

## Assessment of the application "twist-off" method for determining the in situ compressive and flexural strengths in the fiber concrete

Mahmood Naderi<sup>1\*</sup>, Alireza Esmaeli<sup>2</sup>, Ali Saberi Varzaneh<sup>3</sup>

1- Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

2- MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

3- P.hD Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

### ABSTRACT

Since the batching, transportation, pouring, compaction and curing of the specimens used in laboratory testing of concrete, either from these employed in real structures, the in-situ methods are needed for assessing the quality of existing concrete in structures. Among the tests with partial failure, the "twist-off" method is used for determining the strength of concrete both in the laboratory and in-situ. In this paper the use of "twist-off" method for determining the strength of three types of fibre concrete is presented. In total 234 concrete samples were prepared, using three types of fibre (steel, glass and polypropylene) and their strength were measured using both "twist-off" and "compression" testing. The results show that a strong linear correlation exists between the compressive strength and the failure modulus with the results of the "twist-off" test. Also, to study the pattern of stresses in concrete, glue and cylinder of the "twist-off" test and the pattern of the formation and expansion of the cracks in concrete samples during the test, nonlinear modeling and finite elements were carried out using Abaqus/CAE. The finite element analysis with consideration of the nonlinear shape functions for the elements in tension and pressure on concrete specimens with a strength of 40 MPa shows that, with the distance of at least 20 mm, the results of the "twist-off" test and dispersion are not affected.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 05 November 2018

Revise Date: 04 March 2019

Accept Date: 23 April 2019

### Keywords:

Concrete

Twist-off

Fibre

Failure Modulus

Nonlinear

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.155083.1702

\*Corresponding author: Mahmood Naderi

Email address: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

## ارزیابی کاربرد روش "پیچش" برای تعیین مقاومت‌های فشاری و خمشی در جای بتن الیافی

محمود نادری<sup>۱\*</sup>، علیرضا اسماعیلی<sup>۲</sup>، علی صابری ورزنده<sup>۳</sup>

۱-۱- استاد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### چکیده

نظر به اینکه روش‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت بتن، عمدتاً کیفیت مصالح مورد استفاده در تهیه بتن را کنترل می‌نمایند و ارزیابی مناسبی از روند کسب مقاومت بتن در سازه ارائه نمی‌نمایند، انجام آزمون‌هایی جهت ارزیابی مقاومت بتن سازه از اهمیت خاصی برخوردار است. از جمله آزمون‌های با خرابی جزئی، روش "پیچش" می‌باشد که دارای کاربری وسیع در تعیین مقاومت انواع بتن هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه می‌باشد. در این مقاله، تاثیر نوع الیاف (فولادی، شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن) بر نتایج به دست آمده از روش "پیچش" برای تعیین مقاومت درجای بتن با به کارگیری ۲۳۴ نمونه، مطالعه و نتایج حاصله ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که یک همبستگی قوی خطی میان مقاومت فشاری و مدول گسیختگی با نتایج حاصل از انجام آزمون "پیچش" برقرار می‌باشد. همچنین به منظور بررسی الگوی تنش‌های ایجاد شده در بتن، چسب و استوانه آزمون "پیچش" و الگوی ایجاد و گسترش ترک‌ها در نمونه بتنی به هنگام انجام آزمون، مدل سازی و تحلیل غیر خطی با استفاده از نرم افزار اجزا محدود *Abaqus/CAE* ارائه گردیده است. انجام آنالیز اجزا محدود با لحاظ توابع شکل غیر خطی برای المان‌ها در کشش و فشار بر روی نمونه بتنی با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال نشان می‌دهد که با رعایت فاصله حداقل به اندازه ۲۰ میلی‌متر تأثیری بر نتایج آزمون "پیچش" و پراکنندگی آن‌ها ندارد.

کلمات کلیدی: مقاومت، "پیچش"، الیاف، مدول گسیختگی، تحلیل غیر خطی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.155083.1702	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.155083.1702	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۷/۱۲/۱۳	۱۳۹۷/۰۸/۱۴
محمود نادری Profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بتن ساخته شده از سیمان هیدرولیکی، آب، شن و ماسه و الیاف مجزا، بتن الیافی نامیده می‌شود. الیاف در شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت، و از جنس فولاد، خمیری، شیشه و مواد طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف بارهای وارده را تحمل نموده و ماتریس سیمان محل قرارگیری الیاف را حفظ می‌کند و همچنین از الیاف در برابر آسیب‌های وارده از محیط اطراف حفاظت می‌نماید [۱-۴]. الیاف شیشه یکی از متنوع‌ترین مصالح ساختمانی موجود برای معماران و مهندسان می‌باشد [۵]. در الیاف شیشه‌ای پخش الیاف به صورت مش بندی و شبکه‌ای نسبت به حالت مخلوط تاثیر بیشتری در مقاومت خمشی نمونه دارد [۶]. یکی دیگر از الیافی که در بتن کاربرد زیادی دارد الیاف پلی پروپیلن می‌باشد. الیاف پلی پروپیلن از نوع الیاف مصنوعی با چگالی کم، قطر نازک و مدول الاستیسیته پایین و دارای مشخصات خاصی از قبیل مقاومت، انعطاف پذیری و دوام بالا، منابع فراوان و قیمت ارزان می‌باشد و به همین دلیل می‌تواند به طور گسترده در فرآورده‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد [۷]. در مطالعات انجام شده، افزایش بالای ۱۵٪ مقاومت در بارهای ضربه‌ای کشش تک محوری [۸] و بالای ۵۰٪ در بارهای ضربه‌ای خمشی [۹] برای بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن گزارش شده است. همچنین الیاف پلی پروپیلن در بهبود بارهای ضربه پس از اولین ترک تا گسیختگی کامل بسیار موثر می‌باشد [۱۰]. با اینکه الیاف پلی پروپیلن با مدول پایین باعث کاهش ترک خوردگی بتن بر اثر جمع‌شدگی می‌شود اما الیاف فولادی با مدول بالا برای بهبود خواص مکانیکی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. یکی از موارد حائز اهمیت در الیاف فولادی، نسبت ظاهری می‌باشد چنانچه نسبت ظاهری بزرگتر از نسبت ظاهری بحرانی باشد الیاف گسیخته می‌شوند [۱۲].

در کل الیاف برای بهبود خواص مکانیکی به ویژه ظرفیت جذب انرژی، انعطاف پذیری و طاقت در اثر ضربه، دوام و غیره بسیار مفید می‌باشند [۱۳-۱۸]. نمونه‌های استفاده از بتن الیافی در باند فرودگاه‌ها، تاسیسات تصفیه فاضلاب و بتن بدون جمع‌شدگی و مقاوم در برابر تخریب ناشی از انفجار و ضربه برای ساخت ایستگاه‌های راکتورها، زلال سازها و ایستگاه‌های پمپاژ، به وفور یافت می‌شود. روش‌های متعددی جهت آزمایش بتن در محل ابداع شده که به طور کلی به سه گروه مخرب، نیمه مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌گردد.

روش "پیچش" [۱۹] که در قلمرو آزمون‌های با خرابی جزئی محسوب می‌گردد، روشی سریع، دقیق، کم هزینه و با کاربری وسیع در تعیین مقاومت بتن می‌باشد (شکل ۱). حساس بودن کاربری محل‌های ساخته شده با بتن الیافی، اهمیت استفاده از روش‌های غیر مخرب یا نیمه مخرب نظیر آزمون "پیچش" برای تعیین مقاومت بتن الیافی را پر اهمیت می‌کند. این آزمون در حالت‌های افقی، قائم و به طور کلی بر روی هر سطح صافی به سادگی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی قابل انجام می‌باشد. ابزار مورد استفاده در این آزمون بسیار ساده و قابل دسترس بوده و انجام آزمون نیاز به مهارت قبلی ندارد. جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینه اندک انجام آن می‌باشد که آن را در مقایسه با سایر آزمون‌های درجا ممتاز ساخته است. در این آزمون، یک استوانه فلزی به قطر ۴۰ میلی‌متر با استفاده از چسب رزین اپوکسی، به سطح محل انجام آزمون چسبانده می‌شود. پس از چسباندن استوانه یادشده، با به‌کارگیری یک پیچش‌سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا جسم مورد آزمایش دچار شکست گردد. در این آزمون چون شکست در خود جسم مورد نظر اتفاق می‌افتد در نتیجه نتایج آن نسبت به آزمون‌های تعیین سختی سطح یا آزمون‌هایی که به طور غیر مستقیم مقاومت مصالح را تعیین می‌کنند، از اعتبار بیشتری برخوردار است. با توجه به این که قطر استوانه فلزی ثابت است (۴۰ میلی‌متر)، گشتاور پیچشی شکست نیز می‌تواند بدون نیاز به محاسبه تنش‌ها جهت تخمین مقاومت به کار گرفته شود.

مطالب مندرج در این نوشتار با هدف ارائه منحنی‌های کالیبراسیون روش "پیچش" با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی جهت تعیین مقاومت بتن الیافی و بررسی تاثیر نوع الیاف بر نتایج حاصل از روش "پیچش" ارائه گردیده است.



ج- نحوه انجام

ب- پیچش سنج دستی  
شکل ۱: آزمون "پیچش".

الف- استوانه فلزی

## ۲- کارهای آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح به کار گرفته شده

برای مطالعه تاثیر نوع الیاف بر نتایج بدست آمده از روش "پیچش" برای تعیین مقاومت درجای بتن پنج نوع بتن الیافی با سیمان پرتلند در گستره مقاومت ۱۴ الی ۶۱ مگاپاسکال استفاده گردیده است. سیمان تیپ II و سه نوع الیاف فولادی، الیاف شیشه و الیاف پلی- پروپیلن به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده از بتن‌های الیافی مذکور، با بتن معمولی با سیمان تیپ II مقایسه گردیده است. سیمان مصرفی در تهیه نمونه‌ها از نوع سیمان پرتلند نوع II محصول کارخانه سیمان ساوه می‌باشد. مطابق آزمایش‌های انجام شده طبق آیین‌نامه ASTM C188-95 [۲۰] چگالی سیمان برابر ۳۰۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شده است. شن مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها در آزمایشات، شن (شکسته و طبیعی) با اندازه‌های ۴٫۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر می‌باشد و دانه‌بندی آن، مطابق با استاندارد ASTM C136-01 [۲۱] انجام گرفت. ماسه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در آزمایشات ماسه دوبار شسته شده می‌باشد و دانه‌بندی آن، مطابق با استاندارد ASTM C136-01 انجام گرفت. ضریب نرمی و ضریب هم ارز ماسه به ترتیب برابر ۳٫۲۳ و ۸۹ تعیین شده است. مطابق با استاندارد ASTM C128-15 [۲۲] چگالی ماسه در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی اشباع با سطح خشک برابر ۲۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شده است. مطابق با استانداردهای ASTM C128-15، ASTM C127-15 [۲۳] و ASTM C556-16 [۲۴] میزان جذب آب شن تقریباً ۴ درصد و رطوبت ماسه تقریباً ۵ درصد تعیین گردید. طول هر رشته از الیاف فولادی ۲۵ میلی‌متر و قطر آن ۰٫۴۶۱ میلی‌متر می‌باشد. طبق توصیه ACI 544 [۲۵] الیاف فولادی از ال‌ک با توری فلزی عبور داده شدند تا رشته‌های الیاف از هم باز شوند. الیاف شیشه دارای طول ۱۲ میلی‌متر و از نوع E می‌باشد. الیاف پلی‌پروپیلن نیز دارای طول ۱۲ میلی‌متر بوده می‌باشد. چسب مورد استفاده از نوع رزین‌های اپوکسی دو جزئی با نسبت ترکیب ۳ به ۱ است.

### ۲-۲ نحوه انجام آزمایش

جهت انجام آزمون تعیین مقاومت فشاری، ۱۱۶ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری، و جهت انجام آزمون تعیین مدول گسیختگی ۷۸ تیر ۱۰×۱۰×۷۰ میلی‌متری و نیز ۴۰ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری برای انجام آزمون "پیچش" تهیه گردید (شکل ۲). در جدول شماره ۱ پروسه کلی انتخاب تعداد مشخص نمونه‌ها نشان داده شده است. در این جدول یک طرح اختلاط برای حالت دارای الیاف شیشه و پلی- پروپیلن و بدون الیاف، به ساخت ملات با حداکثر اندازه سنگدانه برابر ۴٫۷۵ میلیمتر اختصاص یافته است.



ج- انجام آزمون "پیچش"



ب- مدول گسیختگی تیر



الف- نمونه مکعبی تحت فشار

شکل ۲: نمونه های بتنی آزمایش شده

جدول ۱: پروسه کلی آزمایشات انجام شده

مجموع	بتن الیافی				نوع بتن
۲	بتن معمولی				
۳	-	پلی پروپیلن	شیشه	فولادی	نوع الیاف
۳۲	5	9	9	6	تعداد طرح های اختلاط
۱۱۶	4×5=20	4×9=36	4×9=36	4×6=24	تعداد نمونه های آزمون فشار
۷۸	3×4=12	3×8=24	3×8=24	3×6=18	تعداد نمونه های آزمون خمش
۴۰	2×5=10	1×9=9	1×9=9	2×6=12	تعداد نمونه های آزمون "پیچش"
۲۳۴	تعداد کل نمونه های ساخته شده				

در طرح اختلاط از روش گام به گام [۲۶] ACI 211/1 با انتخاب حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلی متر و اسلامپ ۸۰ الی ۱۰۰ میلی-متری و درصد تقریبی هوای محبوس شده ۲٪ برای بتن معمولی استفاده گردیده است (جدول ۲). هنگامی که به بتن الیاف افزوده می-شود، الیاف مابین درشت دانه ها قرار می گیرند و اجازه ورود ریزدانه به فضای خالی بین درشت دانه ها و الیاف را نمی دهد لذا برای متراکم شدن بتن و حصول کارایی لازم به ریزدانه بیشتری نیاز است. بدین منظور طبق توصیه ACI 544 از نسبت ریزدانه به کل سنگدانه ۰/۵۰ برای بتن مسلح به الیاف استفاده شد.

جدول ۲: طرح اختلاط نمونه های بتنی (کیلوگرم بر متر مکعب)

طرح	مقاومت (مگاپاسکال)	آب	سیمان	شن	ماسه	نسبت آب به سیمان	ماسه مخلوط	شن مخلوط	الیاف فولادی (٪)	الیاف شیشه (٪)	الیاف پلی- پروپیلن (٪)	فوق روان کننده
۱	۱۵	۲۰.۱	۳۰.۳	۹۲۸	۷۱۳	۰/۶۶	۷۹۸/۵۰	۸۲۰/۵۰	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۳/۰۳
۲	۲۰	۲۰.۴	۳۵.۷	۹۲۸	۶۶۹	۰/۵۶	۷۹۸/۵۰	۷۹۸/۵۰	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۳/۵۷
۳	۲۵	۲۰.۵	۴۰.۰	۹۲۸	۶۳۴	۰/۵۰	۷۸۱	۷۸۱	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۴
۴	۳۰	۲۰.۸	۴۵.۵	۹۲۸	۵۹۰	۰/۴۴	۷۵۹	۷۵۹	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۴/۵۵
۵	۳۵	۲۱.۰	۵۲.۶	۹۲۸	۵۳۲	۰/۳۸	۷۲۰	۷۲۰	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۵/۲۶
۶	۴۰	۲۱.۲	۵۷.۱	۹۲۸	۴۹۵	۰/۳۵	۷۱۱/۵۰	۷۱۱/۵۰	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۵/۷۱
۷	۴۵	۲۱.۵	۶۲.۵	۹۲۸	۴۵۲	۰/۳۲	۶۹۰	۶۹۰	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۸/۱۳
۸	۵۰	۲۱.۶	۶۶.۷	۹۲۸	۴۱۸	۰/۳۰	۶۷۳	۶۷۳	۱۵۶	۵۰/۸۰	۱۸/۲۰	۱۰/۰۱

با فرا رسیدن سن ۲۸ روزه نمونه های تهیه شده، شکستن نمونه های مکعبی طبق استاندارد BS 1881-116:1983 [۲۷] انجام گرفت. دستگاه مورد استفاده برای تعیین مقاومت فشاری نمونه ها دارای مشخصاتی است که در استاندارد ASTM C39/C39M-18 [۲۸] ذکر شده است. مقاومت خمشی و مدول گسیختگی تیرهای ۱۰×۱۰×۷۰ میلی متری نیز طبق استاندارد ASTM C39/C39M-18 به دست آمد. آزمون "پیچش" نیز هم زمان با آزمون فشار و خمش انجام شد.

### ۳- نتایج به دست آمده و تحلیل آن ها

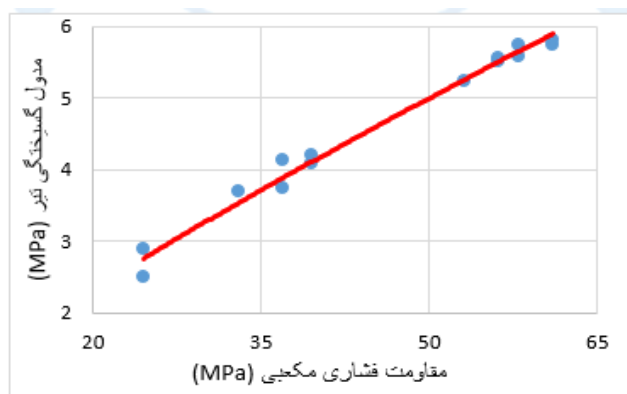
#### ۳-۱- آزمون "پیچش" با استوانه فلزی با قطرهای متفاوت

جهت دستیابی به قطر استوانه مناسب برای آزمون "پیچش" با توجه به تحقیقات صورت گرفته در گذشته [۲۹]، با انجام آزمون مقاومت فشاری و آزمون "پیچش" با استوانه فلزی با قطرهای مختلف بر روی ۴۰ نمونه مکعبی (۱۲۰ آزمون) و به دست آوردن میانگین و

ضریب تغییرات هر آزمون مشاهده گردید که میانگین انحراف از معیار نتایج مقاومت فشاری برابر ۲,۲۱ درصد و میانگین انحراف از معیار نتایج آزمون "پیچش" برای استوانه های فلزی با قطر ۳۵ میلی متر برابر ۱۲,۸۹ درصد، با قطر ۴۰ میلی متر برابر ۸,۸۳ درصد، با قطر ۴۵ میلی متر برابر ۹,۴۰ درصد و با قطر ۵۰ میلی متر برابر ۹,۴۳ درصد می باشد. مقایسه آماری میان نتایج حاصل از انجام آزمون با قطرهای مختلف نشان داده است که استفاده از استوانه فلزی با قطر ۴۰ میلی متر، همبستگی نزدیک تری با مقاومت فشاری نمونه های بتنی ارائه می نماید.

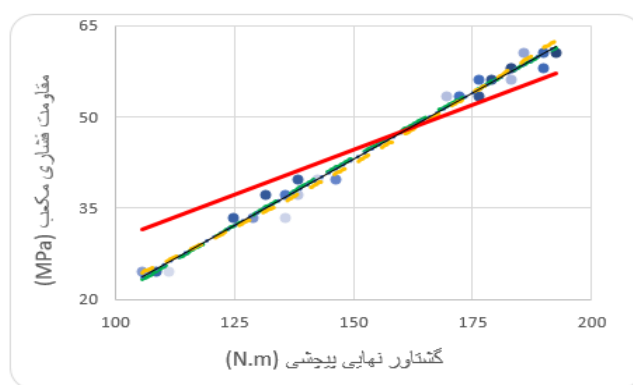
### ۳-۲- نتایج برای بتن با الیاف پلی پروپیلن با سیمان تیپ II (۲٪ حجمی الیاف و حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلی متر)

نتایج نشان داد که یک همبستگی خطی با شدت  $r=0/99$  و ضریب تعیین  $r^2=0/986$  میان نتایج مقاومت فشاری با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد (شکل ۳ الف). اما با توجه به فرضیه تحقیق مبنی بر عبور خط رگرسیون از مبدأ مختصات مقدار ضریب تعیین به  $0/881$  کاهش یافت و اختلاف  $10/5$  درصدی ناشی از حذف مقدار ثابت از معادله رگرسیون خطی کوچک نمی باشد لذا می توان از منحنی توانی که تا حدود زیادی با منحنی خطی ساده تطابق دارد استفاده نمود. نتایج نشان داد که شدت همبستگی میان نتایج حاصل از مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، در یک مدل توانی برابر  $0/99$  می باشد. لذا می توان در صورت به کارگیری روش پیچش با قطر ۴۰ میلی متر برای وسیله آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده بر حسب نیوتن-متر را جهت تبدیل به مقاومت فشاری مکعب  $150$  میلی متری بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن با سیمان تیپ II بر حسب مگاپاسکال، با استفاده از منحنی کالیبراسیون توانی و در محدوده اطمینان  $95\%$  محاسبه نمود. شکل ۳ ب رابطه میان مقاومت فشاری با مدول گسیختگی را با رگرسیون توانی بیان می کند. لذا می توان گفت یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/994$  و ضریب تعیین  $r^2=0/988$  میان نتایج مقاومت فشاری با مدول گسیختگی وجود دارد. پس می توان مقدار مقاومت فشاری را جهت تبدیل به مدول گسیختگی، در معادله منحنی کالیبراسیون توانی مشخص شده در شکل ۳ ب قرار داده و مقدار مورد نظر را، در محدوده اطمینان  $95\%$  به دست آورد. با توجه به شکل ۳ ج نتایج نشان داد که یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/988$  و ضریب تعیین  $r^2=0/976$  میان نتایج مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. لذا می توان انتظار داشت تقریباً  $99$  درصد از تغییرات گشتاور پیچشی اعمال شده، یک ارتباط خطی مستقیم با تغییر مقاومت فشاری نمونه های مکعبی داشته باشد. پس می توان در صورت به کار گیری روش "پیچش" با قطر ۴۰ میلی متر برای وسیله آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده بر حسب نیوتن-متر را جهت تبدیل به مدول گسیختگی تیرهای  $10 \times 10 \times 70$  سانتی متری، در معادله منحنی کالیبراسیون مشخص شده در شکل ۳ ج قرار داده و مقدار مورد نظر را بر حسب مگاپاسکال، در محدوده اطمینان  $99\%$  به دست آورد.



$$y = 0.209x^{0.811}, \quad r^2 = 0.881 \quad (\text{Power.})$$

ب



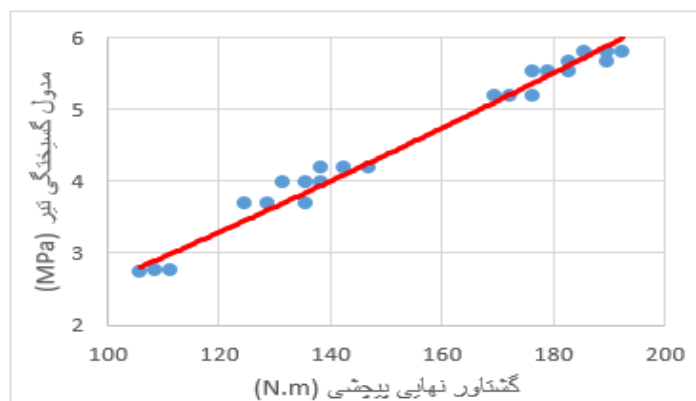
$$y = -0.0003x^2 + 0.5377x - 29.929, \quad r^2 = 0.986 \quad (\text{Polynomial.})$$

$$y = 0.4379x - 22.618, \quad r^2 = 0.9866 \quad (\text{Linear.})$$

$$y = 0.016x^{1.571}, \quad r^2 = 0.982 \quad (\text{Power.})$$

$$y = 0.296x, \quad r^2 = 0.881 \quad (\text{Linear.})$$

الف



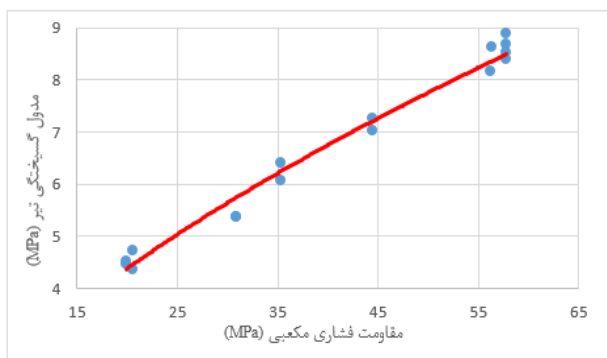
$$y = 0.007x^{1.271}, \quad r^2 = 0.976 \quad (\text{Power})$$

ج

شکل ۳: نتایج حاصل برای بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلین با سیمان تیپ II

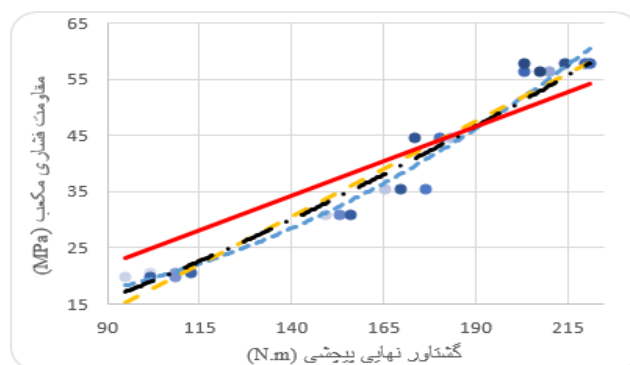
۳-۳- نتایج برای بتن مسلح به الیاف شیشه با سیمان تیپ II (۲٪ حجمی الیاف و حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلی‌متر)

نتایج نشان داد یک همبستگی خطی با شدت  $r=0/97$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/952$  میان نتایج مقاومت فشاری با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد (شکل ۴ الف). اما با توجه به فرضیه تحقیق مبنی بر عبور خط رگرسیون از مبدأ مختصات مقدار ضریب تعیین به  $0/873$  کاهش یافت و اختلاف  $7/9$  درصدی ناشی از حذف مقدار ثابت از معادله رگرسیون خطی کوچک نمی‌باشد لذا می‌توان از منحنی توانی که تا حدود زیادی با منحنی خطی ساده تطابق دارد استفاده نمود. نتایج نشان داد که شدت همبستگی میان نتایج حاصل از مقاومت فشاری و گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، در یک مدل توانی برابر  $0/98$  می‌باشد. لذا می‌توان در صورت به کارگیری روش "پیچش"، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده را جهت تبدیل به مقاومت فشاری، با استفاده از منحنی کالیبراسیون توانی و در محدوده اطمینان  $95\%$  محاسبه نمود. شکل شماره ۴ ب رابطه میان مقاومت فشاری با مدول گسیختگی را با رگرسیون توانی بیان می‌کند. لذا می‌توان گفت یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/99$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/984$  میان نتایج مقاومت فشاری با مدول گسیختگی وجود دارد. پس می‌توان مقدار مقاومت فشاری را جهت تبدیل به مدول گسیختگی، در معادله منحنی کالیبراسیون توانی مشخص شده در شکل ۴ ب قرار داده و مقدار مورد نظر را، در محدوده اطمینان  $95\%$  به دست آورد. با توجه به شکل ۴ ج نتایج نشان داد که یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/97$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/947$  میان نتایج مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. لذا می‌توان انتظار داشت تقریباً  $97$  درصد از تغییرات گشتاور پیچشی اعمال شده، یک ارتباط خطی مستقیم با تغییر مقاومت فشاری داشته باشد. پس می‌توان در صورت به کارگیری روش "پیچش" با قطر  $40$  میلی‌متر برای وسیله‌ی آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده بر حسب نیوتن-متر را جهت تبدیل به مدول گسیختگی تیرهای  $10 \times 10 \times 70$  سانتی‌متری بتن مسلح به الیاف شیشه با سیمان تیپ II، در معادله منحنی کالیبراسیون مشخص شده در شکل ۴ ج قرار داده و مقدار مورد نظر را بر حسب مگاپاسکال، در محدوده اطمینان  $95\%$  به دست آورد.



$$y = 0.695x^{0.617}, \quad r^2 = 0.984 \quad (\text{--- Power.})$$

ب



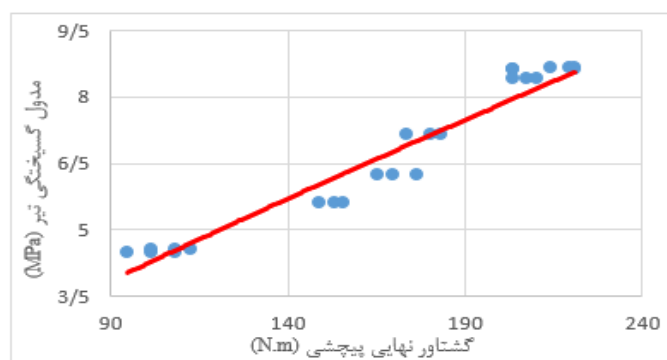
$$y = 0.0014x^2 - 0.0933x + 14.939, \quad r^2 = 0.969 \quad (\text{--- Polynomial.})$$

$$y = 0.3403x - 17.116, \quad r^2 = 0.9523 \quad (\text{--- Linear.})$$

$$y = 0.024x^{1.438}, \quad r^2 = 0.963 \quad (\text{--- Power.})$$

$$y = 0.245x, \quad r^2 = 0.873 \quad (\text{--- Linear.})$$

الف



$$y = 0.072x^{0.882}, \quad r^2 = 0.947 \quad (\text{--- Power.})$$

ج

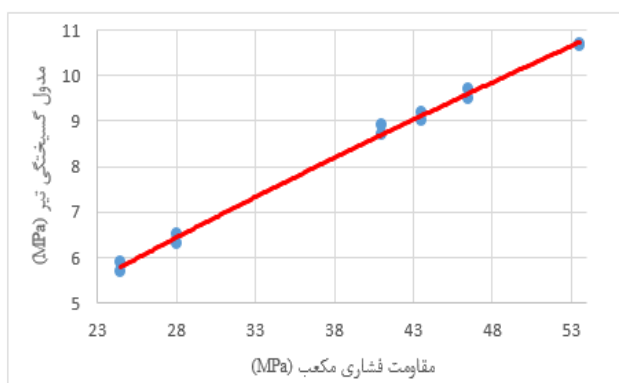
شکل ۴: نتایج حاصل برای بتن مسلح به الیاف شیشه با سیمان تیپ II

### ۳-۴ نتایج حاصل برای بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II (۲٪ حجمی الیاف و حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلی‌متر)

با توجه به شکل ۵ الف نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که یک همبستگی خطی با شدت  $r=0/99$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/978$  میان نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. اما با توجه به فرضیه تحقیق مبنی بر عبور خط رگرسیون از مبدأ مختصات مقدار ضریب تعیین به  $0/829$  کاهش یافت و اختلاف  $14/9$  درصدی ناشی از حذف مقدار ثابت از معادله رگرسیون خطی کوچک نمی‌باشد لذا می‌توان از منحنی توانی که تا حدود زیادی با منحنی خطی ساده تطابق دارد استفاده نمود. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که شدت همبستگی میان نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، در یک مدل توانی برابر  $0/988$  می‌باشد. لذا می‌توان در صورت به کارگیری روش "پیچش" برای وسیله آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده را جهت تبدیل به مقاومت فشاری بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II، با استفاده از منحنی کالیبراسیون توانی و در محدوده اطمینان  $95\%$  محاسبه نمود. شکل شماره ۵ ب رابطه میان مقاومت فشاری با مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف فولادی را با رگرسیون توانی بیان می‌کند. لذا می‌توان گفت یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/997$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/995$

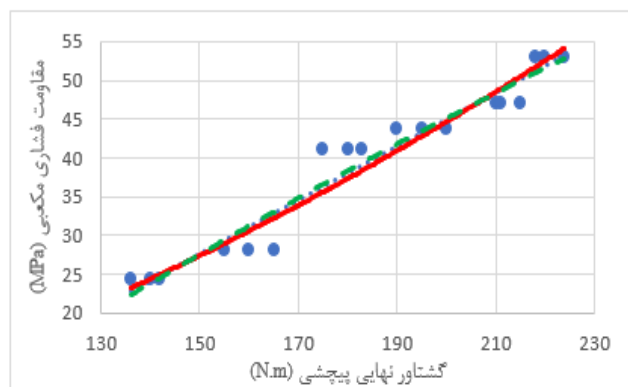


میان نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با مدول گسیختگی وجود دارد. پس می‌توان مقدار مقاومت فشاری را جهت تبدیل به مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II، در معادله منحنی کالیبراسیون توانی مشخص شده در شکل ۵ ب قرار داده و مقدار مورد نظر را، در محدوده اطمینان ۰/۹۵ به دست آورد. با توجه به شکل ۵ ج نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که یک همبستگی خطی با شدت  $r=0/98$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/965$  میان نتایج مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. پس می‌توان در صورت به کارگیری روش "پیچش" با قطر ۴۰ میلی‌متر برای وسیله‌ی آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده بر حسب نیوتن-متر را جهت تبدیل به مدول گسیختگی تیرهای  $10 \times 10 \times 70$  سانتی‌متری بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II، در معادله منحنی کالیبراسیون مشخص شده در شکل ۵ ج قرار داده و مقدار مورد نظر را بر حسب مگاپاسکال، در محدوده اطمینان ۰/۹۵ به دست آورد.



$$y = 0.437x^{0.807}, \quad r^2 = 0.995 \quad (\text{--- Power.})$$

ب



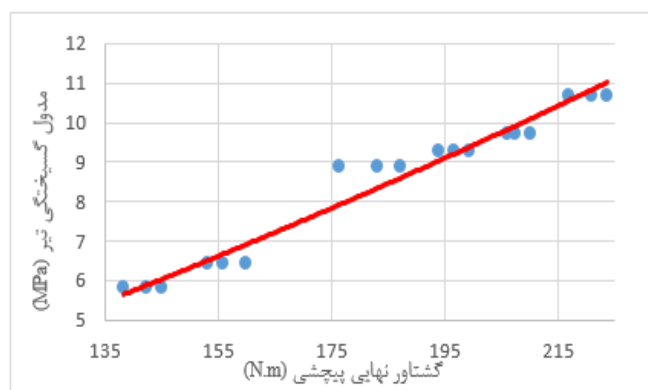
$$y = -0.0001x^2 + 0.409x - 30.63, \quad r^2 = 0.978 \quad (\text{--- Polynomial.})$$

$$y = 0.353x - 22.68, \quad r^2 = 0.978 \quad (\text{--- Linear.})$$

$$y = 0.004x^{1.725}, \quad r^2 = 0.977 \quad (\text{--- Power.})$$

الف

شکل ۵: نتایج حاصل برای بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II



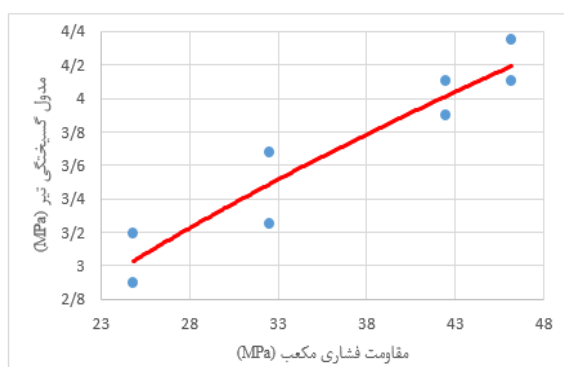
$$y = 0.006x^{1.386}, \quad r^2 = 0.965 \quad (\text{--- Power.})$$

ج

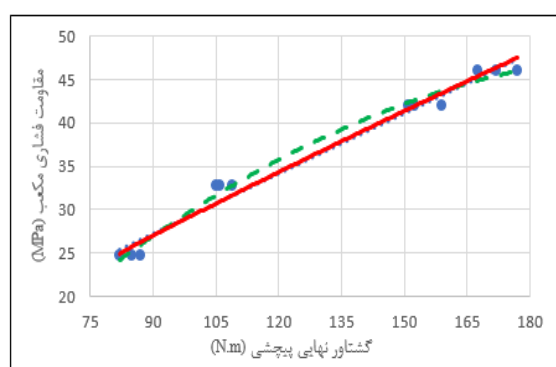
ادامه شکل ۵: نتایج حاصل برای بتن مسلح به الیاف فولادی با سیمان تیپ II

## ۳-۵- نتایج حاصل برای بتن معمولی با سیمان تیپ II (حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلیمتر)

با توجه به شکل ۶ الف نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که یک همبستگی خطی با شدت  $r=0/99$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/981$  میان نتایج مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. اما با توجه به فرضیه تحقیق مبنی بر عبور خط رگرسیون از مبدأ مختصات مقدار شدت همبستگی  $r=0/963$  و ضریب تعیین برابر  $0/927$  به دست آمد و با توجه به اختلاف کم  $0/027$  درصدی ناشی از حذف مقدار ثابت از معادله رگرسیون خطی می توان در صورت به کارگیری روش "پیچش" با قطر ۴۰ میلی متر برای وسیله آزمون، مقدار مورد نظر را در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دست آورد. شکل شماره ۶ ب رابطه میان مقاومت فشاری با مدول گسیختگی بتن معمولی را با رگرسیون توانی بیان می کند. لذا می توان گفت یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/962$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/925$  میان نتایج مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با مدول گسیختگی وجود دارد. پس می توان مقدار مقاومت فشاری مکعب ۱۵۰ میلی متری برحسب مگاپاسکال را جهت تبدیل به مدول گسیختگی بتن معمولی با سیمان تیپ II، در معادله منحنی کالیبراسیون توانی مشخص شده در شکل ۶ ب قرار داده و مقدار مورد نظر را بر حسب مگاپاسکال، در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دست آورد. با توجه به شکل ۶ ج نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که یک همبستگی توانی با شدت  $r=0/995$  و ضریب تعیین  $r^2 = 0/99$  میان نتایج مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی اعمال شده متناظر، وجود دارد. لذا می توان انتظار داشت تقریباً ۹۹ درصد از تغییرات گشتاور پیچشی اعمال شده، یک ارتباط خطی مستقیم با تغییر مقاومت فشاری نمونه های مکعبی داشته باشد. پس می توان در صورت به کارگیری روش "پیچش" برای وسیله آزمون، مقدار گشتاور پیچشی اعمال شده را جهت تبدیل به مدول گسیختگی تیرهای  $10 \times 10 \times 70$  سانتی متری بتن معمولی با سیمان تیپ II، در معادله منحنی کالیبراسیون مشخص شده در شکل ۶ ج قرار داده و مقدار مورد نظر را، در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دست آورد.



$$y = 0.559x^{0.525}, \quad r^2 = 0.925 \quad (\text{--- Power.})$$



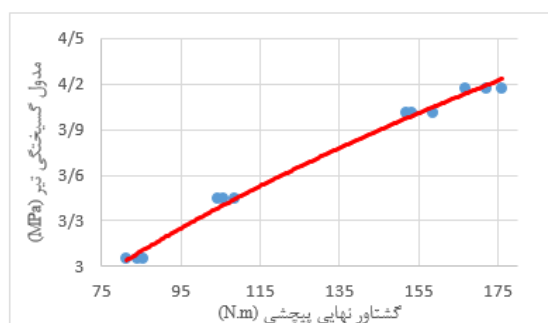
$$y = -0.001x^2 + 0.512x - 9.851, \quad r^2 = 0.990 \quad (\text{--- Polynomial.})$$

$$y = 0.226x + 7.054, \quad r^2 = 0.981 \quad (\text{..... Linear.})$$

$$y = 0.698x^{0.813}, \quad r^2 = 0.981 \quad (\text{--- Power.})$$

ب

الف



$$y = 0.458x^{0.43}, \quad r^2 = 0.990 \quad (\text{--- Power.})$$

ج

شکل ۶: نتایج حاصل برای بتن معمولی با سیمان تیپ II

در نتیجه در صورت بکارگیری روش "پیچش" با قطر ۴۰ میلی متر برای وسیله آزمون می توان مقدار گشتاور نهایی پیچشی اعمال شده بر حسب نیوتن-متر را با استفاده از یک معادله کالیبراسیون خطی ساده یا توانی، جهت تبدیل به مقاومت فشاری مکعب بتنی ۱۵۰ میلیمتری و مدول گسیختگی تیر  $10 \times 10 \times 70$  سانتی متری بتن با قطر حداکثر سنگدانه ۱۹ میلی متری، در معادله کالیبراسیون مربوطه به هر بتن (با ۰.۲٪ حجمی الیاف یا بتن معمولی) قرار داده و مقدار مورد نظر را بر حسب مگاپاسکال به دست آورد. همچنین مقاومت فشاری به-دست آمده بر حسب مگاپاسکال را می توان در معادله توانی مربوطه به هر بتن قرار داده و مدول گسیختگی تیر آن بتن را بر حسب مگاپاسکال تعیین کرد (جدول ۳). همچنین متوسط انحراف از معیار نتایج مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه های مورد آزمایش به ترتیب برابر با ۱/۱۷ مگاپاسکال و ۰/۱۳ مگاپاسکال گزارش شد. در مقابل متوسط انحراف از معیار نتایج حاصل از انجام آزمون های "پیچش" بر روی نمونه های مورد بررسی برابر ۴/۲۰ نیوتن متر به دست آمد که این مقادیر در مقایسه درصدی با میانگین داده ها رقمی جزئی می نماید.

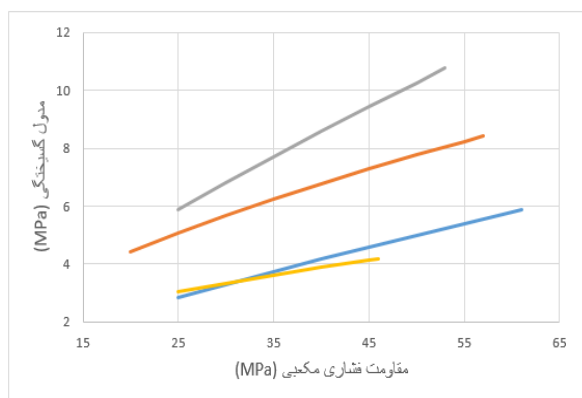
جدول ۳: معادله کالیبراسیون نتایج حاصل از انجام آزمون ها

نوع بتن	نوع سیمان	متوسط انحراف از معیار نتایج حاصل از انجام آزمون			نوع همبستگی و شدت همبستگی $r^2$ و ضریب تعیین $r^2$		
		مقاومت فشاری مگاپاسکال	مدول گسیختگی مگاپاسکال	"پیچش" نیوتن متر	مقاومت فشاری-مدول گسیختگی	مقاومت فشاری-مدول گسیختگی	مدول گسیختگی-"پیچش"
مسلح به الیاف پلی پروپیلن	تیپ II	$0.016 x^{1.571}$	$0.209 x^{0.811}$	$0.007 x^{1.271}$	توانی $r=0.99$ $r^2 = 0.982$	توانی $r=0.994$ $r^2 = 0.988$	توانی $r=0.988$ $r^2 = 0.976$
مسلح به الیاف شیشه	تیپ II	$0.024 x^{1.428}$	$0.695 x^{0.817}$	$0.072 x^{0.822}$	توانی $r=0.98$ $r^2 = 0.963$	توانی $r=0.99$ $r^2 = 0.984$	توانی $r=0.97$ $r^2 = 0.947$
مسلح به الیاف فولادی	تیپ II	$0.040 x^{1.725}$	$0.437 x^{0.807}$	$0.006 x^{1.288}$	توانی $r=0.988$ $r^2 = 0.977$	توانی $r=0.997$ $r^2 = 0.995$	توانی $r=0.98$ $r^2 = 0.965$
معمولی	تیپ II	$0.276 x$	$0.559 x^{0.525}$	$0.458 x^{0.420}$	خطی $r=0.963$ $r^2 = 0.927$	توانی $r=0.962$ $r^2 = 0.925$	توانی $r=0.995$ $r^2 = 0.99$

### ۳-۶- بررسی تاثیر نوع الیاف بر مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و گشتاور پیچشی

در شکل ۷ الف تاثیر الیاف در نتایج حاصل از آزمون پیچش مورد مقایسه قرار گرفته است. از بررسی این شکل ها مشخص می شود که الیاف فولادی باعث بیشترین افزایش در گشتاور پیچشی نهایی آزمون پیچش شده است. همچنین مشاهده می شود الیاف شیشه نیز در افزایش گشتاور پیچشی نهایی بتن تاثیر گذار است. تاثیر الیاف شیشه در افزایش گشتاور نهایی پیچشی بتن کمتر از تاثیر الیاف فولادی می باشد. در مقاومت های فشاری کمتر از ۳۷ الی ۳۹ مگاپاسکال، الیاف پلی پروپیلن، گشتاور پیچشی نهایی بتن را افزایش داده است. در مقاومت های فشاری بیشتر از ۳۷ الی ۳۹ مگاپاسکال، این الیاف کاهش در گشتاور پیچشی نهایی بدست آمده از آزمون پیچش را نتیجه داده است. این رفتار را می توان به ضعیف بودن لایه سطحی بتن الیافی نسبت به لایه های درونی بتن الیافی [۲۵] نسبت داد. با توجه به شیب منحنی های رگرسیون مربوط به بتن مسلح به الیاف شیشه و الیاف فولادی، می توان این رفتار را بر نتایج حاصل از روش پیچش برای آنها تعمیم داد. به زبان ساده تر، با استفاده از روابط ریاضی و علم بر رابطه خطی بین مقاومت فشاری و نتایج آزمون "پیچش"، به راحتی می توان محل تقاطع خطوط رگرسیون بتن الیافی و بتن معمولی را یافت. پس از نقطه تقاطع مربوطه لنگر پیچشی نهایی بدست آمده از آزمون پیچش برای بتن معمولی بیشتر از بتن الیافی خواهد بود. پس می توان گفت، در بتن الیافی با مقاومت فشاری کم، ترک های حاصل از انجام آزمون پیچش بیشتر می توانند در عمق نفوذ کنند و کنده شدن لایه ای از بتن که الیاف ها در آن نفوذ دارند را سبب شوند. اما در بتن الیافی با مقاومت فشاری بالا، ترک های حاصل از انجام آزمون پیچش، اجازه نفوذ به لایه های مقاوم زیرین بتن را پیدا نکرده و فقط لایه ضعیف سطحی کنده می شود.

افزودن ۲٪ حجمی الیاف به بتن، بهبود در رفتار خمشی بتن و افزایش مدول گسیختگی بتن را باعث گردید. از بررسی شکل ۷ ب مقدار این افزایش برای الیاف فولادی بیشتر از الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلین، و برای الیاف شیشه بیشتر از الیاف پلی پروپیلین مشاهده می شود. همچنین مشاهده می شود که الیاف پلی پروپیلین در بتن الیافی با مقاومت فشاری کمتر از ۳۲ الی ۳۴ مگا پاسکال، کاهش اندک و بعد از مقاومت مذکور، افزایش اندک در مدول گسیختگی را سبب شده است. با توجه به همبستگی خطی شدید گزارش شده میان مقاومت فشاری و نتایج حاصل از آزمون پیچش، مطالب فوق الذکر، در رابطه میان مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی نهایی نیز قابل مشاهده است (شکل ۷ ج).



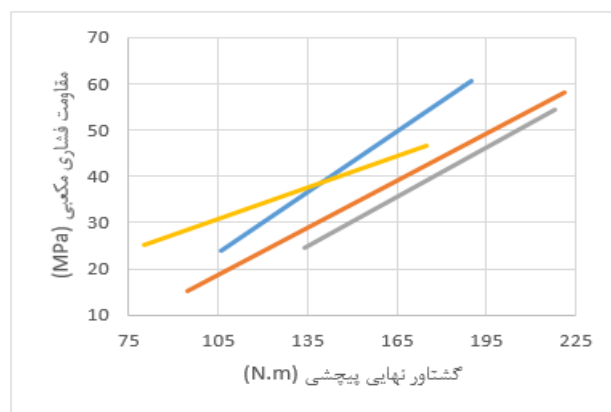
$$y = 0.559x^{0.525} \quad r^2 = 0.925 \quad \text{No Fiber}$$

$$y = 0.209x^{0.811} \quad r^2 = 0.988 \quad \text{P.P.}$$

$$y = 0.695x^{0.617} \quad r^2 = 0.984 \quad \text{G}$$

$$y = 0.437x^{0.807} \quad r^2 = 0.995 \quad \text{S}$$

ب



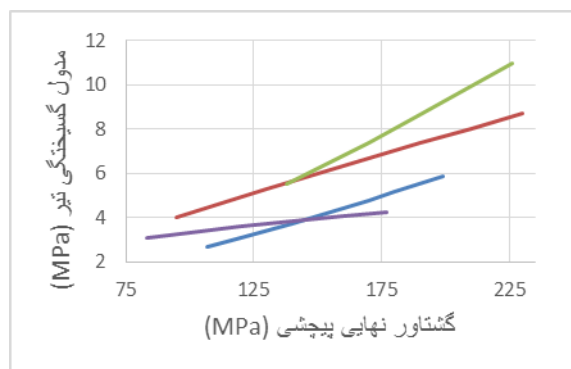
$$y = 0.226x + 7.054 \quad r^2 = 0.981 \quad \text{No Fiber}$$

$$y = 0.4379x - 22.618 \quad r^2 = 0.9866 \quad \text{P.P.}$$

$$y = 0.3403x - 17.116 \quad r^2 = 0.9523 \quad \text{G}$$

$$y = 0.353x - 22.68 \quad r^2 = 0.978 \quad \text{S}$$

الف



$$y = 0.458x^{0.43} \quad r^2 = 0.990 \quad \text{No Fiber}$$

$$y = 0.007x^{1.271} \quad r^2 = 0.976 \quad \text{P.P.}$$

$$y = 0.072x^{0.882} \quad r^2 = 0.947 \quad \text{G}$$

$$y = 0.006x^{1.386} \quad r^2 = 0.965 \quad \text{S}$$

ج

شکل ۷: مقایسه تاثیر نوع الیاف

همچنین در همین راستا به جهت مطالعه‌ی تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ملات‌ها، اقدام به ساخت 18 نمونه مکعبی ۵۰ میلی-متری (شکل ۸) شد. نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری دارای ۶ نمونه مکعبی بدون الیاف، ۶ نمونه مکعبی با الیاف پلی‌پروپیلن و ۶ نمونه مکعبی با الیاف شیشه می‌باشند که برای تعیین مقاومت فشاری آن‌ها با استفاده از جک بتن شکن بر رویشان آزمایش فشاری صورت پذیرفت. طرح اختلاط ملات‌ها به صورت یک قسمت سیمان، سه قسمت ماسه و نسبت آب به سیمان برابر ۰٫۵ می‌باشد.



شکل ۸: نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری برای ملات‌ها

در جدول شماره ۴ نتایج آزمون فشاری بر روی ملات‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴: مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر حسب (MPa)

نوع ملات	تست فشاری نمونه اول	تست فشاری نمونه دوم	تست فشاری نمونه سوم	تست فشاری نمونه چهارم	تست فشاری نمونه پنجم	تست فشاری نمونه ششم	میانگین
بدون الیاف	۴۷٫۲	۵۰٫۰۴	۵۰٫۹۲	۴۷٫۶	۴۸٫۹	۴۸٫۵	۴۸٫۸۶
پلی‌پروپیلن	۵۲	۵۴٫۶	۵۴٫۳۲	۵۴٫۱۷	۵۳٫۰۵	۵۴٫۵	۵۳٫۷۷
شیشه	۵۱٫۲	۴۹٫۸۵	۵۱٫۵۲	۴۹٫۹۲	۵۱٫۳۸	۵۱٫۷	۵۰٫۹۲

با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات بدون الیاف با طرح اختلاط یک قسمت سیمان و سه قسمت ماسه با نسبت آب به سیمان ۰٫۵، برابر ۴۸٫۸۶ مگاپاسکال می‌باشد در صورتی که برای نمونه‌های مکعبی با الیاف پلی‌پروپیلن برابر ۵۳٫۷۷ مگاپاسکال و برای الیاف شیشه برابر ۵۰٫۹۲ است. مشاهده می‌شود الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه باعث افزایش مقاومت فشاری ملات گردیده است.

#### ۴- مدل‌سازی و تحلیل غیر خطی آزمون "پیچش"

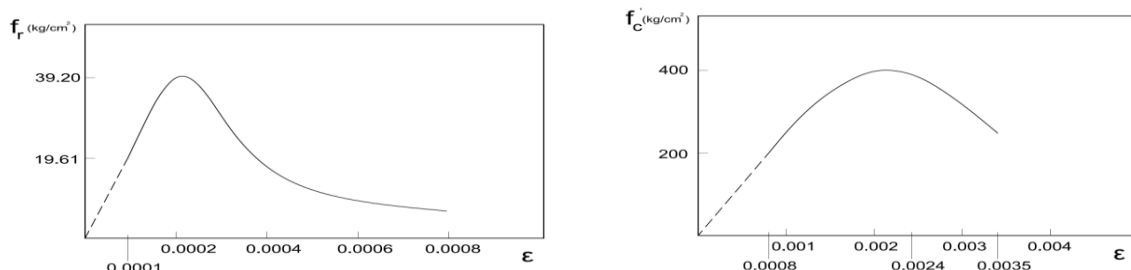
به منظور بررسی الگوی تنش‌های ایجاد شده در بتن، چسب و استوانه آزمون "پیچش" و الگوی ایجاد و گسترش ترک‌ها در نمونه بتنی به هنگام انجام آزمون، اقدام به مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی با استفاده از نرم افزار اجزا محدود Abaqus/CAE شده است. ابتدا مدل‌سازی قطعات آزمون شامل استوانه فلزی با سوراخ مکعبی در مرکز قسمت بالایی آن، چسب و نمونه مکعب ۱۵۰ میلی‌متری بتن به صورت مجزا در محیط نرم افزار انجام گرفت (استوانه فلزی به ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر و قطر ۴ سانتی‌متر با سوراخی مکعبی شکل با اندازه اضلاع ۱/۲ سانتی‌متر، و همچنین چسب به قطر ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر). جهت معرفی مواد در نرم افزار Abaqus، منحنی تنش- کرنش و مقادیر مدول یانگ E و ضریب پواسون  $\nu$  و چگالی مربوط به هر ماده باید تعریف شود. برای فولاد و چسب مقادیر E و  $\nu$  و چگالی طبق جدول ۵ به نرم افزار داده شد. منحنی تنش کرنش فولاد بعد از مرحله الاستیک نیز در نرم افزار تعریف شد. برای انجام این کار در پنجره Edit Material گزینه پلاستیک را انتخاب نموده، نمودار تنش و کرنش پلاستیک را که در اکسل رسم نموده‌ایم به برنامه معرفی می‌نماییم. هنگام تعریف داده‌های پلاستیک در نرم افزار، می‌بایست از مقادیر تنش حقیقی (True Stress) و کرنش حقیقی (True Strain)

استفاده نماییم تا نرم افزار قادر به تفسیر نمودن آن‌ها باشد. بدین منظور برای تبدیل تنش و کرنش اسمی به تنش و کرنش حقیقی از عبارات  $\sigma = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nim})$  و  $\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom})$  استفاده می‌نماییم.

جدول ۵: مشخصات مواد تعریف شده در نرم افزار

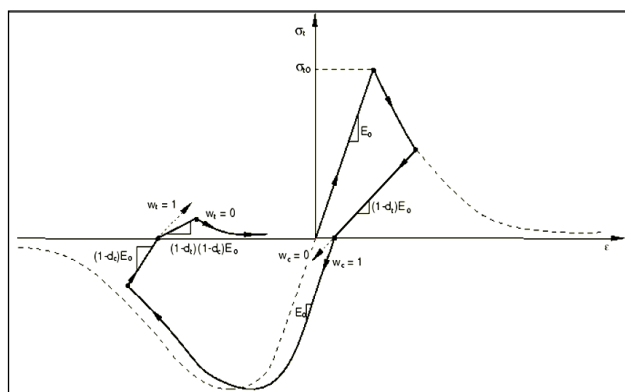
چگالی	نسبت پواسون	مدول یانگ	مصالح
کیلوگرم بر متر سانتی متر مکعب $8 \times 10^{-6}$	۰,۳	کیلوگرم بر سانتی متر مربع ۲۰۴۰۰۰	فولاد
$2 \times 10^{-6}$	۰,۵	۱۲۸۰۰۰	چسب
$2,55 \times 10^{-6}$	۰,۲	۲۹۹۱۵۱/۵	بتن

در نرم افزار Abaqus برای معرفی بتن، علاوه بر منحنی تنش-کرنش در فشار تک محوری می‌توان منحنی تنش-کرنش در کشش را نیز معرفی کرد. ابتدا مقدار  $E=299151/5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع جهت لحاظ رفتار خطی بتن در ناحیه الاستیک منحنی تنش-کرنش به نرم افزار معرفی گردید. برای اینکه نرم افزار، ماده بتن را در رفتار غیر خطی در کشش و فشار مورد تحلیل قرار دهد باید ناحیه پلاستیک منحنی تنش-کرنش تعریف شود. منحنی تنش-کرنش بتن در فشار و کشش برای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و مدول گسیختگی ۳,۹ مگاپاسکال [۳۰] به صورت شکل ۹ در نرم افزار تعریف گردید.



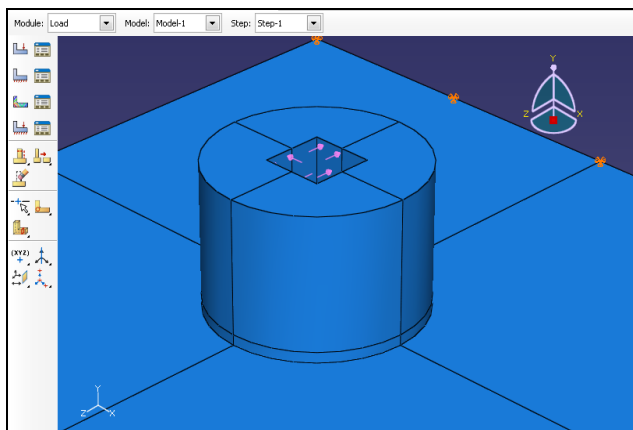
شکل ۹: منحنی تنش کرنش بتن در فشار و کشش [۳۰] (تعریف شده برای نرم افزار)

در تعریف رفتار بتن پس از ترک خوردگی در کشش، طبق پیش فرض نرم افزار برای بتن مقدار احیای سخت شوندهگی فشاری ضریب  $w_c$  برابر یک در نظر گرفته شد تا سخت شوندهگی فشاری در حین بسته شدن ترک‌ها (پس از ترک خوردگی در کشش) کاملاً احیا شود. در مقابل، مقدار ضریب  $w_t$  برابر صفر در نظر گرفته شده است تا از احیای سخت شوندهگی کششی صرف نظر شود. شکل ۱۰ این رفتار بتن را بیان می‌کند [۳۱].



شکل ۱۰: رفتار پیش فرض نرم افزار Abaqus برای احیای سخت شوندهگی فشاری بتن در حین بسته شدن ترک‌های کششی [۳۱]

جهت اعمال گشتاور پیچشی از دو زوج نیروی (چهار نیروی) فشاری گسترده در وجوه داخلی سوراخ قسمت بالایی استوانه فلزی استفاده شد (نیروی اعمالی به وسیله پیچش سنج در شرایط واقعی آزمون). نحوه مدل کردن شرایط مرزی می تواند در حل نتایج حاصل از آن موثر باشد. از این رو باید نزدیک ترین مدل به مدل واقعی در نظر گرفته شود. در آزمایشگاه دو وجه روبرویی جانبی بتن با گیره بسته می شد و بر روی زمین تکیه داشت. پس در تمامی گره های دو وجه روبرویی جانبی،  $U1, U2, U3$  و در وجه پائینی فقط  $U2$  بسته شد (شکل ۱۱).



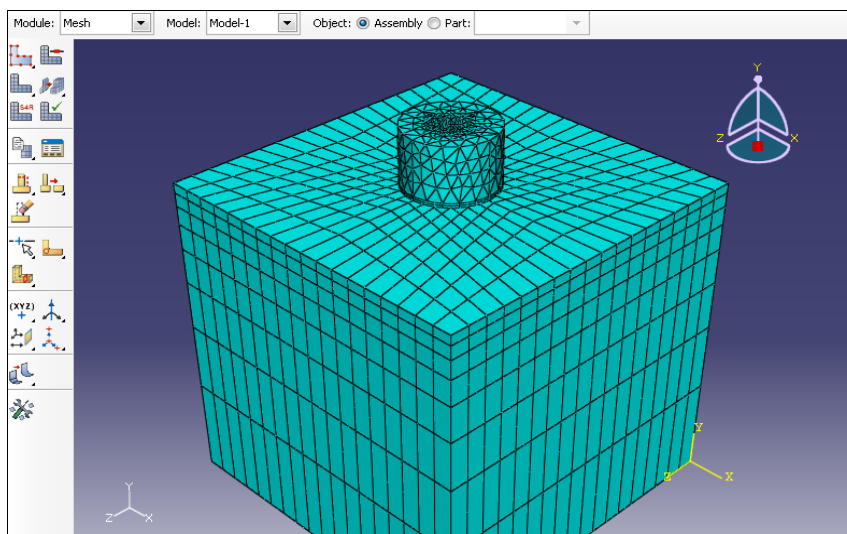
ب- مدل سازی نرم افزاری



الف- نمونه واقعی

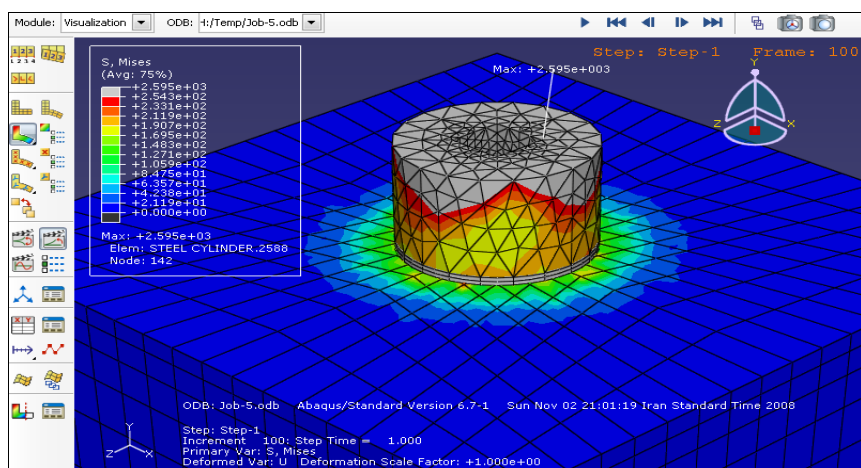
شکل ۱۱: مقایسه مدل در نرم افزار با آزمون آزمایشگاهی

با توجه به محل تمرکز تنش، مش بندی مدل به صورت شکل ۱۲ انجام شد. در کل  $4176$  المان برای این مدل در نظر گرفته شده است.



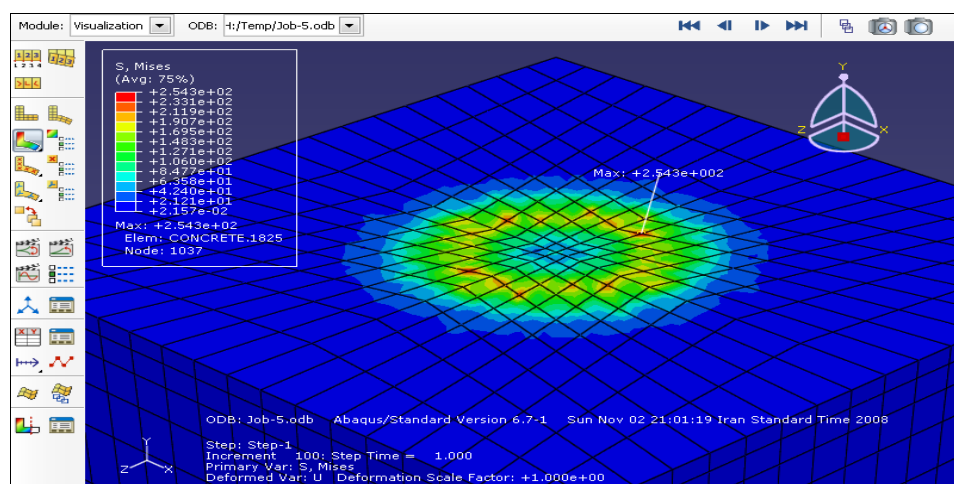
شکل ۱۲: مش بندی مدل

نوع المان های در نظر گرفته شده برای بتن و چسب از نوع المان سه بعدی و هشت گره شش وجهی Hex. و برای استوانه از المان های سه بعدی و چهار گره چهار وجهی (هرمی) Tet. استفاده گردید. توابع شکل بین گره های المان ها به صورت توابع غیر خطی (درجه دو) انتخاب شدند. از بررسی الگوی تنش ایجاد شده در حالت تنش معادل مایسس (شکل ۱۳) ملاحظه می گردد که مطابق انتظار تنش در محل اعمال بار توسط پیچش سنج بیشترین مقدار ( $2595$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع) را به خود اختصاص داده است.



شکل ۱۳: حداکثر تنش ایجاد شده در استوانه آزمون (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)

با دور شدن از محل بار اعمالی، مقدار تنش ایجاد شده در آن به شدت کاهش می‌یابد تا تنش حداکثر ۴۷۹/۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به چسب انتقال یابد. طبق انتظار، تنش در زیر چسب مقدار حداکثر را به خود اختصاص داده و با دور شدن از محیط چسب مقدار تنش کم می‌شود. مقدار حداکثر تنش ایجاد شده در بتن در بار گسیختگی نهایی برابر ۲۵۴/۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به دست آمد (شکل ۱۴).

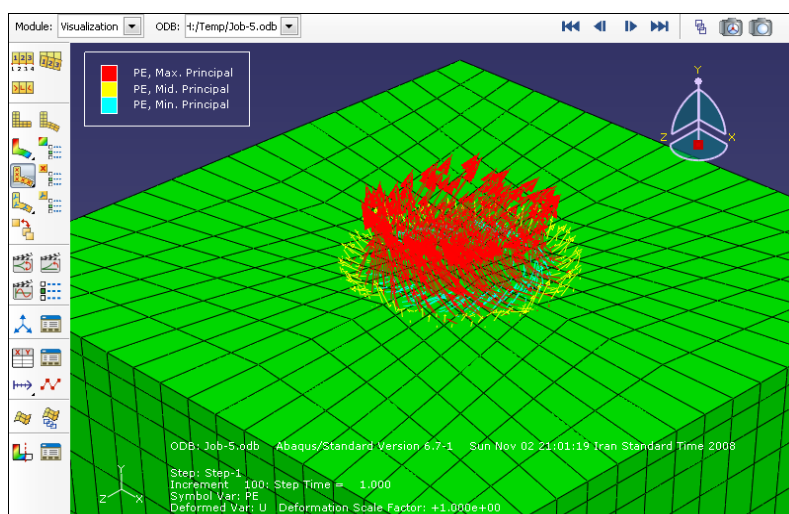


شکل ۱۴: الگوی تنش های ایجاد شده در بتن در بار نهایی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)

حداکثر کرنش بتن در بار نهایی در زیر چسب برابر ۰/۰۰۳۴۰۱ به دست آمد. با افزایش گشتاور پیچشی، رشد ترک‌ها به سرعت از سمت داخل به خارج محیط زیر چسب افزایش می‌یابد. میزان پیشروی ترک‌ها در بار نهایی و در محیط خارجی زیر چسب کمتر از یک سانتی متر و در عمق بتن کمتر از نیم سانتی متر می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود حداقل فاصله قرار گرفتن استوانه فلزی نسبت به یکدیگر برابر نصف قطر وسیله آزمون در نظر گرفته شود. اما از آنجاکه در بتن با مقاومت کم امکان پیشروی ترک‌ها در اطراف استوانه افزایش می‌یابد لذا پیشنهاد می‌گردد این مقدار برای بتن‌های با مقاومت کم، به اندازه قطر وسیله آزمون در نظر گرفته شود. همچنین در ترمیم خرابی حاصل از انجام آزمون، منطقه تا یک سانتی متر در محیط خارجی استوانه و نیم سانتی متر در عمق محل خرابی ترمیم گردد (شکل ۱۵). در استاندارد BS1881 [۳۲] در بخش ۸ که مربوط به تعیین مقاومت بتن با تست Pull off می‌باشد، از استوانه‌های ۵۰ میلیمتری استفاده می‌گردد به گونه‌ای که استوانه‌ها همانند روش "پیچش" به سطح بتن چسبانده می‌شوند و سپس کشیده می‌شوند تا از سطح بتن جدا گردند. در این قسمت از استاندارد ذکر گردیده است که فاصله‌ی استوانه‌های فلزی که روی سطح بتن چسبانده می‌شوند باید حداقل از یکدیگر به



اندازه‌ی قطر استوانه بوده و این فاصله از لبه‌های بتن به اندازه‌ی حداقل برابر نصف قطر استوانه باشد. ملاحظه می‌گردد نتایج به دست آمده در این قسمت از مقاله توسط تحلیل اجزا محدود، با استاندارد مذکور همخوانی دارد.



شکل ۱۵: الگوی گسترش ترک‌ها در بار نهایی

## ۵- نتیجه گیری

از انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج به دست آمده که در این مقاله ارائه گردیده است می‌توان نتیجه گرفت که:

آزمون "پیچش" می‌تواند به عنوان روشی دقیق با کاربری وسیع، در تعیین مقاومت بتن مورد استفاده قرار گیرد. این آزمون با خرابی جزئی در قلمرو آزمون‌های نیمه مخرب محسوب شده و خرابی حاصل از انجام آن بسیار جزئی می‌باشد.

از بررسی نتایج ملاحظه می‌گردد که متوسط انحراف از معیار نتایج مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش به ترتیب برابر با ۱/۱۷ مگاپاسکال و ۰/۱۳ مگاپاسکال گزارش شد. در مقابل متوسط انحراف از معیار نتایج حاصل از انجام آزمون‌های "پیچش" بر روی نمونه‌های مورد بررسی برابر ۴/۲۰ نیوتن متر به دست آمد که این مقادیر در مقایسه درصدی با میانگین داده‌ها رقمی جزئی می‌نماید.

از بررسی نتایج آزمون "پیچش" ملاحظه شد، تعیین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی بتن در محدوده اطمینان ۹۵٪ می‌تواند صورت گیرد.

روابط بسیار نزدیکی میان مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و مدول گسیختگی تیر  $10 \times 10 \times 70$  سانتی‌متری با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" وجود دارد. به‌طوریکه بررسی‌های آماری نشان داد بیشترین ارتباط معنی‌دار میان مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و مدول گسیختگی با نتایج حاصل از آزمون "پیچش"، مربوط به یک رابطه خطی ساده یا توانی با شدت همبستگی بالای ۰/۹۵ می‌باشد.

الیاف فولادی بیشترین افزایش در گشتاور پیچشی نهایی آزمون پیچش را ایجاد کرد. همچنین الیاف شیشه نیز در افزایش گشتاور پیچشی نهایی بتن تاثیر گذار است. تاثیر الیاف شیشه در افزایش گشتاور نهایی پیچشی بتن کمتر از تاثیر الیاف فولادی می‌باشد. در مقاومت‌های فشاری کمتر از ۳۷ الی ۳۹ مگاپاسکال، الیاف پلی پروپیلین، گشتاور پیچشی نهایی بتن را افزایش می‌دهد. اما در مقاومت‌های فشاری بیشتر از ۳۷ الی ۳۹ مگاپاسکال، این الیاف کاهش در گشتاور پیچشی نهایی بدست آمده آزمون پیچش را نتیجه می‌دهد.

افزودن ۲٪ حجمی الیاف به بتن، بهبود در رفتار خمشی بتن و افزایش مدول گسیختگی بتن را باعث گردید. مقدار این افزایش برای الیاف فولادی بیشتر از الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلین، و برای الیاف شیشه بیشتر از الیاف پلی پروپیلین گزارش شد. همچنین مشاهده گردید که الیاف پلی پروپیلین در بتن الیافی با مقاومت فشاری کمتر از ۳۲ الی ۳۴ مگا پاسکال، کاهش اندک و بعد از مقاومت

مذکور، افزایش اندک در مدول گسیختگی را سبب شده است. با توجه به همبستگی خطی شدید گزارش شده میان مقاومت فشاری و نتایج حاصل از آزمون پیچش، مطالب فوق الذکر، در رابطه میان مدول گسیختگی با گشتاور پیچشی نهایی نیز قابل تعمیم است.

افزودن الیاف پلی پروپیلن و شیشه به ملات با طرح اختلاط یک قسمت سیمان، سه قسمت ماسه و نسبت آب به سیمان برابر ۰.۵، باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی متری گردیده است.

از انجام آنالیز اجزا محدود با لحاظ توابع شکل غیرخطی برای المان‌ها و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن در کشش و فشار بر روی نمونه بتنی با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال مشخص شد که رعایت فاصله حداقل به اندازه ۲۰ میلی متر تاثیری بر نتایج آزمون "پیچش" و پراکندگی آن‌ها ندارد، که این مقدار برای بتن با مقاومت‌های پائین به اندازه ۴۰ میلی متر توصیه می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود در حجمی به عمق ۰/۵ سانتی متر و قطر ۶۰ میلی متر (۱/۵ برابر قطر استوانه آزمون)، عملیات ترمیم در محل خرابی حاصل از انجام آزمون صورت گیرد.

## مراجع

- [1] Salahaldein, A. and Muhsen, S. (2016). Influence of polypropylene fiber on strength of concrete. American Journal of Engineering Research, Vol 5, p.p. 223-226.
- [2] Saeid, K. and Hazizan, M. and Morteza, J. and Jalal, R. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. Construction and Building Materials Journal, Vol 27, p.p. 73-77.
- [3] Sadiqul, I. and Sristi, D.G. (2016). Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. International Journal of Sustainable Built Environment, Vol 5, p.p. 345-354.
- [4] Peng, Zh. and Qing-fu, L. (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. Composites Part B: Engineering Journal, No 45, p.p. 1587-1594.
- [5] Martin, A.M. (2013). Fiber Reinforced Polymers–The Technology Applied for Concrete Repair. Publish with IntechOpen, 229 Pages.
- [6] Shengrui, L. and Tat-Seng, L. and Leonard, H. (2005). Composite structural panels subjected to explosive loading. Construction and Building Materials, Vol. 19, p.p. 387-395.
- [7] Shakir, A. and Maha, E. (2008). Effect of polypropylene fibers on properties of mortar containing crushed brick as aggregate. Engineering and Technology Journal, Vol. 26, No. 12, P.P. 1508-1513.
- [8] Bhargava, J. and Rehnstrom, A. (1977). Dynamic Strength of Polymer Modified and Fiber Reinforced Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 7, p.p. 199-208.
- [9] Sidney, M. and Gary, V. (1988). Properties of Concrete Reinforced with Fibrillated Polypropylene Fibres under Impact Loading. Cement and Concrete research, Pergamon J., Ltd., USA, Vol. 18, p.p. 109-115.
- [10] Vondran, G. L. and Nagabhusanam, M. and Ramakrishnan, V. (1990). Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concretes. Fiber Reinforced Cements and Concretes, Recent Developments, edited by R. N. Swamy and B. Barr, Elsevier Applied Science, London and New York, p.p. 533-543.
- [11] Sasikala K. and Vimala S. (2013). A comparative study of polypropylene, recron and steel fiber reinforced engineered cementitious composites. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol 2(4), p.p. 1136-1142.
- [12] Shah, S.P. (1984). Fibre Reinforced Concrete, in Handbook of Structural Concrete. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [13] Li, V.C. and Wang, S. and Wu, C. (2001). "Tensile strain-hardening behaviour of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). ACI Material Journal, Vol. 98, No. 6, p.p. 483-492.
- [14] Nelson, P.K. and Li, V.C. and Kamada, T. (2002). Fracture toughness of microfiber reinforced cement composites. ASCE Journal Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No. 15, p.p. 384-391.
- [15] Balendran, R.V. and Zhou, F.P. and Nadeem, A. and Leung, Y.T. (2002). Influence of steel fibers on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. Building and Environment, Vol. 37, No. 12, p.p. 1361-1367.

- [16] Naaman, A.E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, p.p. 241-252.
- [17] Balaguru, P. and Najm, H. (2004). High-performance fiber-reinforced concrete mixture proportions with high fiber volume fractions. *ACI Material Journal*, Vol. 101, No. 4, p.p. 281-286.
- [18] Wang, Z.L. and Wu, L.P. and Wang, J.G. (2010). A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 8, p.p. 1358-1363.
- [19] Naderi, M. (2007). New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, *Journal of Testing and Evaluation/Citation Page*, Vol. 35, Issue 6.
- [20] ASTM C188-95. (2003). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM C136-01. (2001). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM 128-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM 128-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM C556-16. (2016). Standard Test Method for Resistance of Overglaze Decorations to Attack by Detergents, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] ACI Committee 544, Report 544.1R-96. (2009). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, *Concr. Int.*, ACI Manual of Concrete Practice, Part 5.
- [26] ACI 211.1-91. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, American Concrete Institute.
- [27] British Standard 1881-118. (1983). Methods of Testing concrete, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, British Standards Institution, London.
- [28] ASTM C39/C39M-18. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] Naderi, M. and Salimi, A. (2009). Assessing the Effects of Probe Diameter, Humidity and Surface Texture on the Concrete Strength, Measured by "Twist-off" Method. M.Sc. Imam Khomeini International University, Faculty of engineering.
- [30] Neville, A.M. (2011). Properties of concrete. 4th. California: Pearson, 846.
- [31] Kaspar, W. (2007). Modeling of Concrete Materials and Structures. University of Colorado at Boulder. University of Vienna, Austria, August 20-28, 2007.
- [32] British Standard 1881-207. (1992). Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests, British Standards Institution, London.