتاری این طرح‌ها بر اساس روابط تنش- کرنش آئین‌نامه‌ی ACI 544.8R-16 (۲۰۱۶) در نظر گرفته شده است.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته، نمونه‌های با ۱/۰ درصد الیاف فولادی دارای بیشترین مقاومت فشاری بودند و استفاده از الیاف فولادی به میزان ۱/۵ و ۲/۰ درصد مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی را همواره افزایش می‌دهند. استفاده بیش از ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی کارایی بتن را کاهش داده و پخش الیاف در مراحل ساخت قطعه را با مشکل روبه‌رو می‌کند. همچنین، به لحاظ اقتصادی،

جدول ۶. طرح اختلاط بتن الیافی در نظر گرفته شده

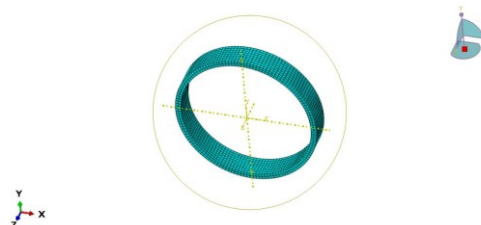
ترکیبات	درصد الیاف فولادی	نوع سیمان	مقدار سیمان (kg/m ³)	مقدار شن (kg/m ³)	مقدار ماسه (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان
۱	۰/۵	پرتلند تیپ ۲	۴۰۰	۶۳۲	۱۱۷۲	۰/۳۷۵
۲	۱/۰	پرتلند تیپ ۲	۴۰۰	۶۳۲	۱۱۷۲	۰/۳۷۵

خرابی پلاستیک بتن و همچنین مش‌بندی به ابعاد ۰/۵ واحد به صورت مستطیلی استفاده شده است. در شکل

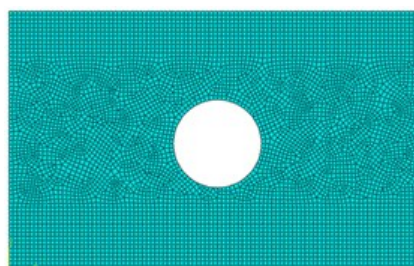
مدل‌سازی عددی قطعه بتن الیافی مطابق بخش ۳-۱ صورت گرفته است. بدین منظور، از مدل رفتاری

۱۰ سانتی متر در ۱۰ سانتی متر استفاده شده است.

۱۷، تصویر یک رینگ کامل تونل با استفاده از قطعه بتن الیافی مدل سازی شده در نرم افزار نشان داده شده است. همچنین، مدل سازی خاک اطراف تونل در نرم افزار آباکوس و با استفاده از المان S4R و با مش بندی به صورت شکل ۱۸ است.



شکل ۱۷. تصویر رینگ کامل تونل با استفاده از قطعه بتن الیافی مدل سازی شده در نرم افزار

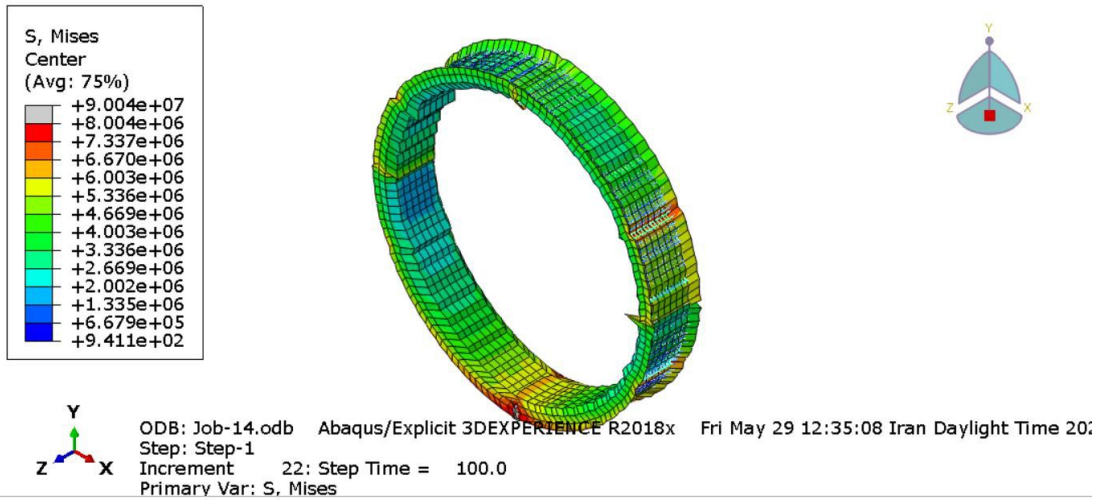


شکل ۱۸. مدل خاک و تونل شبیه سازی شده به صورت دوبعدی در نرم افزار آباکوس

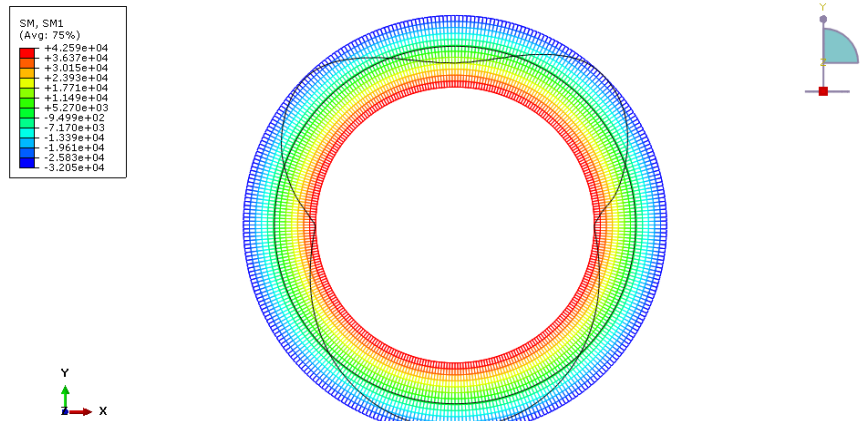
۳-۴. تحلیل عددی

به منظور اعمال بارهای طراحی به روش المان محدود، مشخصات سه نوع خاک ارائه شده در جدول ۳ با ابعاد مشخص شده در شکل ۱۵ وارد نرم افزار شده است. نیروی موجود در این مدل فقط نیروی گرانشی زمین است و شتاب جاذبه زمین برابر $9/81$ قرار داده شده است. تحلیل استفاده شده در این مدل از نوع ضمنی است. شکل ۱۹ تصویر یک رینگ از تونل در حال تحلیل عددی را نشان می دهد. پس از تحلیل انجام شده، لنگر خمشی ایجاد شده در تونل به صورت شکل ۲۰ است. همچنین، برای رفتار پلاستیک مدل شبیه سازی شده از مور- کولمب^۱ و از بیشینه اندازه المان

^۱ - Mohr-Coulomb



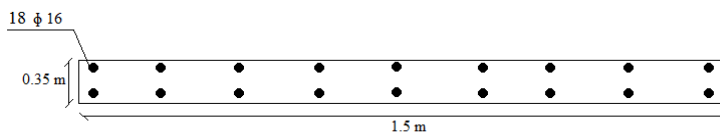
شکل ۱۹. نمودار لنگر خمشی داخلی پوشش تونل تحت بار زمین در نرم افزار آباکوس



شکل ۲۰. نمودار لنگر خمشی داخلی پوشش تونل تحت بار زمین در نرم افزار آباکوس

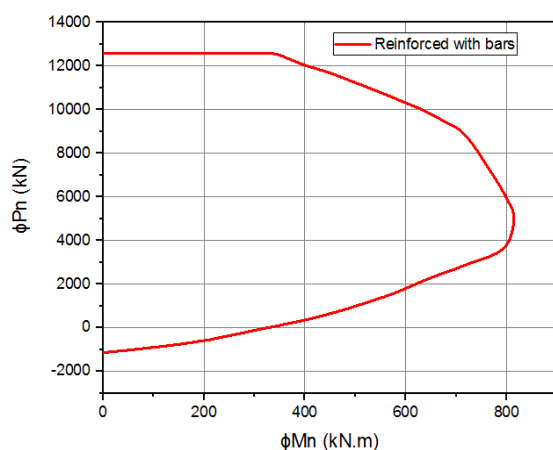
۴-۴. طراحی قطعه بتن الیافی در این بخش، نتایج تحلیل عددی قطعه‌های بتن الیافی آورده شده است. به دست آوردن نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی از موضوعات پر اهمیت در طراحی قطعه‌ها تحت بار زمین است. از این رو، جهت طراحی قطعه ابتدا اقدام به ترسیم نمودار اندرکنش شده است. برای طراحی از میلگرد ۱۶ نوع A1 استفاده شده که با توجه به کم بودن بار طراحی در مقابل مقاومت بتن‌آرمه در ابتدای طراحی، آرماتور حداقل برای قطعه در نظر گرفته می‌شود. آرماتور حداقل در مقاطع فشاری برابر ۰/۰۱ مساحت کل مقطع در نظر گرفته شده که با توجه به قطر آرماتور، چینی آرماتور در مقطع به صورت شکل ۲۱ است.

طراحی قطعه بتن الیافی در این بخش، نتایج تحلیل عددی قطعه‌های بتن الیافی آورده شده است. به دست آوردن نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی از موضوعات پر اهمیت در طراحی قطعه‌ها تحت بار زمین است. از این رو، جهت طراحی قطعه ابتدا اقدام به ترسیم نمودار اندرکنش شده است. برای طراحی از میلگرد ۱۶ نوع



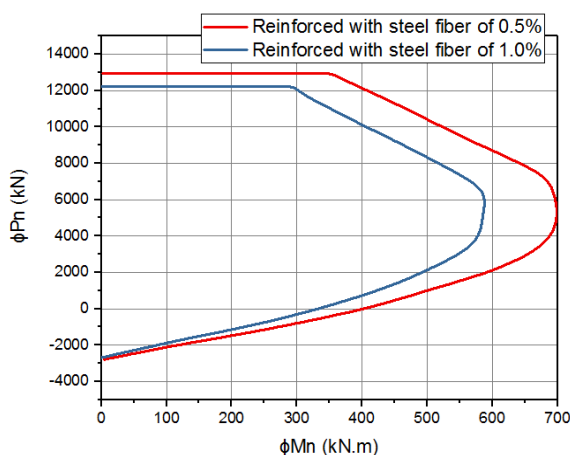
شکل ۲۱. مقطع قطعه با در نظر گرفتن آرماتور حداقل

با توجه به شکل فوق، مقطع و مصالح مصرفی در نرم افزار اجزای محدود، نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی به صورت شکل ۲۲ به دست می آید.



شکل ۲۲. نمودار اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی قطعه بتن مسلح با آرماتور

در مرحله بعد، با توجه به نتایج آزمایشگاهی، مقدار ۰/۵ و ۱/۰ درصد حجمی بتن جایگزین الیاف گردیده و مدل سازی عددی انجام گرفت. در این بررسی، ضریب کاهش محاسباتی در نرم افزار برابر ۰/۳۴ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲۳، نمودار اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی بر اساس عرض و ضخامت تونل با توجه به دو نوع طرح اختلاط بتن مسلح به الیاف فولادی نشان داده شده است.



شکل ۲۳. نمودار اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی قطعه بتن مسلح با آرماتور و الیاف فولادی

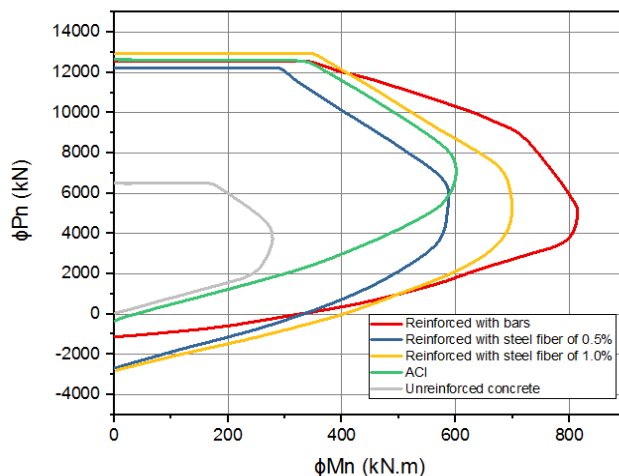
لنگر و نیروی محوری اسمی و طراحی به صورت جدول ۷ می باشد.

جدول ۷. بارهای به دست آمده از تحلیل اجزا محدود نرم افزار آباکوس

۵۱۸۹۰	لنگر اسمی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود (N.m)
۱۷۷۲۲۰	نیروی محوری اسمی به دست آمده از تحلیل اجزا محدود (N)
۶۴۸۶۲	لنگر طراحی با استفاده از ضرایب افزایش بار (۱/۲۵) (N.m)

الیاف مدل‌سازی گردید. در شکل ۲۴، مقایسه‌ای از نمودارهای اندرکنش قطعه مدل‌سازی شده با استفاده از مصالح بتن الیافی، بتن آرمه و بتن معمولی و نیز حداقل توصیه شده در آئین‌نامه ACI544.7R-16 مشاهده می‌شود.

به دلیل فاصله زیاد بارهای به‌دست آمده از تحلیل و مقاومت قطعه، این موضوع متبادر می‌شود که طراحی خیلی دست بالا در نظر گرفته شده است. اما این نکته حائز اهمیت است که قطعه با توجه به آرماتور حداقل طراحی شده است و با توجه به قوانین آئین‌نامه نمی‌توان کمتر از این مقدار در نظر گرفت. برای روشن شدن این موضوع، قطعه بتنی بدون استفاده از آرماتور و



شکل ۲۴. مقایسه نمودارهای اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی قطعه بتن مسلح مدل‌سازی شده

الیاف فولادی با آرماتور بهینه‌ترین حالت ممکن است.

۵. تحلیل اقتصادی

همانطور که در بخش مقدمه بیان شد، محققین در شاخه‌های مختلف مهندسی از روش مبتنی بر فاصله استفاده کرده‌اند. یکی از مسائلی که همواره در زمینه مهندسی به آن توجه شده، استفاده از مصالح ارزان‌تر و در عین حال با بازدهی بیشتر بوده که منجر به انتخاب بهینه‌ترین گزینه می‌گردد. روش مبتنی بر فاصله (DBA) یک روش آماری به منظور یافتن یک گزینه بهینه در میان تمام گزینه‌های موجود در یک فرآیند است. به منظور پیاده‌سازی روش DBA در یک مطالعه آماری n گزینه‌ای و دارای m ویژگی، یک گزینه به عنوان بهینه

با توجه به شکل ۲۴، قطعه مدل‌سازی شده با بتن معمولی تحت بارگذاری‌های اعمالی به هیچ‌عنوان پاسخگو نیست. با توجه به حداقل‌های مطرح شده در آئین‌نامه ACI544.7R-16، قطعه بتن مسلح مدل‌سازی شده با آرماتور بسیار محافظه‌کارانه خواهد بود. همچنین، همانطور که مشاهده می‌گردد، جایگزینی الیاف فولادی با آرماتور تأثیر چندانی بر ظرفیت فشاری قطعه نداشته است. از طرفی، در ناحیه کششی، وجود الیاف به جای آرماتور به دلیل پخش یکنواخت در سراسر مقطع منجر به افزایش ظرفیت کششی شده است. همچنین، جایگزینی ۰/۵ درصد الیاف فولادی با آرماتور، علیرغم کفایت در ناحیه فشاری و کششی، در ناحیه خمشی پاسخگو نیست. همانگونه که از نتایج آزمایشگاهی و عددی برمی‌آید، جایگزینی ۱/۰ درصد

که در آن CD_i فاصله مرکب هر گزینه تا وضعیت بهینه با توجه به خصوصیات معرفی شده برای آن است. گزینه بهینه در میان n حالت دارای کمترین فاصله مرکب است.

بر این اساس، در این تحقیق نیز سه روش مسلح‌سازی قطعه بتنی مطرح شده است. از آنجا که یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتخاب روش مسلح‌سازی، هزینه مورد نیاز جهت تأمین میلگرد و یا الیاف است، علاوه بر خصوصیات مکانیکی (ظرفیت فشاری، کششی و خمشی) هزینه تأمین یک قطعه بتنی به عنوان یک ویژگی به سه ویژگی مذکور اضافه شده است. در نهایت نیز سعی شده تا با استفاده از روش DBA یک روش مسلح‌سازی به عنوان روش بهینه معرفی شود. برای این منظور، خواص مکانیکی شامل ظرفیت فشاری، کششی و خمشی به همراه هزینه تأمین یک قطعه بتنی به عنوان ویژگی‌های روش‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۸، مقادیر معیار برای تمامی روش‌های مسلح‌سازی ارائه شده است.

در مرحله بعد، با استفاده از میانگین و انحراف معیار هر ویژگی، مقادیر استاندارد شده به دست می‌آید. در جدول ۹، این مقادیر ارائه شده است. در نهایت، فاصله مرکب برای کلیه روش‌های مسلح‌سازی قطعه بتنی مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. نتایج روش DBA در جدول ۱۰ ارائه شده است.

انتخاب می‌شود. این گزینه‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه، تحت عنوان ماتریس معیار به صورت رابطه ۱۱ (کومار و گرگ، ۲۰۱۰) قابل توصیف هستند.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & \dots \\ X_{21} & X_{22} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (11)$$

بنابراین، یک بردار در فضای m بعدی تشکیل می‌شود که n گزینه قابل بررسی را معرفی می‌نماید. این نکته باید اشاره شود که در هر یک از m ویژگی یک گزینه در بدترین وضعیت قرار دارد که برای تشکیل ماتریس معیار این خصوصیت برای آن گزینه صفر در نظر گرفته شده و مقدار عددی آن ویژگی برای سایر گزینه‌ها از قدر مطلق تفاضل بدترین وضعیت از مقدار ویژگی موجود در هر گزینه به دست می‌آید.

در مرحله بعد، می‌بایست فاصله بین مقادیر یک خصوصیت در تمام گزینه‌ها با بیشترین مقدار آن خصوصیت (مقدار بهینه) به دست آید. این کار منجر به تشکیل ماتریس دیگری به صورت زیر خواهد شد (کومار و گرگ، ۲۰۱۰):

$$\begin{bmatrix} Z_{op1} - Z_{11} & Z_{op2} - Z_{12} & \dots & \dots & -Z_{1m} \\ Z_{op1} - Z_{21} & Z_{op2} - Z_{22} & \dots & \dots & -Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{op1} - Z_{n1} & Z_{op2} - Z_{n2} & \dots & \dots & -Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

در ماتریس فوق، Z_{opj} بیشترین مقادیر عددی Z_{ij} در هر خصوصیت می‌باشند. در نهایت، فاصله مرکب (CD^1) برای هر گزینه تا وضعیت بهینه از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (کومار و گرگ، ۲۰۱۰):

$$CD_i = \left[\sum_{j=1}^m (Z_{opj} - Z_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

¹ - Composite Distance

جدول ۸. مقادیر معیار برای روش‌های مختلف مسلح‌سازی

هزینه آماده‌سازی یک قطعه (تومان)	خواص مکانیکی			روش مسلح‌سازی
	ظرفیت خمشی (kN.m)	ظرفیت کششی (kN)	ظرفیت فشاری (kN)	
۰	۲۳۰	۰	۴۰۰	بتن مسلح به آرماتور
۱۷۹۴۲۶۶	۰	۱۶۰۰	۰	بتن مسلح به ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی
۲۹۷۱۹۱	۱۱۰	۱۷۰۰	۸۰۰	بتن مسلح به ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی

جدول ۹. مقادیر استاندارد شده برای روش‌های مختلف مسلح‌سازی

هزینه آماده‌سازی یک قطعه (تومان)	خواص مکانیکی			روش مسلح‌سازی
	ظرفیت خمشی (kN.m)	ظرفیت کششی (kN)	ظرفیت فشاری (kN)	
-۰/۸۹	۱/۲۴	-۱/۴۱	۰	بتن مسلح به آرماتور
۱/۴۰	-۱/۲۱	۰/۶۴	-۱/۲۲	بتن مسلح به ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی
-۰/۵۱	-۰/۰۳	۰/۷۷	۱/۲۲	بتن مسلح به ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی

جدول ۱۰. نتایج روش DBA

بهترین حالت	Rank	CD	Sum	روش مسلح‌سازی
	۲	۳/۳۹	۱۱/۴۸	بتن مسلح به آرماتور
بتن مسلح به ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی	۳	۳/۴۶	۱۱/۹۸	
بتن مسلح به ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی	۱	۲/۳۰	۵/۲۷	

مطابق روش DBA، قطعه بتنی حاوی ۱/۰ درصد

۶. نتیجه‌گیری

در بحث طراحی قطعه‌های تونلی پیش‌ساخته، آئین-
نامه‌های مختلفی از جمله ACI.544.7R-16، ITA
WG2، AFTES روش‌های مختلفی ارائه کرده‌اند.

حجمی الیاف فولادی براساس ویژگی‌های مطرح شده
نظیر ظرفیت فشاری، ظرفیت کششی، ظرفیت خمشی و
هزینه آماده‌سازی قطعه به عنوان بهترین روش
مسلح‌سازی مطرح شده است.

الیاف فولادی است.

- از مقایسه نمودارهای اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی ظرفیت کششی قطعه‌های مسلح به الیاف فولادی ۲/۵ برابر قطعه مسلح به آرماتور است. همچنین، به لحاظ خمشی، ظرفیت قطعه‌های مسلح به الیاف فولادی ۱۴٪ کمتر از قطعه بتن مسلح است.

- نمودار اندرکنش بتن معمولی نشان‌دهنده آن است که امکان طراحی قطعه با استفاده از آن موجود نمی‌باشد. دلیل آن را می‌توان این موضوع دانست که با حداقل لنگر خمشی دچار شکست می‌شود که آن را در شکل می‌توان به طور کامل مشاهده کرد.

- مطابق روش DBA براساس ویژگی‌های ظرفیت فشاری، کششی، خمشی و هزینه آماده‌سازی، قطعه بتنی حاوی ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی، ضمن داشتن کمترین فاصله مرکب، به طور متوسط ۳۳٪ نسبت به قطعه بتنی حاوی ۰/۵ درصد الیاف و قطعه مسلح به آرماتور برتری دارد.

طراحی قطعه در این تحقیق بر اساس آئین‌نامه ACI.544.7R-16 انجام شده است. طراحی قطعه در حالت بار زمین و سرباره با توجه به مشخصات و ابعاد تونل خط ۷ مترو تهران انجام شد. در ادامه، طراحی قطعه با استفاده از بتن مسلح با آرماتور همراه با جایگزینی ۰/۵ و ۱/۰ درصد الیاف فولادی انجام شد. نتایج تحقیق به شرح زیر است:

- با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته، نمونه‌های با ۱/۰ درصد الیاف فولادی با مقاومت ۲۸ روزه ۴۷/۸ مگاپاسکال دارای بیشترین مقاومت فشاری بودند و استفاده از الیاف فولادی به میزان ۱/۵ و ۲/۰ درصد مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی را به ترتیب ۲ و ۳ برابر افزایش می‌دهد.

- از مقایسه نمودارهای اندرکنش نیروی محوری لنگر خمشی ظرفیت فشاری قطعه مسلح به ۱/۰ درصد حجمی الیاف فولادی به ترتیب ۴٪ و ۶٪ بیشتر از قطعه مسلح به آرماتور و قطعه مسلح به ۰/۵ درصد حجمی

۷. مراجع

- ACI 544. 7R-16. 2016. "Report on design and construction of fiber-reinforced precast concrete tunnel segments". American Concrete Institute.
- ACI 544. 8R-16. 2016. "Report on indirect method to obtain stress-strain response of fiber-reinforced concrete (FRC)". American Concrete Institute.
- Arnau, O. and Molins, C. 2011. "Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 26(6): 778-788.
- Banthia, N. and Islam S. 2013. "Loading rate concerns in ASTM C1609". J. Test. Eval., 41(6): 1032-1036.
- Barros, J. A. 2016. "Report on indirect method to obtain stress-strain response of fiber-reinforced concrete". American Concrete Institute.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z. and Romualdi, P. 2011. "Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 26(2): 284-291.
- DAUB Working Group. 2006. "Lining segment design: DAUB recommendation for the design, production, and installation of segmental rings".
- DBV-Recommendation (German Concrete Association).1994. "Design principles of steel fibre reinforced concrete for tunnelling works".
- De la Fuente, A., Pujadas, P., Blanco, A. and Aguado, A. 2012. "Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 27(1): 60-71.
- Di Prisco, M., Colombo, M. and Dozio, D. 2013. "Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: Principles, models and test validation". Struct. Concrete, 14(4): 342-361.
- EN14651. 2005. "Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)". BSI, London.
- Gong, C., Ding, W., Mosalam, K. M., Gunay, S. and Soga, K. 2017. "Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 68: 38-57.

- Grüebel, F. and Thewes, M. 2006. "Recommendations of the German working group on design and calculation of shield machines". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 21(3): 261.
- Hafezolzghorani Esfahani, M. H., Hejazi, F., Vaghei, R., Bin Jafar, M. S. and Karimzade, K. 2017. "Simplified damage plasticity model for concrete". *Struct. Eng. Int.*, 27(1): 68-78.
- ITA WG2. 2017. "GUIDELINES for the design of segmental tunnel linings". International Tunnelling and Underground Space Association.
- Khaloo, A., Molaei Raisi, E., Hosseini, P. and Tahsiri, H. 2014. "Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers". *Constr. Build. Mater.*, 51: 179-186.
- Kumar, R. and Garg, R. K. 2010. "Optimal selection of robots by using distance based approach method". *Robot. Comput-Integr. Manuf.*, 26: 500-506.
- Liao, L., de la Fuente, A., Cavalaro, S., Aguado, A. 2015. "Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 47: 200-210.
- Meng, G., Gao, B., Zhou, J., Gao, G. and Zhang Q. 2016. "Experimental investigation of the mechanical behavior of the steel fiber reinforced concrete tunnel segment". *Constr. Build. Mater.*, 126: 98-107.
- Mobasher, B., Yao, Y. and Soranakom, C. 2015. "Analytical solutions for flexural design of hybrid steel fiber reinforced concrete beams". *Eng. Struct.*, 100: 164-177.
- Moodi, F., Kashi, A., Ramezani-pour, A. A. and Pourebrahimi, M. 2018. "Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes". *Constr. Build. Mater.*, 191: 145-154.
- Ortigao, J. and Macedo, P. 1993. "Large settlements due to tunnelling in porous clay". Association Française des Tunnels et Ouvrages Souterrains (AFTES), Tunnels et Ouvrages Souterrains.
- Shen, J. and Jiang, C. 2018. "Mechanical performance of steel fiber lattice reinforced concrete structure". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Tabatabaeian, M., Khaloo, A., Joshaghani, A. and Hajibandeh, E. 2017. "Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC". *Constr. Build. Mater.*, 147: 497-509.
- Tiberti, G., Minelli, F. and Plizzari, G. 2014. "Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels". *Compos. Part B: Eng.*, 58: 199-207.
- Vandewalle, L. 2000. "Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete". *Mater. Struct.*, 33(225): 3-5.
- Widiyanto, A., Kato, S. and Maruyama, N. 2004. "Optimizing selection of appropriate power generation systems in indonesia by using distance based approach method". *J. Energy Resour. Tech.*, 126: 63-71.

