

Evaluation of damaged structures after a crisis using “Twist-off” testing

Ali Saberi Varzaneh^a, Mahmood Naderi^b

^a. Postdoc researcher, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^b. Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2061738.1190>

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Crisis Management,
Structural Damage,
In-situ Twist-off
Testing,
Strength of Concrete.

Received:

25 May 2025

Received in revised form:

20 August 2025

Accepted:

28

September 2025

PP.234-247

According to the Law on Crisis Management, resilience means the ability of a society to withstand disasters. It is also one of the stages of crisis management for resilience, prevention and risk reduction. Damage to urban structures after an earthquake has consequences such as reduced resilience and lack of timely relief to citizens. Determining the in-situ strength of concrete of existing structures without destruction can provide a good view of its strength and tolerance to earthquakes. However, non-destructive methods either measure the strength indirectly or, like the "pull-off" test, have an imported and expensive device. In this article, the in-situ strength of concrete samples with different strengths was evaluated by using the new "Twist-off" test and by providing a calibration chart, the strength of some urban structures was measured directly without destruction and, if necessary, their reinforcement was carried out to reduce earthquake damage. By performing a "Twist-off" test on a number of concrete structures, it was determined that some of them needed to be reinforced so that they could be used after the earthquake. The existence of a correlation coefficient of 0.95 between the "Twist-off" test and the standard test indicates the high accuracy of the above test. It was observed by SEM photography that the concrete under water curing had integrity and no large porosity was observed in them.

Corresponding author . Ali Saberi Varzaneh. (Email: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir)

Extended Abstract:

Introduction

The purpose of this article is to provide calibration curves for measuring the compressive strength of existing concrete structures using the "Twist-off" test. With the simple, inexpensive, and accurate "Twist-off" method, the compressive strength of many structures can be estimated in the shortest possible time and, if necessary, they can be reinforced before a crisis occurs so that less damage is caused to the structures after the crisis and loss of life and property can be prevented. Many laboratory studies have been conducted using the "Twist-off" test. In previous studies on concrete with different treatments, a correlation coefficient of about 0.94 was obtained between the results of the "Twist-off" test and the strength of concrete. In another study that used the "Twist-off" test to measure the compressive strength of cement mortars, it was concluded that the above test has a good accuracy. Also, the relationship between the modulus of rupture of pozzolanic concrete beams and the results of the "Twist-off" test also indicates the high accuracy of the above test for measuring various characteristics of pozzolanic concrete.

Methodology

In the in-situ "Twist-off" test, a steel cylinder with a radius of 25 mm is glued to the concrete surface and a torsional moment is applied to it. The equipment and supplies used in this test are very simple and inexpensive. The damage to the concrete in this test is very superficial and insignificant.

Results and discussion

Using power statistical analysis, it is observed that the correlation coefficient is above 95%, which indicates the high accuracy of the in-situ "Twist-off" test for evaluating the compressive strength of concretes with different strength classes. Therefore, in order to measure the in-situ strength of concretes, using the "Twist-off" method, the torsional moment obtained from the above test can be used to convert it into concrete strength and by using the power calibration curve. Concrete water tanks and concrete retaining walls have adequate compressive strength and therefore do not require reinforcement. However, the concrete bridges tested in this study and the concrete foundation do not have adequate compressive strength and a solution must be devised to reinforce them so that they can still be used after an earthquake. Before this study, standard cores had to be removed from the concrete to measure the compressive strength of existing concrete structures or elements and then tested in the laboratory. This would cause destructive damage to the structure. Or, the in-situ

"pull-off" test had to be used, which requires an imported and very expensive device.

Conclusion

In this study, to measure the in-situ compressive strength of concrete structures, a new and in-situ "Twist-off" test was introduced and initially the results were compared with the results of the standard test. Then, laboratory samples and real concrete structures were evaluated using the above test. The results are as follows:

1- According to the country's crisis management law, cities must become resilient to upcoming crises. One of the issues of resilience is the need to know the compressive strength of existing concrete structures of different ages.

2- Given the accuracy of the new and in-situ "Twist-off" test, the compressive strength of existing structures can be measured with high accuracy without the need to destroy concrete.

3- By comparing the in-situ "Twist-off" test and the standard laboratory compressive strength test, it was determined that there is a power relationship with a correlation coefficient of over 95 percent between the results, which indicates the accuracy of the "torsion" test in assessing the in-situ compressive strength of concrete.

4- By performing a "twist" test on a number of existing concrete structures in Tehran, it was determined that a number of them need to be reinforced so that they can be used after the earthquake. Therefore, it is necessary to evaluate their compressive strength using the above test without destroying the concrete of the structures.

5- Using SEM photography, it was observed that the concrete samples under water curing had integrity and no large porosity was observed in them. However, insufficient curing caused the formation of extensive networks of fine pores in the microstructure of the concrete.

Funding

This work is based upon research funded by Iran National Science foundation (INSF) under project No. 4030409.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پس از بحران با بهره‌گیری از آزمون "پیچش"

علی صابری ورزنده* - پژوهشگر پسادکتر، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
محمود نادری - استاد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2061738.1190>

چکیده

طبق قانون مدیریت بحران، تاب‌آوری به معنای توانایی جامعه، برای ایستادگی در برابر حوادث می‌باشد. یکی از مراحل مدیریت بحران جهت تاب‌آوری شهری، پیشگیری و کاهش خطر می‌باشد. خسارات وارده به سازه‌های شهری بعد از زلزله دارای عواقبی مانند کاهش تاب‌آوری و عدم امداد رسانی بموقع به شهروندان می‌گردد. تعیین مقاومت در جای بتن سازه‌های موجود، بدون تخریب می‌تواند دید مناسبی از مقاومت و تحمل آن در برابر زلزله ارائه کند. اما روش‌های غیرمخرب، یا مقاومت را بصورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌نمایند یا مانند آزمون "کشیدن از سطح" دارای دستگاه وارداتی و گران قیمتی می‌باشد. در این مقاله با بکارگیری آزمون نوین "پیچش" اقدام به ارزیابی مقاومت در جای نمونه‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف گردیده و با ارائه نمودار کالیبراسیون، مقاومت برخی سازه‌های شهری بدون تخریب و بصورت مستقیم اندازه‌گیری شده و می‌توان در صورت نیاز نسبت به مقاوم سازی آن‌ها جهت کاهش آسیب‌های زلزله اقدام نمود. با انجام آزمون "پیچش" روی تعدادی سازه بتنی مشخص گردید تعدادی از آن‌ها نیاز به مقاوم‌سازی دارند تا بعد از زلزله بتوان از آن‌ها بهره‌برداری نمود. وجود ضریب همستگی ۰/۹۵ بین آزمون "پیچش" و آزمون استاندارد نشان از دقت بالای آزمون فوق می‌باشد. با عکسبرداری SEM مشاهده شد که بتن تحت عمل‌آوری در آب دارای یکپارچگی بوده و تخلخل زیادی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

واژگان کلیدی

مدیریت بحران
خسارت سازه‌ای
آزمون درجای "پیچش"
مقاومت فشاری بتن

تاریخ ارسال

۱۴۰۴/۰۳/۰۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۰۶

صص: ۲۳۴-۲۴۷

۱- مقدمه

قانون مدیریت بحران کشور (۲۰۱۹) با هدف ایجاد چارچوب یکپارچه برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و هماهنگی دستگاه‌ها در کاهش خطرپذیری، پیشگیری، آمادگی، بازسازی و بازتوانی در برابر بحران‌ها تصویب و ابلاغ شد. یکی از محورهای این قانون، پیش‌بینی، بازسازی و بازتوانی است که ارزیابی دقیق سازه‌ها پیش از بحران و پس از بحران، می‌تواند بخشی مؤثر از آن باشد. این مقاله بر مرحله پیش‌بینی و ارزیابی متمرکز شده است. پیش‌بینی و برآورد مقاومت واقعی سازه‌های بتنی، ابزار ارزشمندی برای تصمیم‌گیری مهندسی به‌منظور اجرای اقدامات مقاوم‌سازی در صورت نیاز است. مطابق با استانداردهای رایج، تعیین مقاومت فشاری بتن مستلزم استخراج مغزه از عضو سازه و آزمایش آن در شرایط آزمایشگاهی است؛ روشی که در عین دقت بالا، ماهیتی مخرب داشته و می‌تواند موجب کاهش موضعی ظرفیت باربری عضو گردد. این آسیب بالقوه، به‌ویژه در سازه‌هایی که پس از رویدادهایی مانند زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، خود می‌تواند به عامل ایجاد بحران بدل شود (Celik & Ozdemir, 2025).

بسیاری از سازه‌های موجود در مناطق شهری از جمله پل‌های بتنی در معرض شرایط محیطی متفاوت از جمله سرمای شدید در زمستان و گرمای زیاد در تابستان و همچنین بارگذاری‌های مختلفی قرار دارند. لذا استناد به مقاومت فشاری بتن در مراحل اولیه ساخت قادر به ارائه تصویری جامع از وضعیت واقعی و کنونی مقاومت بتن در سازه نیست. از این‌رو، به‌کارگیری روش‌های ارزیابی درجا، برای سنجش مستقیم مقاومت و عملکرد سازه تحت شرایط بهره‌برداری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Wang et al, 2025).

آزمون‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری مقاومت بتن به شکل درجا موجود می‌باشد مانند مغزه‌گیری از محل مورد نظر که در زمره آزمون‌های مخرب قرار داشته و نتایج آن،

کمتر از مقاومت فشاری واقعی است (Benyahia et al, 2023). همچنین مغزه‌گیری در برخی قسمت‌های سازه، قابل انجام نیست (Saleh et al, 2022). روش بیرون‌کشیدن یکی از آزمون‌های درجا محسوب می‌شود که در زمره‌ی روش‌های نیمه‌مخرب یا مخرب طبقه‌بندی شده و منجر به ایجاد آسیب موضعی در بتن می‌گردد. در این روش، یک واحد تعبیه‌شده در بتن به‌صورت مکانیکی خارج می‌شود و نیروی لازم برای این فرآیند با مقاومت فشاری بتن هم‌بستگی دارد. به‌رغم قابلیت آن در ارزیابی مقاومت فشاری در محل، به دلیل ایجاد تخریب بتن، به‌کارگیری آن در برخی اجزای بحرانی سازه با محدودیت همراه است (Osman & Fam, 2025). از آزمون‌های غیر مخرب می‌توان به روش‌های اولتراسونیک (ASTM C597, 2016 و چکش اشمیت ASTM C808, 2018) اشاره نمود. البته حجم آرمتور موجود، وجود حفره‌ها و ترک‌ها باعث اثرگذاری روی نتایج می‌گردد (Singh et al. 2022). روش کشیدن از سطح، آزمون درجای دیگری می‌باشد که برای تعیین مقاومت بتن (ASTM C1583, 2013) بکار می‌رود. البته تحقیقات قبلی نمایانگر دقت بالای این آزمون می‌باشد (Das et al, 2024) اما دارای دستگاه وارداتی و گران قیمتی می‌باشد. در این مقاله از آزمون نوین، درجا و غیر مخرب "پیچش" (Naderi, 2007) استفاده شده است. در آزمون مورد اشاره، استوانه فولادی با قطر ۵۰ میلی‌متر روی سطح بتن چسبانده شده و با استفاده از یک پیچش‌سنج معمولی، به استوانه فولادی لنگر پیچشی اعمال می‌گردد تا سطح ناچیزی از روی بتن دچار شکست شود. تحقیقات فراوانی بصورت آزمایشگاهی با آزمون "پیچش" انجام پذیرفته است. در تحقیقات قبلی که روی بتن با عمل‌آوری‌های مختلف انجام شده است، ضریب همبستگی حدود ۰/۹۴ بین نتایج آزمون "پیچش" و مقاومت بتن به دست آمده است (Saberi et al, 2024). در تحقیق دیگری از آزمون فوق جهت ارزیابی مقاومت بتن‌های حاوی مواد کاهنده

ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پس از بحران با بهره‌گیری از آزمون "پیچش"

۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده گردید. آب مورد استفاده نیز آب شرب شهر قزوین می‌باشد. سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136 (2006) دانه بندی گردیدند. مقدار جذب آب سنگدانه‌های درشت و ریز طبق استانداردهای (ASTM C128, 2015) و (ASTM C127, 2012) به ترتیب برابر ۲/۶ و ۳/۲ درصد تعیین گردیدند. چسب استفاده شده در آزمون پیچش نیز از نوع رزین اپوکسی دو جزئی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱: مشخصات چسب مصرفی

رنگ	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
طوسی	۷۰	۱۵	۱۳۷۵۰

۲-۲- روش "پیچش"

در آزمون درجای "پیچش"، یک استوانه فولادی به شعاع ۲۵ میلی‌متر با استفاده از چسب، روی سطح بتن چسبانده شده و مطابق شکل ۱-الف به آن لنگر پیچشی اعمال می‌گردد. در شکل ۱-ب نیز استوانه‌های فولادی چسبانده شده روی نمونه‌های بتنی قابل مشاهده است. در شکل ۱-ج نیز انجام آزمون فوق در آزمایشگاه نشان داده شده است. تجهیزات و لوازم به کار رفته در این آزمون، بسیار ساده و ارزان می‌باشد. آسیب وارد شده به بتن در این آزمون بسیار سطحی و ناچیز می‌باشد.

نمود استفاده گردید که نتایج نشان دهنده دقت بالای آن آزمون می‌باشد (Parhizkari et al, 2022). از آزمون "پیچش" برای ارزیابی مقاومت بتن‌های قرار گرفته در شرایط حاد نیز بهره گرفته شده است (Saberi et al, 2023). برای ارزیابی مقاومت بتن‌های الیافی نیز از آزمون فوق استفاده شده است که نتایج حاصله بیانگر دقت مناسب آزمون "پیچش" می‌باشد (Saberi & Naderi, 2020). علاوه بر ارزیابی مقاومت فشاری بتن، از آزمون فوق می‌توان برای ارزیابی مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف نیز استفاده نمود (Naderi & Kaboudan, 2021). در تحقیقی دیگر از آزمون "پیچش" برای چسبندگی بین بتن و لایه‌های FRP استفاده شده است که نتایج بیانگر همبستگی مناسب با نتایج حاصل از آزمون کشیدن سطح بوده است (Naderi & Rahbari, 2021). در تحقیقی دیگر نتایج حاصل از آزمون پیچش با نتایج آزمون استاندارد برای ارزیابی چسبندگی بین ملات و فولاد مورد مقایسه قرار گرفت (Saberi & Naderi, 2023). در یک تحقیق نسبت به مقایسه نتایج آزمون "پیچش" و آزمون کشیدن از سطح جهت بررسی مقاومت فشاری آن‌ها استفاده گردید که نتایج بیانگر دقت مناسب آزمون "پیچش" می‌باشد (Saberi & Naderi, 2021).

مطالب درج شده در این مقاله با هدف ارائه منحنی‌های کالیبراسیون جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری سازه‌های بتنی موجود با بکارگیری آزمون "پیچش" می‌باشد. با روش ساده، ارزان و با دقت مناسب "پیچش" می‌توان در کمترین زمان مقدار مقاومت فشاری سازه‌های زیادی را برآورد نمود تا بتوان در صورت نیاز به مقاوم سازی آن‌ها اقدام نمود.

در شکل ۲، استوانه فولادی بعد از انجام آزمون نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که سطح ناچیزی از بتن به استوانه فولادی چسبیده است.



شکل ۲- نتیجه آزمون "پیچش"

در روش "پیچش" مقدار لنگر پیچشی T بشکل دائم افزایش یافته تا سطح بتن دچار شکست شود. در این خصوص یک ساعت اندیکاتور روی ترکمتر قرار دارد که با چرخاندن آن، مقدار لنگر پیچشی روی آن قابل مشاهده است. با چرخاندن ترکمتر، استوانه فولادی از سطح بتن جدا می‌گردد که در همان لحظه جدا شدن استوانه فولادی، مقدار لنگر پیچشی ثبت می‌گردد. رابطه بین لنگر پیچشی و تنش برشی از رابطه (۱) بدست می‌آید. در این آزمون هم می‌توان تنش برشی را محاسبه نمود و هم می‌توان بصورت مستقیم از لنگر پیچشی نهایی استفاده نمود.

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1)$$

که در آن:

T = لنگر پیچشی بر حسب نیوتن متر

r = شعاع استوانه فولادی

J = ممان اینرسی قطبی بر حسب cm^4

τ = تنش برشی بر حسب مگاپاسکال



الف- انجام آزمون "پیچش" روی سازه واقعی



ب- چسباندن استوانه فولادی



ج- اعمال لنگر پیچشی

شکل ۱- روش نوین و درجای "پیچش"

ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پس از بحران با بهره‌گیری از آزمون "پیچش"

۲-۳- نسبت‌های اختلاط

با توجه به اینکه در این مقاله آزمون "پیچش" هم در آزمایشگاه و هم روی سازه‌های واقعی استفاده شده است لذا برای بررسی دقت آزمون فوق با آزمون استاندارد اقدام به ساخت بتن‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر با رده‌های مقاومتی مختلف گردید که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

در این مقاله برای انجام صحت سنجی نتایج آزمون "پیچش"، نمونه‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف تحت شرایط یکسان تهیه گردید. تعدادی از نمونه‌ها در زیر جک بتن شکن قرار گرفت و نمونه‌های بتنی یکسان در همان شرایط عمل‌آوری و همان مصالح ساخت، مورد آزمون "پیچش" نیز قرار گرفت. سپس با استفاده از منحنی رگرسیون نسبت به مقایسه نتایج آزمون "پیچش" با آزمون مقاومت فشاری پرداخته خواهد شد.

برای بدست آوردن طرح اختلاط بتن از روش گام به گام طرح مخلوط ملی بتن (BHRC, 2008) استفاده شده است.

جدول ۲- نسبت‌های اختلاط

فوق روان کننده ($\frac{Kg}{m^3}$)	شن ($\frac{Kg}{m^3}$)	ماسه ($\frac{Kg}{m^3}$)	نسبت آب به سیمان	سیمان ($\frac{Kg}{m^3}$)	آب ($\frac{Kg}{m^3}$)	شماره طرح
۰	۷۱۶	۹۰۱	۰/۶۷	۳۲۸	۲۲۱	C15
۰	۷۰۷	۸۸۸	۰/۶	۳۵۶	۲۱۵	C20
۰	۶۹۹	۸۷۹	۰/۵۵	۳۸۱	۲۱۱	C25
۰	۶۸۷	۸۶۴	۰/۴۹	۴۱۶	۲۰۶	C30
۱/۱۷	۶۸۶	۸۶۲	۰/۴۵	۴۴۰	۱۹۸	C35
۱/۶۱	۶۷۷	۸۵۱	۰/۴۱	۴۷۶	۱۹۵	C40
۲/۱۲	۶۶۷	۸۳۸	۰/۳۷	۵۱۶	۱۹۱	C45
۲/۶۱	۶۶۴	۸۳۵	۰/۳۵	۵۳۴	۱۸۷	C50

۳- نتایج حاصله و تحلیل آن‌ها

۳-۱- بررسی دقت آزمون "پیچش"

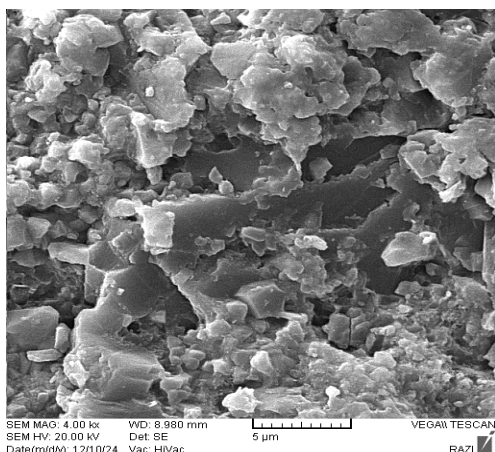
در این قسمت ابتدا نمونه‌های بتنی با رده‌های مقاومتی مختلف تهیه گردید. سپس بمدت ۲۸ روز تحت عمل‌آوری در داخل آب و آهک قرار گرفت. سپس در زیر جک بتن شکن قرار گرفت و مقدار مقاومت فشاری آن‌ها تعیین گردید. سپس نمونه‌های مشابه در شرایط یکسان تحت آزمون "پیچش" قرار گرفت. در جدول ۳ نتایج بدست آمده از آزمون‌های فوق قابل مشاهده است.

جدول ۳- مقاومت نمونه‌های بتنی

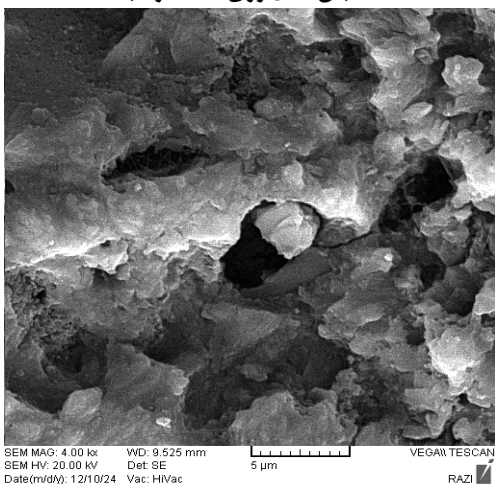
شماره طرح	مقاومت فشاری (MPa)	آزمون "پیچش" (N.m)
C15	۱۸/۷	۱۳۶
C20	۲۱/۴	۱۵۶
C25	۲۸/۸	۱۹۴
C30	۳۶/۸	۲۱۰
C35	۴۰/۶	۲۳۷
C40	۴۴/۸	۲۴۴
C45	۴۸	۲۵۲
C50	۵۱/۳	۲۹۰

با دقت در جدول ۳ قابل مشاهده است که رابطه مستقیمی بین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" وجود دارد به گونه‌ای که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار لنگر حاصل از آزمون "پیچش" نیز افزایش یافته است. در روش "پیچش" با توجه به اینکه شکست در خود بتن می‌باشد لذا نتایج بدست آمده از آن نسبت به دیگر روش‌های تعیین سختی سطح دارای اعتبار بیشتری می‌باشد.

افزایش مقدار لنگر حاصل از آزمون "پیچش" در بتن با رده‌های مقاومتی بیشتر، بیانگر توسعه و پیشرفت محصولات هیدراسیون است که باعث یک ساختار



الف: بتن عمل‌آوری شده در آب



ب: بتن رها شده در فضای آزاد

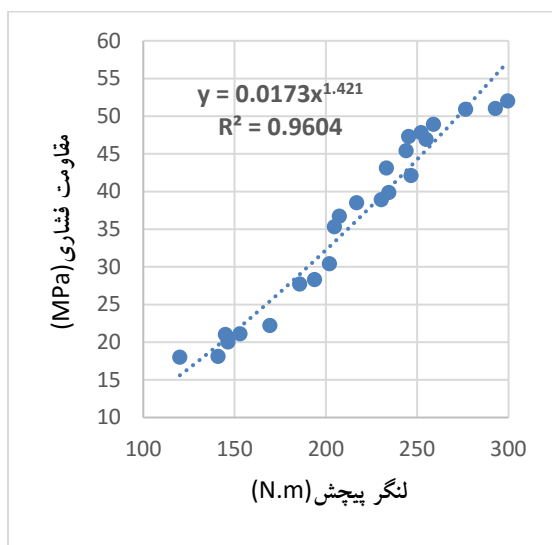
شکل ۲: تاثیر عمل‌آوری با عکسبرداری SEM

در ادامه رابطه بین لنگر وارده از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با استفاده از تحلیل رگرسیون بدست آورده شده است (شکل ۳). در این مقاله از آزمون پیچش برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن در سازه‌های واقعی استفاده شده است. با توجه به اینکه در آزمون پیچش با استفاده از یک ترکمتر، مقدار لنگر نهایی هنگام شکست استوانه فولادی ارائه می‌گردد لذا لازم است ابتدا در آزمایشگاه مشخص گردد که هر مقدار لنگر بر حسب نیوتن متر برابر چه مقاومت فشاری ای می‌باشد.

متراکم‌تر می‌گردد. افزایش مقاومت فشاری به حجم و نوع محصولات هیدراسیون تشکیل‌شده وابسته می‌باشد و لذا به واکنش‌های میان ترکیبات جامد و مایع برمی‌گردد (Teriqet et al, 2019). توسعه روند هیدراسیون سیمان باعث پر شدن منافذ و فضاهای خالی بتن توسط محصولات هیدراسیون می‌شود. روند سخت‌شدگی و متراکم شدن بتن بلافاصله پس از ریختن بتن در قالب آغاز شده و در طی این روند، هیدراسیون باعث بهم چسبیدن سنگدانه‌های بتن می‌شود (Taylor, 1997). عدم وجود رطوبت کافی، موجب خشک شدن بتن و افزایش منافذ ریز می‌شود که در نتیجه، باعث هیدراسیون ناقص و کاهش مقدار مقاومت فشاری می‌شود (Kosmatka et al, 2002 & Siddiqui et al, 2013). همچنین عدم وجود رطوبت کافی، باعث باقی‌ماندن یک ناحیه مرزی متخلخل در بتن می‌گردد و در نهایت موجب کاهش مقاومت در برابر حملات شیمیایی و سایر آسیب‌های مشابه می‌گردد (Springenschmid, 2007 & Alexander et al, 2017).

در این بخش نتایج حاصل از عکسبرداری SEM قابل مشاهده است. نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری در آب و رها شده در فضای آزاد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ تاثیر شرایط مختلف عمل‌آوری بر تخلخل بتن نشان داده شده است. در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود که بتن دارای یکپارچگی و نظم خاصی بوده و تخلخل زیادی در آن مشاهده نمی‌شود. اما با توجه به شکل ۲-ب مشاهده می‌گردد که نمونه ارائه شده به جهت عمل‌آوری ناکافی، باعث بوجود آمدن شبکه‌های گسترده‌ای از منافذ ریز در ریزساختار بتن شده‌اند. منافذ مذکور که در تصویر قابل مشاهده می‌باشند، تأثیرات زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌گذارند. به‌ویژه، این تأثیرات باعث افزایش قطر منافذ و افزایش نفوذپذیری در بتن می‌شود.

ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پس از بحران با بهره‌گیری از آزمون "پیچش"



شکل ۳- رابطه لنگر حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری

با استفاده از تحلیل آماری توانی، مشاهده می‌گردد که ضریب همبستگی بالای ۹۵ درصد می‌باشد که نشان از دقت بالای آزمون درجای "پیچش" جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌های با رده‌های مقاومتی مختلف می‌باشد.

رابطه حاصله بین نتایج آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری نمونه در معادله ۲ قابل مشاهده است:

$$Y=0.0173x^{1.421} \quad (2)$$

لذا می‌توان جهت اندازه‌گیری مقاومت درجای بتن‌ها، با استفاده از روش "پیچش"، لنگر پیچشی حاصل از آزمون فوق را برای تبدیل به مقاومت بتن و با بکارگیری منحنی کالیبراسیون توانی (شکل ۳) استفاده نمود.

لذا ابتدا در آزمایشگاه نمونه‌های بتنی با مقاومت‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال تهیه گردید و تحت عمل‌آوری قرار گرفت و مقاومت فشاری آن‌ها با استفاده از جک بتن شکن تعیین گردید. سپس نمونه‌های مشابه با همان طرح اختلاط و همان مقاومت‌ها و همان عمل‌آوری‌ها در شرایط یکسان تهیه گردید و تحت آزمون پیچش قرار گرفت و مقدار لنگر پیچشی هر نمونه با مقاومت مختلف بر حسب نیوتن متر ثبت گردید.

در انتها با استفاده از نمودار کالیبراسیون رگرسیونی، همبستگی بین نتایج بررسی گردید که مشاهده گردید ضریب همبستگی بالایی بین نتایج آزمون پیچش با آزمون جک بتن شکن وجود دارد. در نتیجه مشخص گردید که هر مقدار لنگر بر حسب نیوتن متر برابر چه مقدار مقاومت فشاری می‌باشد.

با استفاده از این داده‌ها از آزمون پیچش روی سازه‌های واقعی استفاده گردید و مقدار لنگر بر حسب نیوتن متر اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از داده‌های موجود، مقدار مقاومت فشاری همراستا با آن لنگر تعیین گردید. بدین صورت می‌توان بدون شکست نمونه و با استفاده از آزمون درجای پیچش با خرابی بسیار جزئی مقدار مقاومت فشاری را با دقت مناسبی ارزیابی نمود.

۳-۲- انجام آزمون "پیچش" روی سازه‌های

واقعی

در این قسمت از آزمون درجای "پیچش" برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری چند سازه‌ی واقعی داخل شهر تهران بدون تخریب بتن استفاده شده است. ابتدا برای انجام آزمون "پیچش" می‌بایست سطح بتن مورد آزمایش مطابق شکل ۴ تمیز گردد.



ب: چسباندن استوانه روی سطح بتن

شکل ۵- آماده سازی استوانه بتنی

سپس مطابق شکل ۶ با استفاده از یک ترکمتر معمولی، لنگر پیچشی به استوانه فولادی وارد می‌گردد تا استوانه از سطح بتن جدا گردد. در این حالت مقدار لنگر ثبت شده توسط ترکمتر قرائت می‌گردد.



شکل ۴- اصلاح سطح بتن

سپس مطابق شکل ۵، سطح استوانه فولادی آغشته به چسب شده و روی سطح بتن چسبانده شود.



شکل ۶- انجام آزمون "پیچش"

نتایج حاصل از انجام آزمون "پیچش" روی سازه‌های بتنی موجود، در جدول ۴ ارائه شده است. البته آزمایش‌های فراوانی بصورت درجا انجام پذیرفته است اما در این تحقیق تعداد معدودی از نتایج ارائه گردیده است. برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن در سازه‌های واقعی، ابتدا با استفاده از آزمون "پیچش" مقدار لنگر پیچشی حاصل از



الف: آغشته نمودن سطح استوانه با چسب

ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پس از بحران با بهره‌گیری از آزمون "پیچش"

مگاپاسکال می‌باشد لذا مقاومت‌های کمتر از این به معنای کافی نبودن مقاومت فشاری بتن‌های استفاده شده در سازه می‌باشد. در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری مکعبی چند سازه بین ۲۱ تا ۲۷ مگاپاسکال می‌باشد که در نتیجه مقاومت طراحی آن‌ها بر اساس نمونه‌های استوانه‌ای برابر ۱۶ تا ۲۲ مگاپاسکال می‌باشد که از نظر دید مهندسی چندان مناسب نیست. بخصوص اینکه در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۲۰۲۰) پایین‌ترین سطح مقدار مقاومت فشاری را برابر ۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته است که در کارهای اجرایی معمولاً بین ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال مناسب می‌باشد.

تا قبل از انجام این تحقیق می‌بایست برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری سازه‌ها یا المان‌های بتنی موجود، ابتدا مغزه‌ای استاندارد از بتن جدا نمود و سپس در آزمایشگاه تحت آزمون قرار داد. که این امر باعث آسیب مخرب به سازه می‌شود. یا می‌بایست از آزمون درجای "کشیدن از سطح" استفاده نمود که دارای دستگاهی وارداتی و بسیار گران قیمت می‌باشد.

اما اکنون می‌توان با استفاده از آزمون نوین و درجای "پیچش" مقدار مقاومت فشاری سازه‌های بتنی را با دقت مناسب و بدون نیاز به تخریب و در زمان اندکی اندازه‌گیری نمود. لذا پیشنهاد می‌گردد تمام سازه‌های بتنی داخل شهر تهران از جمله پل‌های ماشین رو، پل‌های آدم رو، مخازن آب، دیوارهای حائل و ساختمان‌های دولتی و غیر دولتی با استفاده از آزمون غیر مخرب "پیچش" مورد آزمون قرار گرفته و در صورت نیاز نسبت به مقاوم سازی آن‌ها اقدام گردد تا در نتیجه تاب آوری شهری بعد از وقوع زلزله بالاتر رود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری درجای سازه‌های بتنی، آزمون نوین و درجای "پیچش" معرفی گردید و در ابتدا نتایج حاصل از آن با نتایج آزمون

ترکمر اندازگی گردید. سپس با استفاده از نمودار کالیبراسیون شکل ۳ مقاومت فشاری مرتبط با لنگر پیچشی تعیین می‌گردد. در جدول ۴ نیز مقادیر حاصل از آزمون "پیچش" ذکر گردیده است و سپس با بکارگیری نمودار کالیبراسیون شکل ۳، مقدار مقاومت فشاری با دقت مناسب تعیین گردیده است.

جدول ۴- مقاومت سازه‌های بتنی موجود بصورت درجا

نوع سازه	مقاومت فشاری با توجه به معادله ۲	
	لنگر حاصل از آزمون پیچش (N.m)	(MPa)
مخزن آب	۲۴۰	۴۲
پل بتنی ماشین رو	۱۷۸	۲۷
پل بتنی آدم رو	۱۵۱	۲۱
فونداسیون بتنی	۱۶۵	۲۴
دیوار حائل	۲۰۲	۳۳

نتایج حاصل در جدول ۴ بر حسب مقاومت فشاری مکعبی می‌باشد. در طراحی سازه‌های بتنی می‌بایست از مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استفاده نمود. نمونه‌های بتنی استوانه‌ای تقریباً دارای مقاومت فشاری ۵ مگاپاسکال کمتر از نمونه‌های بتنی مکعبی می‌باشند.

لذا با استفاده از توضیحات فوق، همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، مخزن بتنی آب و دیوار حائل بتنی دارای مقاومت فشاری مناسبی می‌باشند و لذا نیازی به مقاوم سازی ندارند. اما پل‌های بتنی آزمایش شده در این تحقیق و فونداسیون بتنی، دارای مقاومت فشاری مناسبی نیستند و می‌بایست راهکاری جهت مقاوم سازی آن‌ها اندیشیده شود تا بعد از وقوع زلزله همچنان بتوان از آن‌ها بهره برداری نمود.

مقاومت کافی یعنی مقاومت‌های فشاری درج شده در نقشه‌های طراحی مورد نظر است. در این قسمت از دید مهندسی نیز استفاده شده است. با توجه به اینکه مقدار مقاومت فشاری بتن در طراحی سازه‌های بتنی معمولی مانند ساختمان‌های بتنی یا پل‌ها برابر حدود ۲۵ تا ۳۰

استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. سپس نمونه‌های آزمایشگاهی و سازه‌های بتنی واقعی با استفاده از آزمون فوق مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصله عبارتند از:

۱- با توجه به قانون مدیریت بحران کشور، شهرها می‌بایست نسبت به بحران‌های پیش رو تاب‌آور گردند. یکی از موارد تاب‌آوری، نیاز به دانستن مقاومت فشاری سازه‌های بتنی موجود با سنین مختلف می‌باشد.

۲- با توجه به دقت آزمون نوین و درجای "پیچش" می‌توان بدون نیاز به تخریب بتن، مقاومت فشاری سازه‌های موجود را با دقت مناسبی اندازه‌گیری نمود.

۳- با مقایسه آزمون درجای "پیچش" و آزمون استاندارد مقاومت فشاری در آزمایشگاه مشخص گردید که رابطه توانی با ضریب همبستگی بالای ۹۵ درصد بین نتایج وجود دارد که نشان از دقت مناسب آزمون "پیچش" در ارزیابی درجای مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

۴- با انجام آزمون "پیچش" روی تعدادی از سازه‌های بتنی موجود در شهر تهران مشخص گردید که تعدادی از آن‌ها نیاز به مقاوم سازی دارند تا بعد از زلزله بتوان از آن‌ها بهره‌برداری نمود. لذا لازم است با استفاده از آزمون فوق و بدون تخریب بتن سازه‌ها، مقاومت فشاری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

۵- با استفاده از عکسبرداری SEM مشاهده شد که نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری در آب دارای یکپارچگی بوده و تخلخل زیادی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود. اما عمل‌آوری ناکافی، باعث بوجود آمدن شبکه‌های گسترده‌ای از منافذ ریز در ریزساختار بتن شده‌اند.

۵- سپاس‌گزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۰۴۰۹ انجام شده است.

This work is based upon research funded by Iran National Science foundation (INSF) under project No. 4030409.

- Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. (2017). *Durability of concrete: design and construction* (Vol. 20). CRC Press.
- ASTM C127. (2012). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C128. (2015). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C136. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1583/C1583M-13. (2013) Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C597-16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C808/C805M-18. (2018) Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Building and Housing Research Center (BHRC). (2008) *The National Method for Concrete Mix Design*.
- Celik, G., & Ozdemir, M. (2025). Determination of concrete compressive strength from surface images using a CNN-SVR hybrid model. *Measurement*, 235, 113541. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.113541>.
- INBR. (2022). *Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings*, Part 9 of the Iranian National Building Regulations, Iran.
- Khoudja, A., Said, K., Mohamed, G., Zoubir-Mehdi, S., & Sidi-Mohammed, E. (2023). Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods, *Construction and Building Materials*, 366, 130161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130161>.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). *Design and control of concrete mixtures* Skokie, IL: Portland Cement Association. Vol. 5420. 60077-1083.
- Krishna, K., Lam, E., Tung, C., Chau, Y., & Jang, J. (2024). Modified pull-off test evaluation of bond properties in preplaced aggregate concrete incorporating silica fume, *Journal of Building Engineering*, 82, 108264. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108264>.
- Naderi, M. (2007) New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, *Journal of Testing and Evaluation*. 35(6). ISSN: 0090-3973.
- Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering* 37, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101928>.
- Naderi, M., & Rahbari, R. (2021). Efficiency of coating layers used for harsh environmental conditions protection of CFRP-strengthened concrete, *Journal of Building Engineering*, 44, 102892. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102892>.
- Osman, H., & Fam, A. (2025). Pull-out strength of cast-in versus post-installed connectors in thin ultra-high performance concrete panels with polyoxymethylene fibers, *Journal of*

Building Engineering, 103, 112078. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112078>.

Parhizkari, M., Saberi Vaezaneh, A., & Naderi, M. (2022) The effect of penetration-reducing materials on concrete permeability and strength with “cylindrical chamber” and “Twist-off” tests. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(1), pp.1-10.

Parihar, H., Shanker, R., & Singh, V. (2022). Effect of variation of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity prediction in concrete beam, *Materials Today: Proceedings*, 65(2), pp.1486-1490. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.468>.

Saberi Vaezaneh, A., Naderi, M., & Parhizkari, M. (2023) The effect of acute environmental conditions on water penetration rate and surface strength of concretes containing fibrous microsilica gel and super gel using in situ tests. *Concrete research*, 16(3), pp.31-43.

Saberi Vaezaneh, A., Naderi, M., & Parhizkari, M. (2024) The Effects of Extreme Environments on Concrete Surface Layer and Durability and Using Permeability-Reducing Admixtures to Prevent Permeability of Harmful Liquids. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 8(2), pp.127-144.

Saberi Varzaneh, A. & Naderi, M. (2020) determining the in-situ compressive and bending strengths of pozzolanic concrete containing polypropylene and glass fibers using “twist-off” method. *Scient. J. of Civil Eng*, 20(5).

Saberi Varzaneh, A., & Naderi, M. (2023). Comparing the Twist-off results and the CEB-FIP MODEL CODE standard to evaluate the adhesion of mortar/steel and provide a correction coefficient. *Sharif civil engineering*, 39(3), pp.131-138. <https://doi.org/10.24200/J30.2023.61417.3170>.

Saberi Varzaneh, A., Naderi, M. (2021). Determination of Shrinkage, Tensile and Compressive Strength of Repair Mortars and Their Adhesion on the Concrete Substrate Using "Twist-off" and "Pull-off" Methods. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 45, pp.2377–2395. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00548-w>

Saleh, E., Tarawneh, A., Dwairi, H., & AlHamaydeh, M. (2022). Guide to non-destructive concrete strength assessment: Homogeneity tests and sampling plans, *Journal of Building Engineering*, 49, 104047. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104047>.

Siddiqui, M. S., Nyberg, W., Smith, W., Blackwell, B., & Riding, K. A. (2013). Effect of curing water availability and composition on cement hydration. *ACI Materials Journal*, 110(3), 315-322.

Springenschmid, R. (2007) *Betontechnologie für die Praxis*, 1st ed.; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany.

Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* London: Thomas Telford. Book. Vol. 2, p.459.

Teriqet, A., Mohammadi, M., & Medras, Y. (2019). Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. *Sharif. J. of Civil Eng*, 34(4), pp.42-57.

The country's crisis management law. (2019). National Crisis Management Organization. Iran. pp. 1-23.

Wang, C., Zhou, M., Zhang, L., & Huang, H. (2025). Automated nondestructive evaluation of compressive strength of underground lining structure using hyperspectral imaging and deep neural networks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.06.007>.