

### طراحی، ساخت و نصب سگمنت الیافی در پروژه تونل گلاب ۲

#### پژوهشی

بابک اشجع<sup>۱</sup>؛ حبیب‌اله احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- مدیرعامل؛ موسسه افق انرژی پایدار، قرب قائم، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)، ashja.babak@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد سازه؛ موسسه افق انرژی پایدار، قرب قائم، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)، habibullah.ahmadi68@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۱۲/۱۳

شماره صفحات: ۱۰۱ تا ۱۲۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2019.3878.1251

واژگان کلیدی	چکیده
سگمنت الیافی پیش‌ساخته	در چند دهه اخیر استفاده از الیاف در سازه‌های بتنی پیشرفت چشم‌گیری داشته است. با افزایش میزان تحقیقات و شناخت بیشتر در مورد الیاف، استفاده از آن در سازه‌های حساس از جمله، پوشش تونل‌ها نیز گسترش یافته است. در این پژوهش مراحل گوناگون طراحی، ساخت و نصب سگمنت الیافی در پروژه تونل گلاب ۲ ارائه می‌شود که در واقع اولین تجربه موفق استفاده از سگمنت الیافی به‌صورت کاربردی در کشور است. مزایای استفاده از الیاف در سگمنت بسیار زیاد است، از آن جمله می‌توان به کاهش میزان فولاد مصرفی در سگمنت، کاهش هزینه‌های مختلف تولید و اجراء، کاهش میزان باز شدگی ترک به کمک مکانیزم پل‌زدگی، افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی، کاهش نیروی انسانی مورد نیاز، افزایش مقاومت در برابر خستگی، افزایش میزان شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه، سرعت بالای اجرای تولید سگمنت به دلیل عدم نیاز به تولید سبک و غیره اشاره کرد؛ لذا توسعه استفاده از این تکنولوژی در پیشرفت هرچه بیشتر کشورمان تاثیرگذار خواهد بود.
بتن الیافی	
تونل آب	
تونل گلاب	
لاینینگ تونل	

#### ۱- پیش‌گفتار

مشخص و در راستای تنش‌های کششی وارده است. هنگامی که میزان خمش وارده و در نتیجه تنش کششی ناشی از آن مقدار زیادی نباشد، می‌توان به جای استفاده از آرماتور از قطعات کوتاه و جدا از هم به نام الیاف استفاده کرد که به‌صورت تصادفی توزیع شده و دارای جهت‌گیری تصادفی می‌باشند. استفاده از الیاف سبب می‌گردد که مقطع بتنی پس از ترک خوردگی نیز قابلیت باربری داشته و بتن با رفتار ترد و شکننده را به ماده‌ای نسبتاً انعطاف‌پذیر با قابلیت جذب انرژی بسیار زیاد تبدیل می‌کند (ACI544.7R-2016, 2016; DBV-Recommendation, 1992; CPH-2008, 2008; CNR DT 204/2006, 2006). علاوه بر ویژگی بالا،

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. اقتصادی بودن، دسترسی آسان به اجزای تشکیل‌دهنده، بالا بودن مقاومت فشاری این مخلوط و مزایای دیگر، باعث توجه روز افزون به آن شده است. بتن به عنوان ماده‌ای که ساختار اصلی بیشتر سازه‌ها از قبیل، پل‌ها، سدها، تونل‌ها، روسازی فرودگاه‌ها و اسکلت سازه‌ها و غیره را تشکیل می‌دهد، دارای مقاومت فشاری زیاد و مقاومت کششی کم بوده و به همین علت دارای شکل‌پذیری کم و تردی زیاد است. سنتی‌ترین راهکار مرتفع ساختن این مشکل، استفاده از میلگردهای فولادی در نقاط

بواسطه بیرون کشیدگی تک تک الیافها، یا گسیختگی آنها میزان قابل توجهی از انرژی تلف می‌شود، این موضوع سبب استفاده از الیاف در سازه‌های ضد انفجاری و سازه‌های دفاعی می‌شود (ACI544.7R-2016, 2016).

ح- افزایش مقاومت در مقابل تنش‌های ناشی از خستگی (CNR DT 204/2006, 2006;

خ- افزایش مقاومت در مقابل تورق و سایش سطحی بتن، این موضوع در پروژه تونل انتقال آب از اهمیت بیشتری برخوردار است (CNR DT 204/2006, 2006; CPH-2008, 2008).

د- کاهش میزان انقباض، جمع‌شدگی و خزش بتن، این موضوع سبب افزایش مقاومت بتن در برابر این رفتار ذاتی بتن می‌شود (CNR DT 204/2006, 2006; CPH-2008, 2008).

ذ- کاهش میزان نیروی انسانی مورد نیاز به علت عدم نیاز به تولید سبک و یا کاهش میزان وزن سبک مورد استفاده در سگمنت.

ر- صرفه‌جویی در میزان تجهیزات مورد نیاز کارخانه سگمنت به علت عدم نیاز و یا کاهش میزان جوشکاری، خم و برش آرماتورهای مورد نیاز برای تولید سبک مصرفی در سگمنت.

ز- کاهش میزان تاسیسات مورد نیاز کارخانه سگمنت به علت حذف و یا کاهش میزان جوشکاری و به تبع آن کاهش مقدار برق مصرفی کارخانه سگمنت.

س- صرفه‌جویی در فضای کارخانه سگمنت به علت عدم نیاز به تولید سبک و دپوی آن، در صورت حذف سبک مورد نیاز در سگمنت.

ش- افزایش چشمگیر مقاومت تونل در برابر آتش-سوزی، لازم به ذکر است، این موضوع در تونل‌های انتقال آب مانند تونل گلاب اهمیت کمتری خواهد داشت (ACI544.7R-2016, 2016; CNR DT 204/2006, 2006; CPH-2008, 2008; DBV-Recommendation, 1992; RILEM TC 162-TDF, 2003).

ص- کاهش میزان چشمگیر در مصرف فولاد، منظور از فولاد به هر شکل آرماتور یا الیاف است، این موضوع از دید کلان باعث صرفه‌جویی اقتصادی از یک سو و کاهش مسائل زیست‌محیطی ناشی از کاهش تولید فولاد از سوی دیگر

بتن الیافی مزایای زیادی نسبت به بتن ساده یا همان بتن بدون آرماتور دارد که برخی از آنها در زیر ذکر می‌شود.

الف- باربری مقطع پس از ترک‌خوردگی آن، عبارتی ایجاد مقاوم پسماند در مقطع، این موضوع سبب می‌شود از الیاف به عنوان یک المان استراکچرال استفاده گردد و سبب بهبود رفتار سازه مورد نظر می‌شود. این ویژگی اغلب امکان حذف بخش قابل توجهی از آرماتورها را فراهم می‌سازد (ACI544.7R-2016).

ب- مقاومت کششی مستقیم و مقاومت در برابر کشش ناشی از خمش مقطع، بسته به میزان الیاف مصرفی، تا حدودی بهبود می‌یابد (CNR DT 204/2006, 2006; CPH-2008, 2008; Hameed, etal, 2010; Bakhshi & Nasri, 2014).

پ- مقاومت برشی مقطع نسبت به بتن ساده بسته به میزان الیاف مصرفی، تا حدودی بهبود می‌یابد (Plizzari & Tiberti, 2006).

ت- افزایش مقاومت در برابر بارهای دینامیکی به ویژه بارهای ضربه‌ای، سگمنت‌های ساخته شده در چندین مرحله دست به دست می‌شود و این موضوع سبب می‌گردد، در مراحل مختلف متحمل ضربات متعددی شود که بتن مسلح به الیاف کفایت لازم برای مقابله در برابر بارهای وارده را خواهد داشت (Plizzari & Tiberti, 2006; Plizzari & Tiberti, 2007; Arnau & Molins, 2011).

ث- افزایش قابل توجه مقاومت مقطع در مقابل رشد بازشدگی ترک‌ها بوسیله مکانیسم پل‌زدگی روی ترک (این ویژگی باعث کاهش میزان نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام مقطع می‌شود) همچنین از آنجا که الیاف فولادی عرض ترک‌ها را محدود می‌کنند، اکسیداسیون الیاف و آرماتور موجود در مقطع به تاخیر خواهد افتاد (Arnau & Molins, 2011; ITAtech, 2015; RILEM TC 162-TDF, 2003).

ج- کاهش تعداد ترک‌های بزرگ (با بازشدگی زیاد) و جلوگیری از لب‌پریدگی به علت وجود الیاف در تمام نقاط، حتی در نزدیکترین نواحی به سطوح رویه سگمنت، درصد قابل توجهی از سگمنت‌های اوتی از این دسته است (Kooiman, 2000).

چ- افزایش توانایی مقطع در میزان جذب انرژی، مکانیسم جذب انرژی در بتن الیافی بدین شکل است که

سنگ‌های دربرگیرنده تونل، عمدتاً از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی کنگلومرای خاکستری (*MDcl*)، کنگلومرای قرمز (*Mc*)، شیل (*Dshl*) و شیل‌گرافیتی (*Msh*) و در مترهای خاصی از زون خرد شده (*CZ*) تشکیل یافته است. در جدول ۲، مترها شروع، پایان و طول حفاری در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی پروژه تونل انتقال آب گلاب ۲، نشان داده شده است (*Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014*).

جدول ۱- مشخصات تونل انتقال آب گلاب ۲

مشخصات	مقدار
کاربری تونل	تونل انتقال آب
طول تونل اصلی	۹۹۶۹ متر
قطر حفاری	۴/۵۲ متر
قطر خارجی سگمنت	۴/۳۰ متر
قطر داخلی سگمنت	۳/۸۰ متر
نوع سگمنت	هگزگونال
ضخامت سگمنت	۲۵ سانتی‌متر

است (*ITAtch Activity Group Support, 2015*)  
 ض- صرفه مالی و اقتصادی سگمنت الیافی نسبت به سگمنت بتن‌آرمه (*ITAtch Activity Group Support, 2015*)

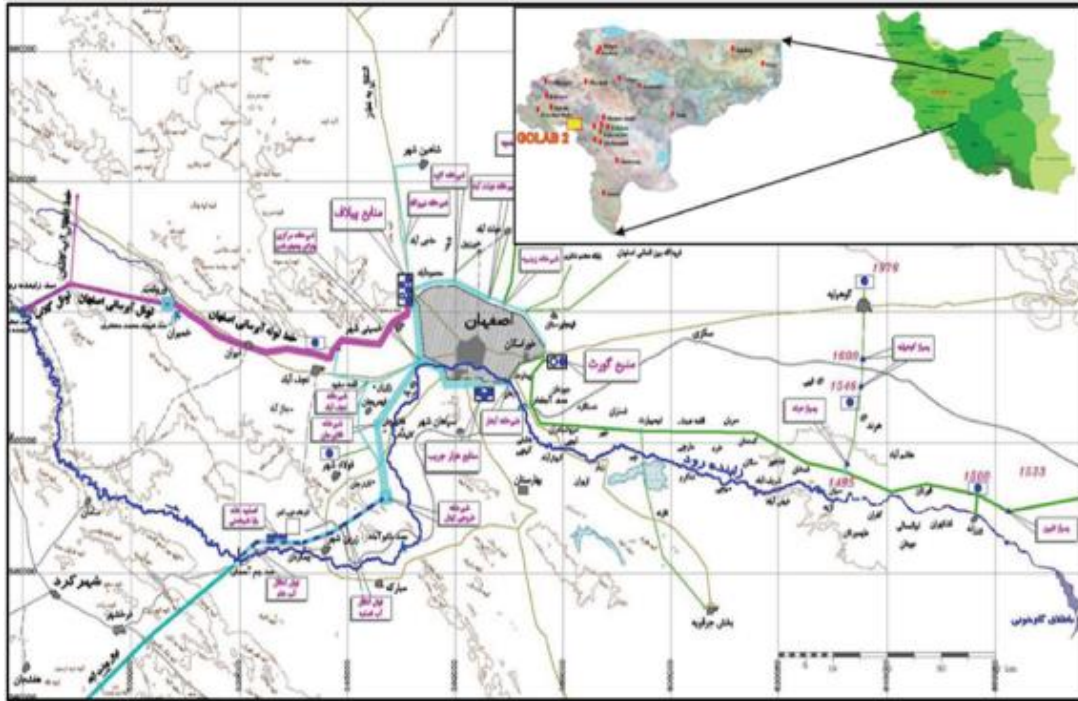
ط- سرعت بالای اجرای سگمنت الیافی نسبت به سگمنت بتن‌آرمه.  
 پروژه گلاب با هدف انتقال آب از رودخانه زاینده رود به کاشان تعریف شده است. بخشی از پروژه که توسط قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء(ص) احداث گردید، دارای تونل اصلی به طول حدود ۱۰ کیلومتر، حدود ۱/۵ کیلومتر تونل دسترسی و ایستگاه پمپاژ زیرزمینی است. آب پس از عبور از تونل اصلی به محل ایستگاه پمپاژ منتقل شده و از آنجا به وسیله خط لوله ۱۵۰۰ میلی‌متری نصب شده در تونل دسترسی به تصفیه خانه ساخته شده در محل دهانه ورودی تونل دسترسی پمپ شده و در ادامه مسیر به وسیله خط لوله به کاشان و شهرهای عبوری منتقل می‌شود. در جدول ۱، مشخصات هندسی تونل اصلی پروژه گلاب ۲، نشان داده شده است.

جدول ۲- مترها شروع، پایان و طول حفاری واحدهای زمین‌شناسی (*Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014*)

مترها رخمون تونل	کیلومترها بر خورد با تونل		واحد	
	تا	از	زمین‌شناسی مهندسی	زمین‌شناسی
۳۸۳	۰۰+۳۹۸	۰۰+۰۰	<i>MDcl</i>	$Ec^{l-s1}$
۴۹	۰۰+۴۴۷	۰۰+۳۹۸	<i>Mc</i>	$Pc^g$
۴۹	۰۰+۴۹۶	۰۰+۴۴۷	<i>Pscml</i>	$Pc^r$
۴۸	۰۰+۵۴۴	۰۰+۴۹۶		
۲۰۱۱	۵+۵۵۶	۳+۵۴۵	<i>Msh</i>	$K_{km}^m$
۶۴	۸+۲۹۲	۸+۲۲۸		
۲۹۵۶	۳+۵۴۵	۰۰+۵۴۴		
۲۶۷۲	۸+۲۲۸	۵+۵۵۶	<i>Dshl</i>	$K_{km}$
۲۲۷۲	۱۰+۵۶۴	۸+۲۹۲		
	۰۰+۰۵۹	۰۰+۰۵۴		
	۰۰+۱۱۷	۰۰+۱۱۲		
	۰۰+۲۲۳	۰۰+۲۱۸		
	۰۰+۷۷۴	۰۰+۷۵۴		
۶۰	۰۰+۹۶۹	۰۰+۹۶۴	<i>CZ</i>	-
	۱+۳۳۴	۱+۳۲۹		
	۱+۵۷۴	۱+۵۶۹		
	۱+۹۹۷	۱+۹۹۲		

خوبی نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۱، نیز موقعیت مکانی پروژه آبرسانی به اصفهان بزرگ و همچنین تونل‌های گلاب به



شکل ۱- موقعیت و پلان کلی محدوده پروژه (Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)

تلاش‌های ایجاد شده گردید. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، میزان لنگرهای وارده نسبت به نیروهای محوری فشاری وارده کم بوده و یا عبارتی مقطع در اکثر حالات تحت تنش‌های فشاری است، پس از اطمینان از این موضوع ساخت آزمایشگاهی نمونه‌های بتن الیافی برای تعیین طرح اختلاط مناسب و کارا و همچنین انجام آزمایش‌های مختلف صورت گرفت. در این مرحله از ۷ نمونه الیاف مختلف با جنس، شکل و ابعاد مختلف استفاده گردید. پس از انجام آزمایش‌ها طرح‌هایی انتخاب شد که حداقل شرایط لازم را برای باربری مورد نظر داشتند، پرواضح است، مسائل اقتصادی نیز در این مرحله، از پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب طرح اصلی بوده است. بررسی‌های اولیه منجر به در لحاظ گرفتن سه گزینه به صورت زیر شد.

الف- استفاده از الیاف پلیمری میکرو (به میزان ۱ کیلوگرم) و الیاف پلیمری ماکرو (به میزان ۵ کیلوگرم) به صورت همزمان به همراه استفاده از یک سبد به وزن تقریبی ۲۵ کیلوگرم.

از آنجا که مقطع تونل گلاب، مقطعی دایره‌ای است و به‌طور معمول در مقاطع دایره‌ای اغلب تنش‌ها به صورت شعاعی اعمال گشته و در نتیجه برآیند آن‌ها به صورت نیروی محوری فشاری ظاهر می‌شود، لذا معمولاً میزان تنش کششی بوجود آمده در مقطع کم بوده و این موضوع استفاده از بتن الیافی برای لاینینگ این مقاطع را ممکن می‌سازد، علاوه بر این موضوع قطر کم تونل (حدود ۴/۵ متر) و جنس زمین در این منطقه، موجب گردید، بررسی این موضوع در دستور کار قرار گیرد. از آنجا که حفاری تونل گلاب با استفاده از ماشین حفار است، لذا پوشش آن نیز به کمک قطعات پیش‌ساخته اجرا می‌شود. این قطعات از ساخت تا نصب مراحل مختلفی را طی می‌کنند. در تمامی این مراحل باید مقطع به‌طور کامل مقاومت لازم برای مقابله با بارهای اعمالی را داشته باشد.

پس از تعیین بارهای وارده بر مقطع تونل گلاب و استخراج بحرانی‌ترین تلاش‌های ایجاد شده در سازه به کمک نرم‌افزار SAP2000 اقدام به طراحی سازه تحت

الیاف استیل و پلی‌پروپیلن مورد استفاده در پروژه گلاب نشان داده شده است. در کنار مشخصات الیاف، مشخصات ماتریس سیمانی نیز برای مقایسه آسان‌تر ارائه شده است. به اختلاف مقادیر مدول الاستیسیته‌ها توجه گردد.



شکل ۴- الیاف میکرو پلی‌پروپیلن مصرفی در پروژه

در شکل ۵ بتن ساخته‌شده از مصالح موجود در کارگاه و الیاف فولادی نشان داده شده است. توزیع یکنواخت الیاف و یکپارچگی مناسب بتن به خوبی دیده می‌شود؛ همچنین در شکل ۶، سبد مصرفی در سگمنت الیافی (طرح‌های ۱ و ۲) نشان داده شده است. علت استفاده از این سبدها، تقویت دو ضلع (یال) بلند طولی (محل تماس باکفشک جک‌های اعمال بار) و ایجاد محصورشدگی در آن ناحیه از سگمنت برای مقابله با بار جک‌ها و بارهای وارده حین بهره‌برداری است (Bakhshi & Nasri, 2014).

## ۲- عملیات آزمایشگاهی

به‌منظور تعیین مشخصات مکانیکی گزینه‌های مورد نظر، آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. از جمله آزمایش‌های انجام شده می‌توان به آزمایش فشاری تک محوره، آزمایش خمش نمونه منشوری (به‌منظور تعیین مقاومت پسماند) و آزمایش کشش برزیلی نمونه استوانه‌ای اشاره کرد. قابل ذکر است، ویژگی‌های بتن الیافی برای مقایسه در جدول ۳، به‌طور کامل آورده شده است.

ب- استفاده از الیاف پلیمری میکرو (به میزان ۱ کیلوگرم) و الیاف پلیمری ماکرو (به میزان ۲۰ کیلوگرم) به‌صورت همزمان به همراه استفاده از یک سبد به وزن تقریبی ۲۵ کیلوگرم.

پ- استفاده از الیاف پلیمری میکرو (به میزان ۱ کیلوگرم) و الیاف فلزی ماکرو (به میزان ۳۰ کیلوگرم) به‌صورت همزمان بدون استفاده از سبد.

در شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴، سه نوع الیاف مورد استفاده در واریانت‌های فوق‌الذکر، نشان داده شده است.



شکل ۲- الیاف فلزی مصرفی در پروژه



شکل ۳- الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن مصرفی در پروژه

در جدول ۳، مشخصات اصلی هندسی و مکانیکی



جدول ۳- مقادیر پارامترهای مکانیکی الیاف مصرفی

الیاف	قطر ( $\mu m$ )	چگالی ( $ton/m^3$ )	مدول الاستیسیته ( $Gpa$ )	مقاومت کشش نهایی ( $Mpa$ )	درصد ازدیاد طول (%)
فلزی	۸۰۰	۷/۸۵	۲۰۰	۱۲۰۰	۴
ماکرو پلی پروپیلن	۵۰۰	۰/۹۱	۵	۴۰۰	۸
میکرو پلی پروپیلن	-	۲/۵	۱۰-۴۵	۳/۷	۰/۰۲

این موضوع را تایید کردند. در شکل ۷ و شکل ۸ آزمایش‌های فشاری انجام شده بر نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، الیاف از خردشدگی بتن به خوبی جلوگیری می‌کند.



شکل ۵- بتن ساخته شده با الیاف فولادی در پروژه



شکل ۷- نمونه مکعبی بتن الیافی تحت فشار تک‌محوره



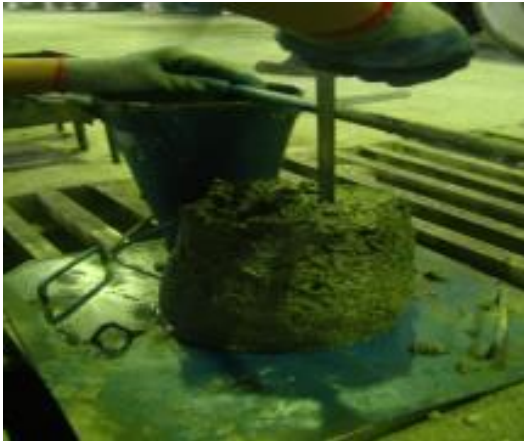
شکل ۶- سبد مورد استفاده در سگمنت الیافی در پروژه گلاب



شکل ۸- نمونه مکعبی بتن الیافی گسیخته شده تحت فشار تک‌محوره

## ۲-۱- آزمایش فشاری تک‌محور (BS-EN 12390-3)

مصرف الیاف عمدتاً تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن نخواهد داشت و گاهی در مقادیر بالای مصرف الیاف، به علت افزایش میزان هوای موجود در بتن، کاهش مقاومت فشاری نیز مشاهده گردیده است، لذا آزمایش‌های صورت گرفته نیز



شکل ۱۰- آزمایش اسلامپ

#### ۲-۴- آزمایش خمشی تیر منشوری (ASTM C1609)

اصلی‌ترین دلایل استفاده از الیاف قابلیت باربری پس از ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی ناشی از آن است. نتایج آزمایش‌ها این موضوع را نیز تایید می‌کنند که در شکل ۱۱، نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، میزان مقاومت ترک‌خوردگی تغییرچندانی نکرده، علت این موضوع آن است که در واقع عملکرد اصلی الیاف پس از ترک خوردگی ماتریس است و انتقال تنش به الیاف آغاز می‌شود. در شکل ۱۲، توزیع یکنواخت الیاف در مقطع گسیختگی نمونه منشوری نشان داده شده است، همان‌طور که دیده می‌شود، قلاب همه الیاف‌ها حین باربری پس از ترک‌خوردگی بتن صاف شده و سبب استهلاک انرژی و ایجاد باربری در مقطع گردیده است.



شکل ۱۱- نمونه منشوری بتن مسلح به الیاف فلزی گسیخته شده تحت خمش

#### ۲-۲- آزمایش کشش برزیلی (ASTM C496)

برای تعیین میزان مقاومت کششی شکاف خوردگی مقطع از این آزمایش استفاده شده است. این مقاومت معیاری از مقاومت کششی بتن بوده و از این طریق امکان تعیین مقاومت ترک‌خوردگی بتن (با استفاده از روابط تحلیلی) در مراحل مختلف بارگذاری وجود دارد. قابل ذکر است، با توجه به این موضوع که الیاف با جلوگیری از رشد میکروترک‌ها، گسیختگی مقطع را کمی به وقفه می‌اندازد، لذا بهبود این مقاومت انتظار می‌رفت که توسط آزمایش‌ها نیز مورد تایید قرار گرفت. شایان ذکر است، اساسا هدف از افزودن الیاف، افزایش میزان مقاومت کششی یا ترک‌خوردگی نبوده و عمدتا در مقادیر پایین مصرف بهبود چشمگیری نیز حاصل نمی‌شود؛ دلیل اصلی افزودن الیاف، افزایش میزان جذب انرژی و قابلیت باربری پس از ترک‌خوردگی است. نمایی از این آزمایش در شکل ۹، نشان داده شده است.



شکل ۹- نمونه‌های استوانه‌ای عمل‌آوری شده با بخار برای آزمایش برزیلی

#### ۲-۳- آزمایش اسلامپ (ASTM C143)

با توجه به رفتار خاص بتن الیافی، استفاده از آزمایش اسلامپ برای تعیین کارایی آن مناسب نمی‌باشد، لیکن آزمایش اسلامپ به‌علت سادگی و عدم نیاز به تجهیزات خاص، همچنان برای تعیین کارایی بتن الیافی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، با اضافه شدن الیاف به بتن میزان کارایی آن کاهش یافته و لذا این مشکل به وسیله استفاده از فوق روان‌کننده‌ها و تغییر دانه‌بندی مصالح برطرف گردید. نمایی از این آزمایش در شکل ۱۰، نشان داده شده است.

(۶۵ سانتی‌متر) در طراحی و آنالیز لحاظ گردیده است. این موضوع بدان معناست که در آنالیز مقطع تونل تحت بارهای وارده نیمی از عرض سگمنت مدل‌سازی شده و در نتیجه حین طراحی نیز مقطعی به ابعاد ۲۵×۶۵ سانتی‌متر مورد نظر قرار گرفته است (شکل ۱۴). بنابراین در تمام مراحل این بخش، هدف طراحی مقطعی به صورت ذیل است.

مشخص است که پیش از طراحی سگمنت، آنالیز تونل تحت بارهای دوره بهره‌برداری برای تعیین تلاش‌های ایجاد شده در مقطع تونل لازم و ضروری است. برای مدل‌سازی بدنه تونل می‌توان از المان یک بعدی قاب (Frame 14) یا المان دو بعدی پوسته (Shell) استفاده نمود. از این میان مدل کردن یک مقطع از پوشش سازه‌ای تونل با المان‌های قاب از سادگی بیشتر و دقت کافی برخوردار بوده و طراحی المان‌های قابی (تیر-ستون)، به راحتی با استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی انجام می‌گیرد. با توجه به توضیحاتی که در ادامه آمده است، مدل کردن پوشش تونل با المان قاب دقت بسیار خوبی دارد و به همین دلیل استفاده از مدل قابی در طراحی پوشش بسیار متداول بوده و برای مدل‌سازی، تحلیل و طراحی، آیین‌نامه ارتش آمریکا (USACE (EM 1110-2-2901 نیز از این مدل استفاده می‌کند.

پوشش بتنی تونل دو بعدی و به صورت یک حلقه دایروی مدل می‌شود که در شکل ۱۵، نشان داده شده است.

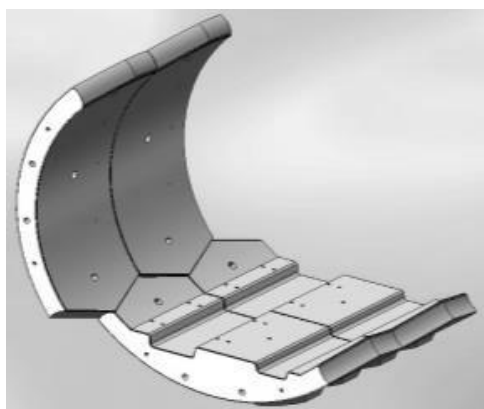


شکل ۱۲- توزیع الیاف در نمونه منشوری

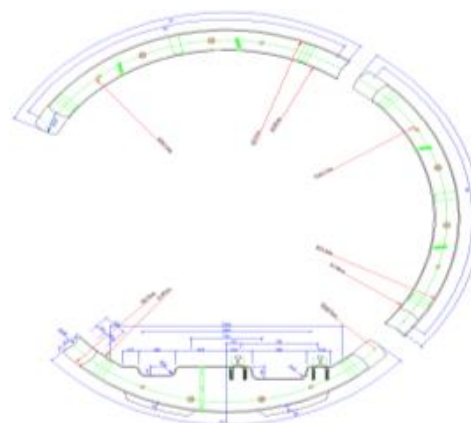
### ۳- طراحی سازه‌ای

با توجه به تفاوت میان رفتار مقاطع بتن الیافی نسبت به مقاطع بتن‌آرمه، بهتر است که در روابط طراحی مقاطع بتن آرمه نیز تجدید نظر صورت پذیرد. در این پروژه از چند روش مختلف طراحی در این زمینه، از جمله روش‌های *ACI-SP105, MC 2010, ACI544.7R, ACI318* استفاده شده است، لیکن به علت حفظ اختصار مطلب تنها بخشی از این روش‌ها در زیر ارائه می‌شود. در شکل ۱۳، مشخصات هندسی سگمنت هگزگونال مورد استفاده در پروژه گلاب ۲، نشان داده شده است.

در این پژوهش، نصف عرض مقطع سگمنت



شکل ۱۳- هندسه سگمنت هگزگونال (Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)



مدل نیز برای همین عرض از بدنه تونل انجام شده است. در حقیقت مقطع سازه تونل، ۶۵ سانتی‌متر از طول تونل را

برای مدل کردن مقطع سگمنت از نصف عرض سگمنت به اندازه ۶۵ سانتی‌متر استفاده شده و بارگذاری در



نحوه اعمال آن‌ها در شکل ۱۶، نشان داده شده است. پس از انجام یک آنالیز غیرخطی، مقادیر تلاش‌های بحرانی ایجاد شده در مقطع تحت ترکیب بارهای پیشنهادی ارتش آمریکا تعیین گردید.

براساس مشخصات فنی، مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن برابر ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع برای سگمنت الیافی در نظر گرفته شده است. با استفاده از آیین‌نامه *ACI 318* مدول الاستیسیته بتن به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E_c \cong 4730 \sqrt{f'_c} = 33446 \text{ Mpa} \quad (1)$$

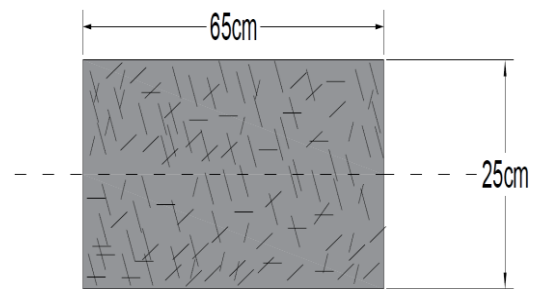
ابتدا با فرض عدم حضور هیچ گونه مسلح کننده‌ای و با استفاده از نرم‌افزار *CSICOL*، مقطع مدل‌سازی شده نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی و همچنین محل تلاش‌های ایجاد شده تحت بارهای وارده از قبیل، فشار زمین، فشار آب، بار مرده، بار زنده و غیره ایجاد می‌گردد، نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، بارهای وارده همگی در نمودار واقع شده و علت آن نیز همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، شکل مقطع است. همان‌طور که در شکل ۱۸، مشاهده می‌گردد، در بدترین حالات بیشترین تنش کششی وارده از تنش مقاوم مقطع کمتر است (قابل ذکر است، این نمودارها مربوط به ترکیب بحرانی است).

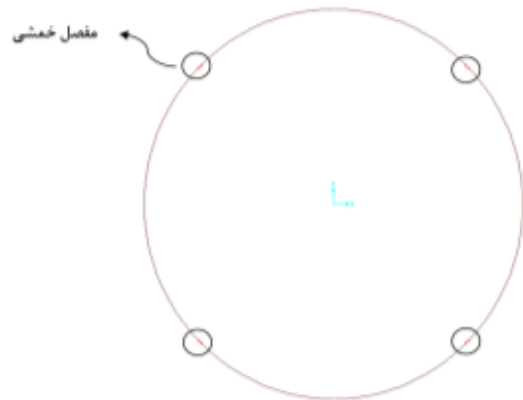
در شکل ۱۹، نیز میزان تنش در مقطع، تحت بحرانی‌ترین حالت بارگذاری نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که میزان حداکثر کشش وارده در محدوده قابل تحمل برای مقطع است.

علاوه بر توضیحات فوق، روش گزارش طراحی سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی مسلح به الیاف فلزی موسسه بتن آمریکا موسوم به *ACI544.7R* نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش از مقاومت پسماند حاصل از آزمایش *ASTM C1609* استفاده می‌شود. همچنین از ضرایب مقیاس و ضریب کاهش مقاومت ۰/۷ که در گزارش فوق ارائه شده است، استفاده می‌گردد (*ACI544.7R-2016*, *Hamee, et al, 2016*; در شکل ۲۰ فرضیات ارائه شده در شکل نشان داده شده است.

مدل می‌کند. بدنه تونل از ۴ سگمنت ربع دایره تشکیل شده است که بدون قطعه اتصال، به صورت دو سطح محدب و مقعر داخل یکدیگر قرار گرفته‌اند. از آنجایی که چنین اتصالی قابلیت انتقال لنگر خمشی را ندارد و تنها نیروی محوری و تا حدودی نیروی برشی را انتقال می‌دهد، اتصالات سگمنت‌ها در این نقاط به صورت مفصل خمشی مدل شده‌اند که در شکل ۱۵، نشان داده شده است.



شکل ۱۴- مقطع موردنظر طراحی در این بخش (نیمی از عرض سگمنت)

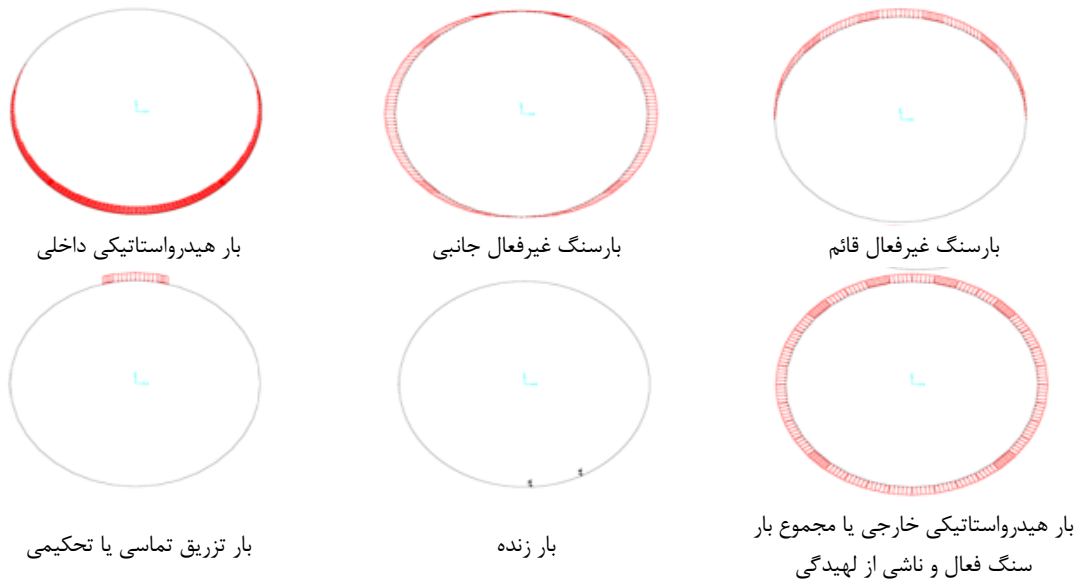


شکل ۱۵- مقطع موردنظر طراحی در این بخش (نیمی از عرض سگمنت)

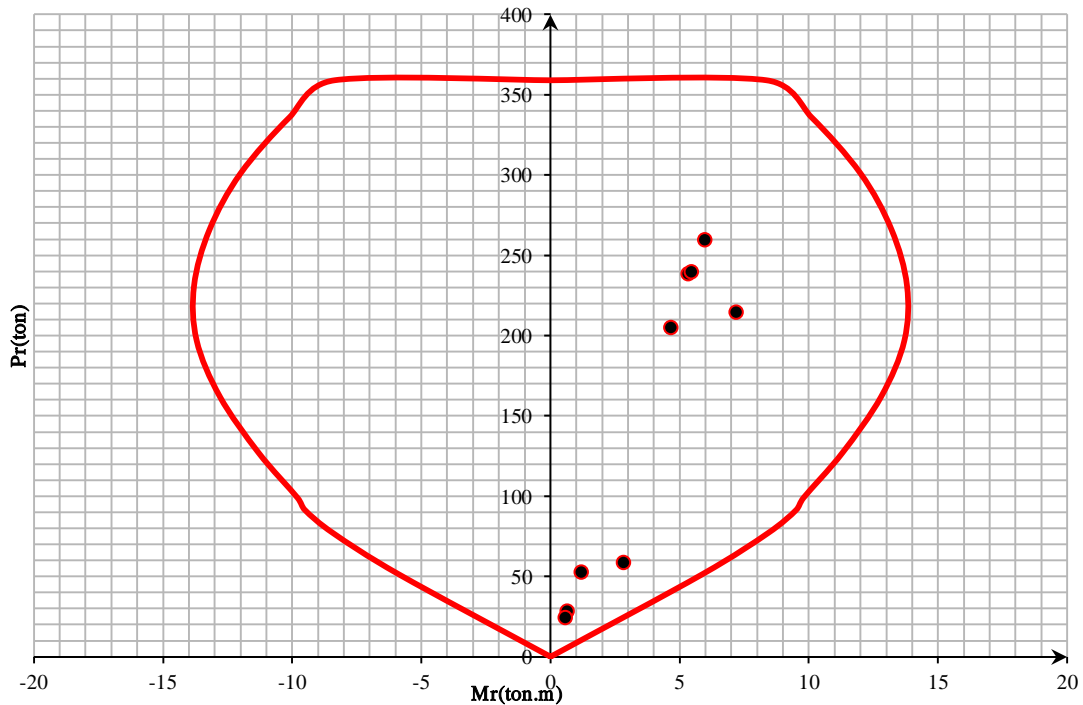
(*Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014*)

برای مدل‌سازی محیط سنگی اطراف تونل از المان *Gap*، در نرم‌افزار *SA2000*، با جهت‌گیری شعاعی استفاده شده است. برخی از بارهای اعمال شده به پوشش و

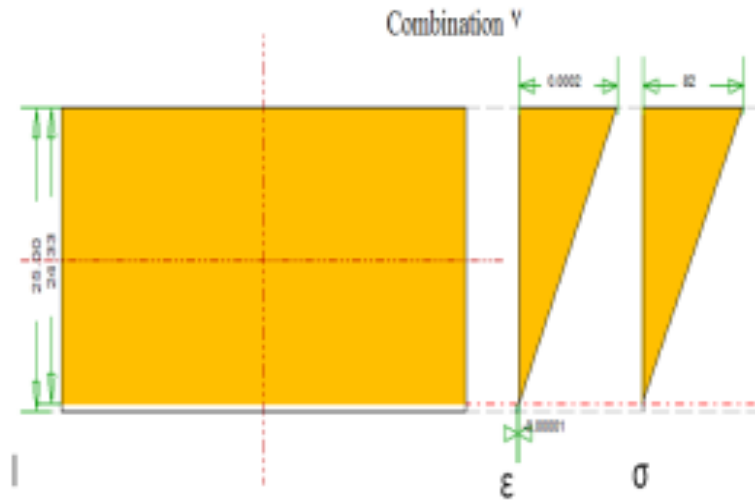
طراحی، ساخت و نصب سگمنت ایافی در پروژه تونل گلاب ۲، بابک اشجع و ...، ص ۱۰۱-۱۲۰



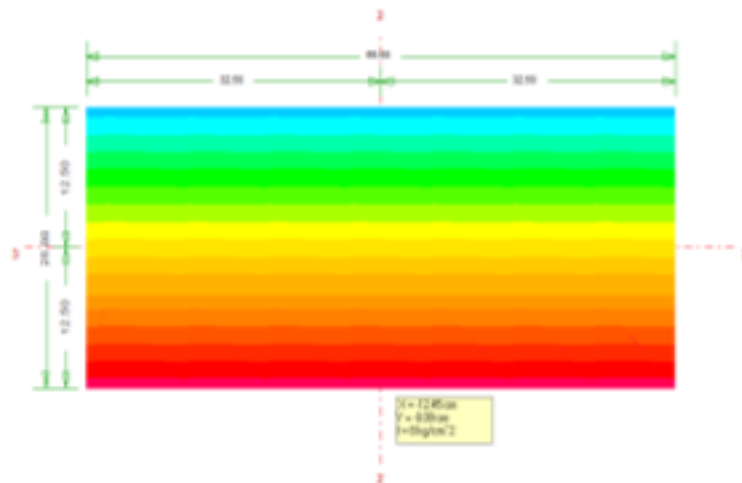
شکل ۱۶- برخی از بارهای اعمال شده به پوشش و نحوه اعمال آنها  
(Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)



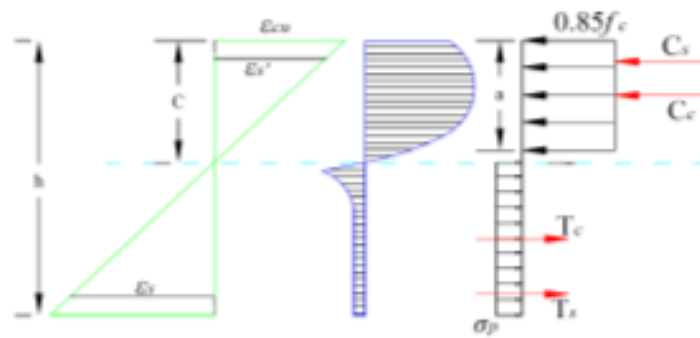
شکل ۱۷- نمودار اندرکنش مقطع به روش ACI 318-14



شکل ۱۸- نمودار تنش و کرنش مقطع



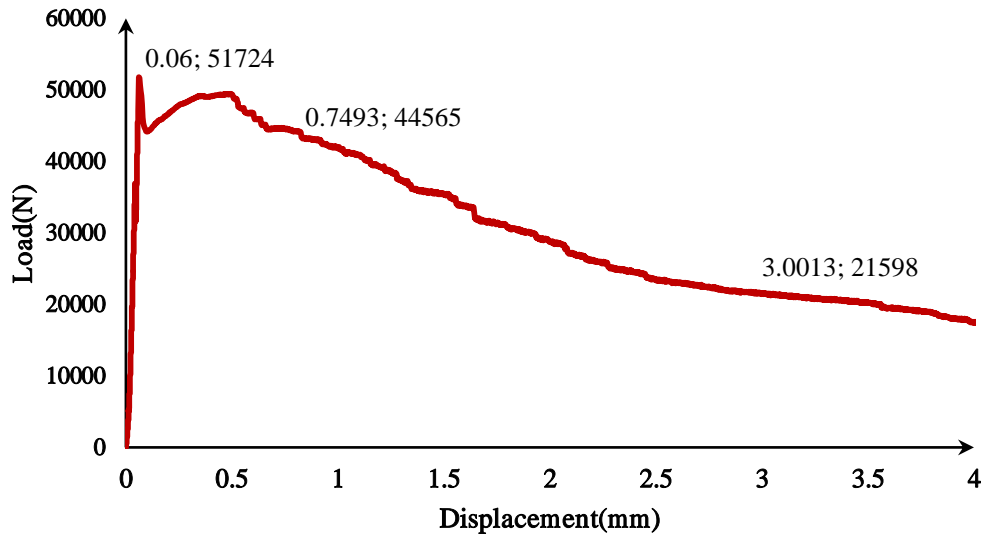
شکل ۱۹- تنش‌های ایجاد شده در مقطع سگمنت تحت بارهای وارده



شکل ۲۰- روش ارائه شده در استاندارد ACI 544.7R

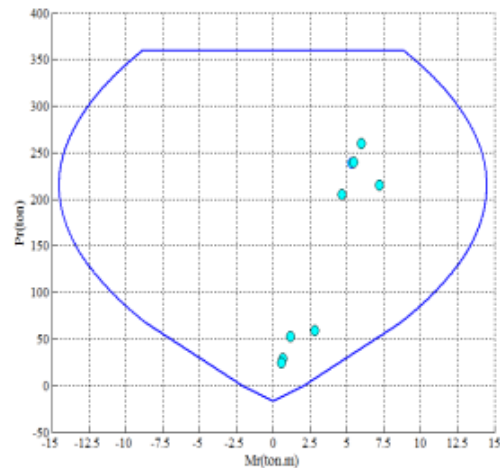
در نهایت در شکل ۲۲، نمودار اندرکنش مقطع و تلاش‌های ایجاد شده در آن نشان داده شده است. کفایت مقطع مورد نظر تحت بارهای وارده قابل رویت است.

در شکل ۲۱ نیز نمودار بار- تغییرمکان حاصل از آزمایش *ASTM C1609* نشان داده شده است. محل مقاومت‌های پسماند نیز روی شکل مشخص است.

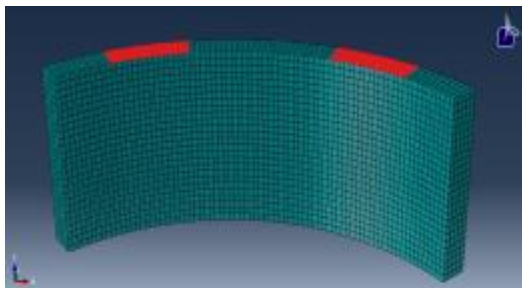


شکل ۲۱- روش ارایه شده در استاندارد *ACI544.7R*

برخوردار است، به همین دلیل سعی گردیده صحت آنالیز با استفاده از روش‌های گوناگون بررسی گردد. برای مثال روش پیشنهادی آقای لین لیو که به نحوی مختص سگمنت الیافی است (*Lin, 2015*)، روش پیشنهادی آقای اینگر (*Iyengar & Yogananda, 1996*) و روش المان محدود، استفاده شده است. در این مقاله تنها نتایج آنالیز به کمک نرم‌افزارهای *SAP2000* و *ABAQUS* ارائه می‌شود. در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ نتایج تحلیل با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* نشان داده شده است.



شکل ۲۲- نمودار اندرکنش روش *ACI544.7R*



شکل ۲۳- محل بار جک‌ها بر سگمنت در نرم‌افزار *ABAQUS*

#### ۴- بررسی سگمنت تحت بار جک‌ها

معمولاً یکی از مراحل که سبب ایجاد ترک و لب‌پریدگی در سگمنت می‌شود، اعمال بار جک‌ها به سگمنت است؛ بنابراین آنالیز درست سگمنت در این مرحله از اهمیت ویژه‌ای





شکل ۲۶- سگمت‌های الیافی تحت بار جک‌های دستگاه حین نصب

#### ۵- بررسی سگمت تحت بارهای حین ساخت، دیو، نصب و انتقال

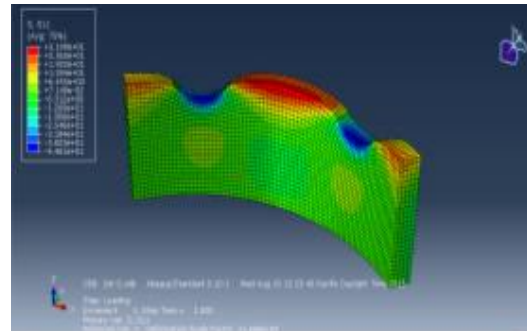
از آنجایی که قطعات پیش‌ساخته (سگمت) در کارخانه سگمت تولید و برای نصب به محل تونل و سپس به داخل تونل انتقال داده می‌شود، در حین قالب‌برداری، دیو موقت در کارخانه، انتقال به محل تونل و نصب در تونل، بارهایی به این قطعات پیش‌ساخته اعمال می‌شود. بدیهی است، مشابه سایر مراحل کنترل سگمت‌های تحت بارهای وارده در این مرحله نیز لازم و ضروری است. در این بخش تمامی روابط استفاده شده مربوط به بتن ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۴، مقادیر مورد استفاده در این بخش نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در مرحله حمل و دیو سگمت

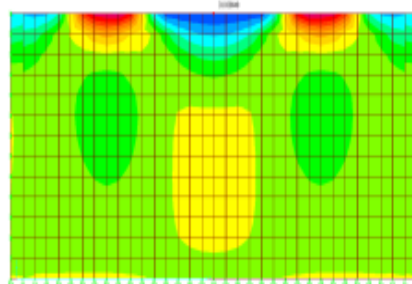
مقدار	مشخصات
$f'_c = 50Mpa$	مقاومت فشاری مشخصه (نمونه استوانه‌ای ۲۸ روزه)
$f'_{ci} = 20Mpa$	مقاومت فشاری ۵/۵ ساعته (نمونه استوانه‌ای عمل آوری شده با بخار)
$f'_{ti} = 0.6\sqrt{f'_{ci}}$ $= 2.7Mpa$	مدول گسیختگی ۵/۵ ساعته
$f'_t = 0.6\sqrt{f'_c}$ $= 4.25Mpa$	مدول گسیختگی نهایی
$W_c = 25 \frac{KN}{m^3}$	وزن مخصوص بتن مسلح

در این تحلیل بار هر جک ۱۲۰ تن است، این در حالی است که در اکثر مواقع به علت جنس زمین این نیرو در حدود ۵۰ تا ۷۰ تن است.

همان‌طور که در شکل ۲۴ و شکل ۲۵ دیده می‌شود، نتایج ارایه شده در بالا توسط نرم‌افزار سپ نیز تایید شده است.



شکل ۲۴- تنش طولی ایجاد شده در سگمت در نرم‌افزار ABAQUS

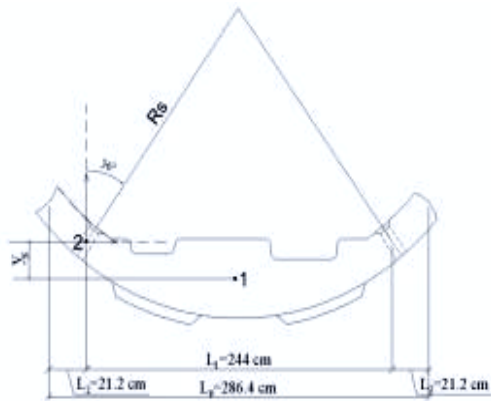


شکل ۲۵- تنش طولی ایجاد شده در سگمت در نرم‌افزار SAP2000

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل، نیروی کششی ایجاد شده و نیروی مقاوم مقطع با لحاظ ضریب جزئی کاهش مقاومت ۰/۷ (ارایه شده در گزارش طراحی ACI544.7R ((ACI544.7R-2016)) تعیین گشته و کفایت مقطع در برابر بار جک‌های دستگاه نیز اثبات گردید.

لذا با توجه به نتایج بالا، سگمت‌ها تحت این بار مشکلی نخواهند داشت. در شکل ۲۶، سگمت‌های الیافی تحت بار جک‌ها نشان داده شده است، همان‌گونه که دیده می‌شود، هیچ مساله‌ای در این بخش بوجود نیامده است.

شکل ۲۹، انتقال سگمنت الیافی توسط ارکتور را نشان می‌دهد.



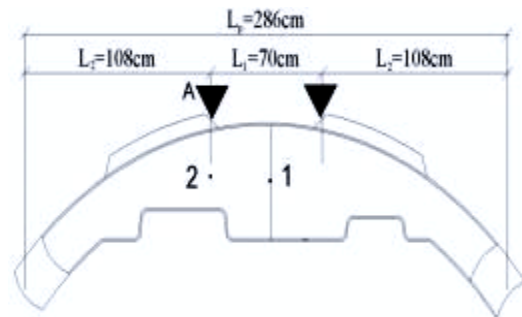
شکل ۲۹- نحوه بلند کردن سگمنت کف در تونل توسط ارکتور  
(Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)

#### ۶- طرح اختلاط سگمنت‌های الیافی

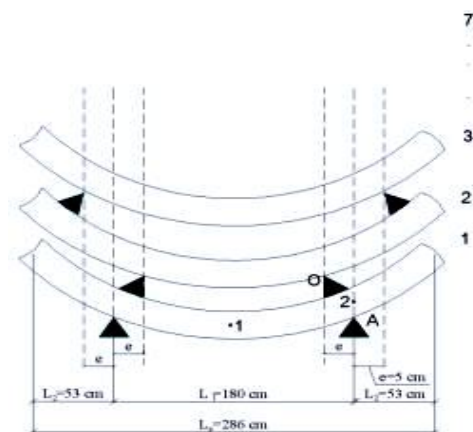
در این پروژه با انجام آزمایش‌های متعدد طرح اختلاط نهایی تعیین گردید. قابل ذکر است، علت استفاده از میکروسیلیس در طرح اختلاط نهایی علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر شکافت خوردگی (Ramadoss, 2013). باعث چسبندگی بهتر و بیشتر بین الیاف و ماتریس می‌گردد. در جدول ۵ مشخصات و نتایج آزمایشگاهی سه طرح اختلاط مورد نظر نشان داده شده است.

قابل ذکر است، مصالح مصرفی از نوع شکسته و سیمان مورد استفاده نیز از سیمان تیپ ۱ است. شایان ذکر است، بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مسائل اقتصادی و مفاهیم مهندسی، در نهایت طرح اختلاط شماره سه به عنوان طرح نهایی مدنظر قرار گرفت. ذکر این نکته نیز خالی از لطف نیست که بیان گردد، استفاده از سگمنت الیافی (با استفاده از طرح اختلاط سوم) در حدود ۹ درصد کاهش هزینه به همراه داشته است. همچنین طرح اختلاط سوم از منظر اقتصادی به مراتب نسبت به سایر طرح اختلاطها اقتصادی‌تر است.

در شکل ۲۷ و شکل ۲۸ مراحل مد نظر حمل و دپو سگمنت نشان داده شده است. در این مرحله بر اساس تئوری مکانیک سازه‌ها میزان تنش کششی بوجود آمده در سگمنت ناشی از وزن خود سگمنت یا بار اعمالی ناشی از وزن سایر سگمنت‌ها تعیین شده و با مدول گسیختگی تعیین شده مقایسه شده است. بدیهی است، علاوه بر این کنترل مقطع در حالت حدی نهایی تحت بارهای حین تولید و حمل نیز لازم بوده و انجام شده است. شایان ذکر است، در تمامی مراحل حین ساخت، حمل و دپو کنترل در حالت حدی نهایی با استفاده از دیاگرام اندرکنش متناظر با سن سگمنت انجام پذیرفته و از سویی دیگر مقایسه مدول گسیختگی مقطع با تنش‌های کششی ایجاد شده در مراحل مختلف بیانگر این موضوع است که سگمنت‌ها تحت بارهای عنوان شده دچار ترک خوردگی نخواهند شد.

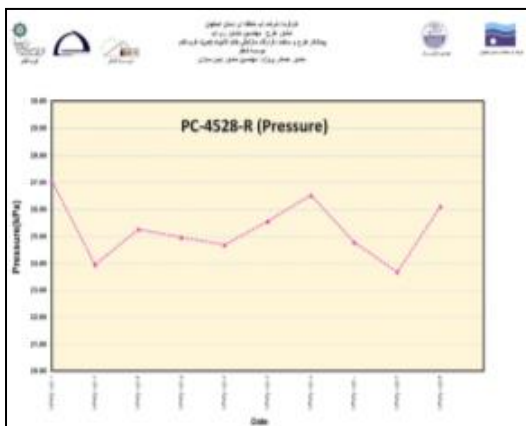


شکل ۲۷- سگمنت کف حین قالب برداری  
(Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)



شکل ۲۸- سگمنت‌های الیافی تحت بار جک‌های دستگاه حین نصب  
(Imensazen Consultant Engineers Institute, 2014)

درجه دچار کاهش پارامترهای مکانیکی می‌گردند، صرفه مالی، عملکرد بهتر، افزایش بیشتر پارامترهای مکانیکی، وارداتی بودن الیاف پلیمری، پایین بودن مقاومت کششی الیاف پلیمری (بر اساس راهنمای *ITAttech Activity ITA (Group Support, 2015)* حداقل مقاومت کششی الیاف پلیمری برای استفاده سازه‌ای ۵۰۰ مگاپاسکال است)، رفتار خزشی الیاف‌های پلیمری در دمای محیط و غیره طرح شماره ۳ برگزیده شده و لذا تولید انبوه سگمنت الیافی در اواخر آذر ماه سال ۹۴ آغاز گردید.



شکل ۳۰- نمودار فشار وارده بر سگمنت

در نهایت برتری‌های سگمنت الیافی را می‌توان به صورت بندهای زیر عنوان کرد.

الف- باربری مقطع پس از ترک خوردگی آن، بعبارتی ایجاد مقاوم پسماند در مقطع، این موضوع سبب می‌گردد از الیاف به عنوان یک المان استراکچرال استفاده گردد و سبب بهبود رفتار سازه‌ی مورد نظر می‌شود. این ویژگی اغلب امکان حذف بخش قابل توجهی از آرماتورها را فراهم می‌سازد.

ب- مقاومت کششی مستقیم و مقاومت در برابر کشش ناشی از خمش مقطع، بسته به میزان الیاف مصرفی، تا حدودی بهبود می‌یابد.

پ- مقاومت برشی مقطع نسبت به بتن ساده بسته به میزان الیاف مصرفی، تا حدودی بهبود می‌یابد.

ت- افزایش مقاومت در برابر بارهای دینامیکی به ویژه بارهای ضرب‌های، سگمنت‌های ساخته شده در چندین مرحله دست به دست می‌گردد و این موضوع سبب می‌شود،

جدول ۵- طرح اختلاط مصرفی برای یک متر مکعب

Material	Mix. 1	Mix. 2	Mix. 3
Cement(kg/m <sup>3</sup> )	435	435	435
Water(kg/m <sup>3</sup> )	170	170	170
Fine aggregate(kg/m <sup>3</sup> )	950	950	950
Coarse aggregate 6-12(kg/m <sup>3</sup> )	170	170	170
Coarse aggregate 12-25(kg/m <sup>3</sup> )	710	710	710
Super Plasticizer(kg/m <sup>3</sup> )	2.2	2.4	2.6
Polypropylene Fiber (Fibrillated)(kg/m <sup>3</sup> )	5	-	-
Polypropylene Fiber (Monofilament)(kg/m <sup>3</sup> )	1	1	1
Steel Fiber(kg/m <sup>3</sup> )	-	20	30
Silica Fume(kg/m <sup>3</sup> )	30	30	30
Slump Test(cm)	14.5	13	11
Strength of Compression after 5 hr(kg/cm <sup>2</sup> )	263	275	271
Strength of Compression after 7days(kg/cm <sup>2</sup> )	442	540	525
Strength of Compression after 28days(kg/cm <sup>2</sup> )	570	670	663
Strength of Splitting(Brazilian Test) after 28days(kg/cm <sup>2</sup> )	35.1	39	44.5
Modulus of rupture(Bendung Test) after 28days(kg/cm <sup>2</sup> )	40.1	45.2	52.3

## ۷- نصب سگمنت‌های الیافی در تونل

در این پروژه در مرحله اول، ۴ رینگ سگمنت الیافی برای شروع ساخته و به تونل منتقل شده است. مطابق انتظار سگمنت‌های الیافی در شرایط کارگاهی و تحت بارهای طراحی رفتاری کاملاً مشابه آنچه در طراحی در نظر گرفته شده بود را داشته و الان پس از گذشت حدود ۵ سال بدون کمترین مشکلی در حال باربری می‌باشند. قابل ذکر است، در نمودار شکل ۳۰، بارهای وارده به سگمنت‌های الیافی از سوی زمین مشاهده می‌شود که از قرائت ابزار بدست آمده است.

بدیهی است، پس از موفقیت‌آمیز بودن مرحله اول فرآیند تولید انبوه سگمنت الیافی در پروژه گلاب آغاز گردید.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این پروژه به چندین دلیل از جمله عدم کاهش پارامترهای مکانیکی در اثر حرارت بخاردهی (این موضوع مربوط به الیاف پلیمری بوده که گاهی در دماهای بالای ۵۰

نیاز به تولید سبد و یا کاهش میزان وزن سبد مورد استفاده در سگمنت.

ر- صرفه‌جویی در میزان تجهیزات مورد نیاز کارخانه سگمنت به‌علت عدم نیاز و یا کاهش میزان جوشکاری، خم و برش آرماتورهای مورد نیاز برای تولید سبد مصرفی در سگمنت.

ز- کاهش میزان تاسیسات مورد نیاز کارخانه سگمنت. به‌علت حذف و یا کاهش میزان جوشکاری و به تبع آن کاهش مقدار برق مصرفی کارخانه سگمنت.

س- صرفه‌جویی در فضای کارخانه سگمنت به‌علت عدم نیاز به تولید سبد و دپوی آن، در صورت حذف سبد مورد نیاز در سگمنت.

ش- افزایش چشمگیر مقاومت تونل در برابر آتش‌سوزی، لازم به ذکر است، این موضوع در تونل‌های انتقال آب مانند تونل گلاب اهمیت کمتری خواهد داشت.

ص- کاهش میزان چشمگیر در مصرف فولاد، منظور از فولاد به هر شکل آرماتور یا الیاف است، این موضوع از دید کلان باعث صرفه‌جویی اقتصادی از یک سو و کاهش مسائل زیست‌محیطی ناشی از کاهش تولید فولاد از سوی دیگر است.

ض- صرفه مالی و اقتصادی سگمنت الیافی نسبت به سگمنت بتن‌آرمه .

ط- سرعت بالای اجرای سگمنت الیافی نسبت به سگمنت بتن‌آرمه.

## ۹- سیاهه نمادها

در جدول ۶، سیاهه نمادها آورده شده است.

در مراحل مختلف متحمل ضربات متعددی می‌گردد که بتن مسلح به الیاف کفایت لازمه برای مقابله در برابر بارهای وارده را خواهد داشت.

ث- افزایش قابل توجه مقاومت مقطع در مقابل رشد بازشدگی ترک‌ها بوسیله مکانیسم پل‌زدگی روی ترک (این ویژگی باعث کاهش میزان نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام مقطع می‌گردد). همچنین از آنجا که الیاف فولادی عرض ترک‌ها را محدود می‌کنند، اکسیداسیون الیاف و آرماتور موجود در مقطع به تاخیر خواهد افتاد.

ج- کاهش تعداد ترک‌های بزرگ (با بازشدگی زیاد) و جلوگیری از لب‌پریدگی به‌علت وجود الیاف در تمام نقاط، حتی در نزدیک‌ترین نواحی به سطوح رویه سگمنت، درصد قابل توجهی از سگمنت‌های اوتی از این دسته است.

چ- افزایش توانایی مقطع در میزان جذب انرژی، مکانیسم جذب انرژی در بتن الیافی بدین شکل است که بواسطه بیرون‌کشیدگی تک‌تک الیاف‌ها، یا گسیختگی آن‌ها میزان قابل توجهی از انرژی تلف می‌شود، این موضوع سبب استفاده از الیاف در سازه‌های ضد انفجاری و سازه‌های دفاعی می‌گردد.

ح- افزایش مقاومت در مقابل تنش‌های ناشی از خستگی.

خ- افزایش مقاومت در مقابل تورق و سایش سطحی بتن، این موضوع در پروژه تونل انتقال آب از اهمیت بیشتری برخوردار است.

د- کاهش میزان انقباض، جمع‌شدگی و خزش بتن، این موضوع سبب افزایش مقاومت بتن در برابر این رفتار ذاتی بتن می‌شود.

ذ- کاهش میزان نیروی انسانی مورد نیاز به‌علت عدم



جدول ۶- سیاهه نمادها

شرح	واحد	نماد
مدول الاستیسیته	$Mp_a$	$E_c$
مقاومت فشاری مشخصه	$Mp_a$	$f'_c$
مقاومت فشاری ۵/۵ ساعته	$Mp_a$	$f'_{ci}$
مقاومت کششی ۵/۵ ساعته	$Mp_a$	$f'_{ti}$
مقاومت کششی نهایی	$Mp_a$	$f'_t$
وزن مخصوص بتن	$\frac{KN}{m^3}$	$W_c$

### ۱۰- مرجع

- ACI544.7R-2016., *Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*; American Concrete Institute, January 2016;
- Arnau, O., 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. Space Technol*; 26 (6); pp.: 778-788.
- Bakhshi, M, Nasri, V. (2014). *Developments in design for fibre reinforced concrete tunnel segments. FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop. Fibre Reinforced Concrete Applications. 24-25 July 2014, Montreal, Canada. pp.: 441 - 452.*
- CNR DT 204/2006. (2006). *Guidelines for the Design, Construction and Production Control of Fibre Reinforced Concrete Structures, Italian National Research Council -CNR.*
- CPH-2008. (2008). *EHE-08: Spanish Structural Concrete Standard. Annex 14: Recommendations for the use of fibre reinforced concrete.*
- DBV-Recommendation (German Concrete Association). (1992). *Design principles of steel fibre reinforced concrete for tunnelling works. pp.: 19-29.*
- Hameed R., Turatsinze A., Duprat F., and Sellier A (2010). *Study on the Flexural Properties of Metallic Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. Maejo International Journal of Science and Technology. pp 169-184.*
- Imensazen Consultant Engineers Institute, (2014). *Golab Tunnel 2 Final structural design report, Ghaem Specialized Group, Khatam-al Anbiya Construction Headquarters*
- ITAtch Activity Group Support. (2015). *ITATECH design guidance for precast fibre reinforced concrete segments, July. Draft Report.*
- Iyengar, K.T.S.R.; Yogananda, C.V. (1966). *A three dimensional stress distribution problem in the end zones of pre-stressed beams. Magazine of Concrete Research*; 18; pp.:75-84.
- Kooiman, A.G. (2000). *Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands.*
- Lin, Liao (2015). *Structural Design and Characterisation of FRC Precast Segment. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya Departament d'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, Spain.*

Plizzari, G.A., Tiberti, G. (2006). *Steel Fibers as reinforcement for precast tunnel segments*. *Tunn. Undergr. Sp. Technol*; 21 (3-4); pp.: 438-439.

Plizzari, G.A., Tiberti, G. (2007). *Structural behaviour of SFRC tunnel segments*. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. Catania, Italy, June 17-22, pp.: 1577-1584.

Ramadoss, P(2013). *Combined effect of silica fume and steel fiber on the splitting tensile strength of high-strength concrete*. *International Journal of Civil Engineering Vol. 12, No. 1*, pp.: 96-103.

RILEM TC 162-TDF. (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete  $\sigma$ - $\epsilon$  design method: final recommendation*. *Mater Struct*; 36(262); pp.: 560-567.

## Design, Manufacturing and Installation of Fiber-Reinforced Segmental Lining of Golab Tunnel 2

B. Ashja<sup>1</sup>; H. Ahmadi<sup>2</sup>

1- Managing Director; Ofogh Energy Paydar, Ghaem Specialized Group, Khatam-al Anbiya Construction Headquarters, ashja.babak@yahoo.com

2- Senior Structural Expert; Ofogh Energy Paydar, Ghaem Specialized Group, Khatam-al Anbiya Construction Headquarters, habibullah.ahmadi68@yahoo.com

Received: 19 Jan 2016; Accepted: 4 Mar 2019  
DOI:10.22044/tuse.2019.3878.1251

### Keywords

Fiber-reinforced precast segment  
Fiber-reinforced concrete  
Water tunnel  
Golab Tunnel  
Tunnel lining

### Final English Extended Abstract

#### Summary

Many studies have been performed on fiber-reinforced segmental lining to improve some of the weak material properties of the segmental lining. Fiber-added reinforced concrete (FRC) applications have become widespread in areas such as tunnel shells, concrete sewer pipes, and slabs of large industrial buildings. Use of the FRC in load-carrying members of buildings having conventional reinforced concrete (RC) frames is also gaining popularity recently because of its positive contribution to both energy absorption capacity and concrete strength. This study is focused on the mechanical properties of the designed structural steel fiber-reinforced concrete (SFRC) materials, which are important for the capacity of the tunnel lining segments and their damages during manipulation. Generally the segments are more loaded during tunnel lining installation (long term load is lower). This study has been focused on SFRC with various types of fibers, such as steel fiber and synthetic fiber. The use of fiber reinforced concrete for the Golab Tunnel segments has been examined. In this regard, for the highly loaded big rings with high bending moments and normal forces, a high amount of bar reinforcement is necessary. In this research, three types of fiber concrete have been selected, then 5 laboratory tests have been made to determine their mechanical properties. In the next step, numerical analysis has been performed using SAP2000 and Abacus software packages. Then, based on the results of numerical and experimental analyses, the third fiber reinforced concrete has been determined as the most suitable one.

### Introduction

This paper is focused on the mechanical properties of the designed structural steel fiber reinforced concrete (SFRC) materials, which are important for the capacity of the tunnel lining segments and their damages during manipulation. Generally the segments are more loaded during tunnel lining installation (long term load is lower). In this study, SFRC samples with various types of fibers such as steel fiber and synthetic fiber are investigated. The use of fiber reinforced concrete for the Golab Tunnel segments has been examined in this study.

### Methodology and Approaches

In this paper, numerical and laboratory methods are used to test and fabricate fiber-reinforced segments. Numerical methods using SAP2000 and Abacus software packages have been applied to analyze the loads on the tunnel, and for laboratory methods, small scale tests, including BS-EN 12390-3, ASTM C496, ASTM C143, ASTM C1609, have been employed to measure the behavior of fiber concrete.

### Results and Conclusions

In this paper, investigation of mechanical parameters due to steam heating (this is related to polymer fibers sometimes falling below 50 ° C), cost savings, better performance, better mechanical parameters, type of polymer fibers, low

tensile strength of polymer fibers (according to ITA guidelines, minimum tensile strength of polymer fibers for use in structures under load of 500 MPa), creep behavior of polymer fibers at ambient temperature and so on have been carried out. Production of the fiber-reinforced segments has been started in December 2015. As a result of this study, the advantages of the fiber-reinforced segments can be summarized as follows.

1. Sustainable cross-section after cracking that makes the fiber a structural element and improves structural behavior. This feature often allows for the removal of a considerable part of the rebar reinforcement.
  2. Tensile strength of the cross section is improved, depending on the amount of fiber used.
  3. The shear strength of the cross-section against plain concrete improves somewhat depending on the amount of fiber used.
  4. Increase of resistance to dynamic loads, especially impact loads.
  5. Significant increase in cross section resistance to crack opening by bridge mechanism on the crack (this feature reduces permeability, and thus, increases cross section durability). Moreover, as the steel fibers limit the width of the cracks, oxidation of the fibers and reinforcement in the cross section will be delayed.
  6. Reduction of the number of large cracks (with high width) and prevention of lipping due to the presence of fibers in all locations, even in the areas close to the surface of the segment surface.
  7. Increase of energy absorption.
  8. Increase of the resistance of fatigue.
  9. Reduction of the amount of shrinkage and creep of concrete
  10. Reduction of the amount of manpower required due to the need to not produce the cage or reduction of the weight of the cage used in the segment.
  10. Saving the equipment required by the segment plant for unnecessary or reduced welding, bending, and cutting of reinforcement needed to produce the cage segment.
-