



University Of Qom



Comparative Evaluation of Nurse-Saul and Arrhenius Maturity Functions for Predicting Concrete Compressive Strength

Mohammad Ali Dastan Diznab¹ , Ebrahim Fadaei² , Sadegh Rahmati³

1. Corresponding author, Assistant Professor, Institute of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: m-dastan@araku.ac.ir
2. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran. E-mail: fadaei@arakut.ac.ir
3. Master of Science, Institute of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: sadeghrahmati5158@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 08 Feb 2026

Revised 11 Jun 2026

Accepted 04 Jul 2026

Published 04 Jul 2026

Keywords:

Concrete Maturity,
Compressive Strength,
Nurse-Saul Maturity,
Arrhenius Maturity,
Strength Stimulation.

ABSTRACT

Accurately estimating the compressive strength of in-place concrete without destructive testing is critical for efficient construction scheduling and safety assessment. The maturity method offers a promising non-destructive approach by correlating strength development with time-temperature history. This study investigates the efficacy of the Nurse-Saul and Arrhenius maturity functions in predicting the compressive strength of a specific concrete mix design. The primary objective was to develop and validate a robust mathematical model to estimate strength at various ages based on calculated maturity. Laboratory specimens were instrumented with embedded sensors to record temperature-time data during curing. Compressive strength was experimentally determined at multiple ages. Maturity indices were computed using both the Nurse-Saul and Arrhenius functions. An exponential strength-maturity relationship was then established through curve-fitting. Validation involved three independent specimen series cured under different temperature regimes. Results demonstrated that the derived exponential model could predict compressive strength with high accuracy, particularly at later ages, using either maturity index. Comparative analysis indicated that predictions based on the Arrhenius function showed marginally better agreement with experimental data, as the Nurse-Saul method consistently produced slightly overestimated strength values. The findings confirm that a calibrated maturity-strength function, especially one utilizing the Arrhenius approach, provides a reliable and practical tool for non-destructive strength estimation, facilitating significant economic and safety benefits in concrete construction management.

Cite this article: Dastan Diznab MA, Fadaei E, Rahmati S. Comparative Evaluation of Nurse-Saul and Arrhenius Maturity Functions for Predicting Concrete Compressive Strength. Civil Infrastructure Researches. 2026; 12(1): 103-118. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.15333.1673>



Introduction

The development of concrete compressive strength is a time- dependent process significantly influenced by environmental conditions, particularly temperature and humidity. Accurately predicting this development is crucial for both the economic efficiency of construction projects and the structural safety of concrete elements. Inaccurate estimations can lead to costly delays, unnecessary formwork retention, or, more critically, premature loading that risks structural failure.

The concrete maturity method has emerged as a reliable non- destructive technique for in-situ strength estimation. This method operates on the fundamental principle that the strength gain of concrete is a function of its temperature history over time. By establishing a mathematical relationship between maturity and compressive strength, this approach offers a practical and cost-effective alternative to destructive or semi-destructive testing. Among the various methods proposed, the Nurse-Saul and Arrhenius maturity methods are the most widely recognized and applied. While these functions provide the theoretical framework, their accuracy hinges on the establishment of a unique, empirically calibrated strength-maturity relationship for each specific concrete mix design. A critical research question, therefore, is determining the optimal mathematical function to translate calculated maturity into reliable strength estimates for a given mix.

This study addresses this need by developing and validating a predictive model for a specific concrete formulation. The core objective is to derive and compare exponential strength-maturity relationships calibrated using both the Nurse-Saul and Arrhenius maturity indices. The research methodology involves laboratory preparation of instrumented specimens to record temperature-time data, experimental determination of compressive strength at various ages, and subsequent model calibration. Finally, the predictive accuracy of the derived functions is rigorously validated

using independent specimen series cured under different temperature regimes.

Methodology

This study was conducted on a specific concrete mix design. The methodology comprised three main phases: determination of maturity method constants, development of the strength-maturity relationship, and validation of the predictive model. Prior to concrete testing, the essential constants for the maturity functions were determined experimentally. For the Nurse-Saul method, the datum temperature (T_0) was established. For the Arrhenius function, the apparent activation energy (E_a) was calculated. These parameters were derived from compressive strength tests performed on three series of mortar specimens, made from the same cement, cured under isothermal conditions at different temperatures. Fifteen standard concrete cylinders were cast from the designated mix. Each specimen was instrumented with an embedded sensor at its center to record the temperature-time history. The specimens were cured under a controlled ambient condition. Their compressive strength was experimentally determined at five different ages (e.g., 1, 3, 7, 14, and 28 days). For each test age, the corresponding maturity index was computed in parallel using both the Nurse-Saul and Arrhenius functions, based on the recorded temperature history. Subsequently, separate exponential functions were fitted to the two datasets of compressive strength versus maturity using a least-squares curve-fitting technique.

To validate the predictive accuracy of the derived exponential functions, three independent series of concrete specimens were prepared from the same mix. Each series was subjected to a distinctly different curing temperature regime. The temperature-time history for each specimen was continuously monitored via embedded sensors. The maturity for various ages was calculated using both methods. The compressive strength was experimentally measured at several ages. These measured strengths were then compared to the strengths predicted by the two exponential models using the calculated maturity values.

The accuracy and error of each model were quantitatively assessed through this comparative analysis.

Results and Discussion

The analysis confirms that the concrete maturity at any desired age can be effectively calculated using both the Nurse-Saul and Arrhenius methods, based on the recorded temperature-time history. A key finding of this study is the successful development of a predictive strength-maturity model. An exponential function of the form was fitted to the experimental data, demonstrating a robust correlation (>0.99) between the calculated and the measured compressive strength. This model provides an acceptably accurate means of estimating in-place strength. Validation against the three independent curing regimes showed a strong agreement between the laboratory-measured strengths and the values estimated by the exponential model. The predictive accuracy was notably higher for concrete ages beyond 14 days, where the estimation error was minimized and the dispersion of results around the mean was significantly lower. A comparative evaluation of the two maturity methods revealed a distinct performance difference. While both functions yielded reliable predictions at later ages, strength values estimated using the Nurse-Saul maturity index exhibited a consistent, slight overestimation compared to experimental results.

In summary, the calibrated exponential model serves as a reliable non-destructive tool. Its application, particularly when paired with the Arrhenius maturity index, enables accurate strength estimation for mature concrete, supporting critical decisions regarding formwork removal, post-tensioning, and load application with enhanced confidence in both safety and project economy.

Conclusion

This study presented a comparative experimental-numerical evaluation of the Nurse-Saul and Arrhenius maturity functions for predicting the compressive strength of concrete under different curing temperatures, thereby assessing a practical non-destructive

tool for in-situ strength estimation. The findings demonstrate that an exponential function effectively models the strength-maturity relationship for the specific concrete mix investigated, providing a reliable estimation of compressive strength. A key comparative result is that the Arrhenius-based maturity function yielded predictions with higher accuracy than those derived from the Nurse-Saul function.

For future research, it is recommended to investigate the influence of additional variables, such as ambient relative humidity during curing and the use of various chemical admixtures (e.g., accelerators or retarders), on the maturity-strength relationship. This would enhance the model's robustness and extend its applicability to a wider range of concrete formulations and field conditions.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following regarding potential conflicts of interest:

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Mohammad Ali Dastan Diznab:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

Ebrahim Fadaei:

Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Validation; Visualization; Writing original draft; Writing review & editing.

Sadeqh Rahmati:

Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft.

ارزیابی تطبیقی توابع بلوغ نرس - سائول و آرنیوس برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن

محمدعلی داستان دیزناب^۱، ابراهیم فدایی^۲، صادق رحمتی^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: m-dastan@araku.ac.ir

۲. استادیار، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران. رایانامه: fadaei@arakut.ac.ir

۳. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: sadeghrahmati5158@yahoo.com

چکیده

تخمین دقیق مقاومت فشاری بتن درجا، بدون نیاز به آزمون‌های مخرب، برای برنامه‌ریزی کارآمد ساخت‌وساز و ارزیابی ایمنی امری حیاتی است. روش بلوغ، با ایجاد رابطه بین توسعه مقاومت و تاریخچه دما- زمان، یک رویکرد غیرمخرب ارائه می‌دهد. این مطالعه به بررسی کارایی توابع بلوغ نرس- سائول و آرنیوس در پیش‌بینی مقاومت فشاری یک طرح اختلاط بتن خاص می‌پردازد. هدف اصلی، توسعه و اعتبارسنجی یک مدل ریاضی پایه برای تخمین مقاومت در سنین مختلف براساس بلوغ محاسبه‌شده بود. نمونه‌های آزمایشگاهی در طول فرآیند عمل‌آوری مجهز به سنسورهای جاسازی‌شده برای ثبت داده‌های دما- زمان شدند. مقاومت فشاری در سنین متعدد به‌صورت تجربی تعیین گردید. شاخص‌های بلوغ با استفاده از هر دو تابع نرس- سائول و آرنیوس محاسبه شد. سپس یک رابطه نمایی بین مقاومت و بلوغ از طریق برازش منحنی استخراج گردید. اعتبارسنجی شامل سه سری نمونه مستقل بود که تحت رژیم‌های دمایی متفاوتی عمل‌آوری شده بودند. نتایج نشان داد مدل نمایی به‌دست آمده می‌تواند با دقت بالا، به‌ویژه در سنین بالاتر و با استفاده از هریک از شاخص‌های بلوغ، مقاومت فشاری را پیش‌بینی کند. تحلیل تطبیقی حاکی از آن بود که پیش‌بینی‌های مبتنی بر تابع آرنیوس انطباق به‌مراتب بهتری با داده‌های تجربی نشان می‌دهد، زیرا روش نرس- سائول به‌طور سیستماتیک مقادیر مقاومت را کمی بیش‌برآورد می‌کند. یافته‌ها تأیید می‌کند که یک تابع کالیبره‌شده بلوغ- مقاومت، به‌ویژه تابعی که از رویکرد آرنیوس بهره می‌برد، ابزاری قابل اعتماد و کاربردی برای تخمین غیرمخرب مقاومت فراهم می‌کند و می‌تواند منجر به ایجاد مزایای اقتصادی و ایمنی قابل‌توجهی در مدیریت ساخت‌وساز بتن شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

کلیدواژه‌ها:

بلوغ بتن،
مقاومت فشاری،
روش نرس- سائول،
روش آرنیوس،
تخمین مقاومت.

استناد: داستان دیزناب محمدعلی، فدایی ابراهیم، رحمتی صادق. ارزیابی تطبیقی توابع بلوغ نرس- سائول و آرنیوس برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۱۰۳-۱۱۸. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.15333.1673>

۱- مقدمه

در اجرای سازه‌های بتنی، افزایش مقاومت بتن به عواملی مانند زمان و شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت وابسته است [۱-۳]. از سوی دیگر، توسعه مصالح سیمانی پایدار، استفاده از مواد جایگزین سیمان و همچنین شناخت دقیق مشخصات مکانیکی انواع بتن، از جمله موضوعات مورد توجه پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است، زیرا این عوامل می‌توانند بر عملکرد، دوام و روند کسب مقاومت بتن تأثیرگذار باشند [۴ و ۵]. تأثیر مقاومت بر ایمنی سازه‌های بتنی و تأثیر زمان بر اقتصاد پروژه، ضرورت توجه به روند رشد مقاومت بتن را آشکار می‌سازد؛ برآورد اولیه، سریع و دقیق مقاومت فشاری بتن در محل، یکی از چالش‌های اصلی صنعت بتن است. در بسیاری از موارد، عدم توجه کافی به میزان مقاومت کسب‌شده توسط بتن در طول مرحله اجرا منجر به خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی شده است. به عنوان نمونه، می‌توان به فروریختن یک ساختمان چندطبقه در حال ساخت در ویرجینیا اشاره کرد که منجر به کشته و زخمی شدن ۴۸ نفر شد. گزارش‌های رسمی منتشرشده، حذف زودهنگام قالب‌ها پیش از دستیابی بتن به مقاومت کافی را به عنوان محتمل‌ترین علت این حادثه معرفی کرده‌اند [۶].

برآورد دقیق مقاومت فشاری بتن در محل، امکان بهینه‌سازی فرآیند ساخت را فراهم می‌کند. از جمله کاربردهای آن می‌توان به تعیین زمان مناسب برای باز کردن قالب‌ها، آغاز بهره‌برداری از پل‌ها و شروع عملیات پیش‌تنیدگی اعضای بتنی اشاره کرد. افزون بر این، آگاهی از روند کسب مقاومت بتن می‌تواند به بهینه‌سازی طرح اختلاط کمک کند. این موضوع بر میزان مصرف مواد اولیه نظیر سیمان و سنگدانه‌ها و همچنین مواد جایگزین یا افزودنی‌های شیمیایی تأثیرگذار است. با توجه به حجم بالای مصرف جهانی بتن، این مسئله می‌تواند به طور مؤثر

سبب کاهش انتشار CO_2 ، کاهش نیروی کار و هزینه‌های پروژه و همچنین کاهش زمان تکمیل پروژه شود که سود مالی قابل توجهی در پی خواهد داشت [۷].

دستیابی به این اهداف در گرو به‌کارگیری ابزارهای مناسب جهت برآورد مقاومت بتن با گذشت زمان و با توجه به تاریخچه دمایی آن است که با استفاده از روش بلوغ بتن امکان‌پذیر می‌شود. این روش، امکان ارزیابی مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه را فراهم کرده و می‌تواند جایگزین دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تری نسبت به انواع روش‌های مخرب و نیمه‌مخرب برای تخمین مقاومت فشاری بتن باشد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در بسیاری از ایالت‌های آمریکا مفهوم بلوغ بتن به عنوان جایگزین آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد جهت تعیین مقاومت فشاری اولیه بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸-۱۰].

روش بلوغ بر این اصل استوار است که مقاومت بتن مستقیماً با تاریخچه دمای هیدراتاسیون خمیر سیمانی مرتبط است و از این‌رو، به عنوان روشی مناسب برای پیش‌بینی افزایش مقاومت بتن در سنین پایین شناخته می‌شود. ضرورت توجه همزمان به اثر زمان و دما بر رشد مقاومت بتن، منجر به توسعه مفهوم بلوغ بتن شده است که با استفاده از توابع ریاضی، تاریخچه دمایی بتن را به شاخص‌هایی مرتبط می‌کند که میزان پیشرفت مقاومت را در طول زمان نشان می‌دهند. معروف‌ترین توابع مورد استفاده برای تعیین میزان بلوغ بتن، توابع نرس-سائول^۱ و آرنیوس^۲ هستند [۱۱].

در سال ۲۰۲۲، میلر^۳ و همکاران در یک مطالعه مروری جامع به بررسی کاربرد روش بلوغ برای پیش مقاومت درجا در سازه‌های بتنی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش بلوغ، در صورت کالیبراسیون مناسب برای مخلوط بتنی مورد نظر، ابزاری قابل اعتماد برای تخمین مقاومت بتن در محل بوده و می‌تواند جایگزین یا

³- Miller

¹- Nurse-Saul

²- Arrhenius

مکمل مناسبی برای روش‌های متداول مبتنی بر آزمون‌های استاندارد باشد. همچنین این پژوهش بر نقش سامانه‌های پایش دما و بلوغ به‌صورت برخط و استفاده از حسگرهای هوشمند در افزایش دقت کنترل کیفیت و بهینه‌سازی عملیات اجرایی تأکید کرده است [۱۲]. می‌توان به کاربرد روش بلوغ بتن در ارزیابی مقاومت بتن‌های سبک، مقاومت ملات‌های سیمانی حاوی افزودنی‌های معدنی، خواص بتن‌های پاششی، بتن‌های با عملکرد بالا، بتن‌های فوق توانمند (UHPC^۴) و همچنین کنترل ترک‌خوردگی بتن در سنین اولیه اشاره کرد [۱۳-۱۸].

در پژوهشی، از روش بلوغ برای تخمین مقاومت در محل قطعات بتنی حجیم استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها چهار بلوک بتنی مکعبی به ابعاد ۱/۸ متر ساخته شد و منحنی‌های توسعه مقاومت برای این مخلوط‌ها با استفاده از آزمون‌های استوانه‌ای استاندارد ایجاد گردید. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری مرکز مقطع در محدوده $\pm 15\%$ درصد مقادیر پیش‌بینی‌شده قرار دارد [۱۹]. پس از آن، جین^۵ و همکاران، با استفاده از روش بلوغ به ارزیابی مقاومت فشاری بتن رزینی اپوکسی در سنین پایین پرداختند و نشان دادند که این روش می‌تواند مقاومت بتن رزینی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند [۲۰]. همچنین گزارش شده است که استفاده از روش بلوغ به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز و افزایش سرعت تصمیم‌گیری اجرایی، موجب کاهش هزینه‌های پروژه می‌شود [۲۱].

ریو^۶ و همکاران نشان دادند که دقت توابع بلوغ در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن به شرایط دمایی عمل‌آوری وابسته است، به‌طوری که عملکرد مدل در دماهای پایین تضعیف شده و استفاده از یک رابطه واحد بلوغ- مقاومت برای تمامی شرایط دمایی می‌تواند به برآوردهای نادقیق منجر شود [۲۲]. ونگ^۷ و همکاران با بررسی رفتار بتن با سیمان پرتلند تحت عمل‌آوری حرارتی نشان دادند که

افزایش دما اگرچه مقاومت اولیه بتن را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند موجب کاهش مقاومت در سنین بالاتر شود. آنان با ارائه یک مدل اصلاح‌شده بلوغ- مقاومت، اثرات دمای بالا را در پیش‌بینی مقاومت بتن لحاظ کردند و بر اهمیت در نظر گرفتن تأثیر دما بر فرآیند هیدراتاسیون تأکید نمودند [۲۳]. همچنین کاناواریس^۸ و همکاران با بررسی عملکرد توابع مختلف بلوغ در بتن‌های حاوی سرباره گزارش کردند که افزایش دما موجب تسریع کسب مقاومت شده و توابع مبتنی بر آرنیوس در مقایسه با نرس- سائول دقت بیشتری در پیش‌بینی مقاومت دارند. این پژوهشگران بر ضرورت توسعه و کالیبراسیون اختصاصی توابع بلوغ برای مخلوط‌های مختلف بتنی تأکید کردند [۲۴]. علاوه بر این، مطالعات جدیدتر نشان داده‌اند که علاوه بر دما، عوامل دیگری نظیر رطوبت، میزان آب در دسترس برای هیدراتاسیون و شرایط عمل‌آوری نیز بر روند کسب مقاومت بتن اثرگذار هستند و مدل‌های مبتنی بر کوپل رطوبت- دما- هیدراتاسیون می‌توانند دقت پیش‌بینی مقاومت را افزایش دهند [۲۵].

با وجود توسعه گسترده روش‌های بلوغ بتن در مطالعات بین‌المللی، ارزیابی عملکرد این روش‌ها برای طرح اختلاط‌های متداول مورد استفاده در ایران و تحت شرایط دمایی مختلف همچنان نیازمند بررسی‌های بیشتر است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف مقایسه عملکرد دو روش متداول نرس- سائول و آرنیوس در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن انجام شده است. در این راستا، نتایج حاصل از روش‌های بلوغ بتن با داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت آماری مقایسه و دقت هر روش در برآورد مقاومت مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین بر پایه داده‌های آزمایشگاهی، یک تابع نمایی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری برحسب شاخص بلوغ ارائه شده است.

^۷- Wang^۸- Kanavaris^۴- Ultra High Performance Concrete^۵- Jin^۶- Ryu

و حفره‌های سطحی بتن در نتایج آزمایش تأثیرگذار است؛ بنابراین روشی که فاقد محدودیت روش‌های ذکر شده باشد و قابلیت تخمین مقاومت فشاری بتن در هر سنی را داشته باشد، روش مناسب‌تری محسوب می‌شود.

بلوغ بتن روشی غیرمخرب برای تخمین مقاومت فشاری بتن در محل و در سن مورد نظر است. در این روش از وابستگی پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان به عوامل سن و تاریخچه دمایی بتن استفاده شده و میزان بلوغ بتن تعیین می‌شود؛ در واقع، روش بلوغ راهکاری برای در نظر گرفتن اثرات ترکیبی زمان و دما بر رشد مقاومت بتن است [۳۲]. روش بلوغ بتن بر این فرض اساسی استوار است که نمونه‌های یک مخلوط بتنی مشخص که از شاخص بلوغ یکسانی برخوردار هستند، مقاومت برابری دارند. اندازه‌گیری میزان بلوغ بتن در قالب شاخص بلوغ بتن انجام می‌شود که در این راستا دو تابع نرس- سائل و آرنیوس مطابق ASTM C1074 پیشنهاد شده است [۱۱].

۲-۱- محاسبه بلوغ بتن با روش نرس-سائل

در روش نرس- سائل شاخص بلوغ براساس کمترین دمایی که امکان افزایش مقاومت بتن وجود دارد و به دمای مبنا موسوم است، محاسبه می‌شود. معادله نرس- سائل برای محاسبه بلوغ بتن مطابق رابطه زیر است:

$$M(t) = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

در رابطه (1) ، M شاخص بلوغ در دمای t ، Δt فواصل زمانی برحسب ساعت، T_c دمای متوسط بتن در زمان Δt و T_0 دمای مبنا است. دمای مبنا، دمایی است که در آن فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان به طور محسوس متوقف می‌شود. از آنجا که هیدراتاسیون عامل اصلی کسب مقاومت در بتن تازه است، این توقف منجر به تعلیق معنادار افزایش مقاومت می‌گردد. مقدار دمای مبنا به عواملی نظیر نوع سیمان، نوع افزودنی‌های مورد استفاده، دوز مصرفی

نوآوری اصلی این پژوهش در ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های بلوغ بتن برای طرح اختلاط‌های رایج ایران، تحلیل آماری دقت روش‌های پیش‌بینی مقاومت و ارائه یک رابطه تجربی جدید مبتنی بر بلوغ بتن نهفته است. افزون بر این، پارامترهای مورد نیاز توابع نرس- سائل و آرنیوس از طریق برنامه آزمایشگاهی مستقل تعیین شده و عملکرد این دو روش در شرایط دمایی مختلف و با استفاده از داده‌های صحت‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- بلوغ بتن

در ساخت سازه‌های بتنی آگاهی از مقاومت بتن در سنین مختلف از جنبه‌های ایمنی و اقتصادی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است [۱]. این موضوع از منظر اطلاع از زمان مناسب باز کردن قالب‌ها و جمع‌آوری پایه‌های اطمینان، آغاز اعمال بار، شروع اعمال نیروی پس‌کشیدگی در اعضای پیش‌تنیده، بازگشایی مسیر عبور وسایل نقلیه از روی روسازی بتنی و یا کنترل ترک خوردگی قطعات بتنی مورد توجه جامعه مهندسی است. برای دستیابی به این هدف از روش‌های گوناگونی نظیر ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد ساخته شده مطابق ASTM C31، مغزه‌گیری از یک عضو بتنی مطابق روش ارائه شده در ASTM C42 و اندازه‌گیری مقاومت فشاری آن، آزمایش چکش اشمیت^۹، آزمایش بیرون کشیدگی^{۱۰}، آزمایش سرعت پالس التراسونیک (UPV^{۱۱}) و آزمایش مقاومت در برابر نفوذ می‌توان استفاده کرد [۲۶-۳۱]. هرکدام از این روش‌ها که به عنوان روش مخرب، نیمه‌مخرب یا غیرمخرب شناخته می‌شوند دارای محدودیت‌ها و تقریب‌هایی هستند. به عنوان مثال، قضاوت درباره مقاومت فشاری از طریق نمونه‌های آگاهی مستلزم ساخت تعداد کافی از این نمونه‌ها و نگهداری و عمل‌آوری آن‌ها در شرایط کاملاً مشابهی با عضو بتنی است. در برخی روش‌های دیگر نظیر آزمایش چکش اشمیت و سرعت پالس التراسونیک، حضور میلگردها

¹¹- Ultrasonic Pulse Velocity

⁹- Schmidt Hammer Test

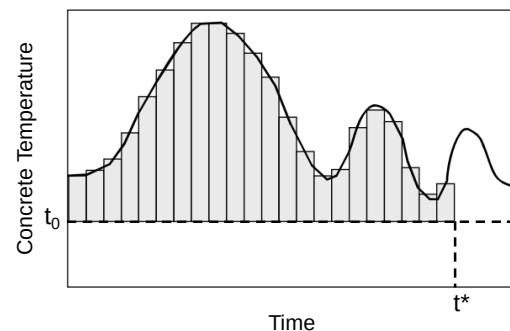
¹⁰- Pull Off Test

در رابطه ((۲)، M شاخص بلوغ در زمان t ، Δt فواصل زمانی برحسب ساعت، T_c متوسط دمای بتن در زمان Δt ، T_r دمای مرجع، E انرژی فعال سازی برحسب ژول بر مول و R ثابت عمومی گازها برحسب $\frac{J}{mol.K}$ است. انرژی فعال سازی، میزان انرژی لازم برای شروع یک واکنش شیمیایی است و مقدار آن معمولاً در محدوده ۳۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰۰ ژول بر مول است. البته برای تعیین میزان انرژی فعال سازی واکنش هیدراسیون سیمان می توان از روش ارائه شده توسط استاندارد ASTM C1074 استفاده کرد [۱۱]. دمای مرجع بین ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتیگراد است. حاصل رابطه ((۲)، به عنوان سن معادل بتن نیز شناخته می شود که نشان دهنده مدت زمانی است که بتن واقع در شرایط دمایی مشخص به میزان مقاومتی مشابه با مقاومت عمل آوری شده در دمای مرجع دست خواهد یافت.

۳- تخمین مقاومت فشاری بتن از طریق شاخص بلوغ بتن

هدف نهایی از بررسی تغییرات دمای بتن و به کارگیری روش بلوغ بتن جهت محاسبه شاخص بلوغ، تخمین مقاومت فشاری بتن درجا در زمان مورد نظر است؛ بنابراین پس از تعیین میزان شاخص بلوغ بتن می توان با برقراری رابطه ای بین بلوغ و مقاومت به تخمین میزان مقاومت بتن پرداخت. توابع زیادی بدین منظور پیشنهاد شده اند که از مهم ترین آن ها می توان به تابع نمایی، تابع هیپربولیک و تابع لگاریتمی اشاره کرد. استاندارد ASTM C1074 استفاده از توابع هیپربولیک یا نمایی را توصیه کرده است [۱۱]. به کارگیری هر کدام از این توابع، مستلزم کالیبره کردن آن جهت افزایش دقت تابع در تخمین مقاومت است؛ بنابراین برای طرح اختلاط و مصالح مورد نظری که در ساخت بتن مورد استفاده قرار می گیرد براساس دستورالعمل استاندارد ASTM C1074 با انجام آزمایش، مقدار مقاومت در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

افزودنی ها (خصوصاً افزودنی هایی که بر سرعت هیدراتاسیون تأثیرگذارند) و محدوده دمایی که بتن در حین سخت شدن تجربه می کند بستگی دارد. مطابق استاندارد ASTM C1074 برای سیمان نوع I بدون افزودنی و محدوده پخت بین صفر تا ۴۰ درجه سانتیگراد، دمای مینا توصیه شده صفر درجه سانتیگراد است [۱۱]. در شکل ۱، به صورت شماتیک نحوه محاسبه بلوغ بتن با روش نرس- سائول نمایش داده شده است. میزان بلوغ بتن از محاسبه مساحت زیر نمودار تغییرات دمای بتن- زمان به دست می آید و برحسب ساعت- درجه سانتیگراد یا روز- درجه سانتیگراد بیان می شود.



شکل ۱- نمایش شماتیک محاسبه بلوغ بتن از طریق نمودار تغییر دمای بتن- زمان

۲-۲- محاسبه بلوغ بتن با روش آرنیوس

این روش برای اولین بار با این ادعا که امکان بیان تأثیر دما بر سرعت اولیه هیدراسیون سیمان با استفاده از معادله واکنش هیدراسیون وجود دارد، در سال ۱۹۶۰ توسط کاپلند^{۱۲} پیشنهاد شد و در ادامه در سال ۱۹۷۷ توسط فریزلبن هسن^{۱۳} و همکاران رابطه ای ریاضی برای تعیین میزان بلوغ بتن بر مبنای معادله آرنیوس ارائه شد [۳۳].

رابطه ارائه شده توسط فریزلبن و همکاران به ترتیب زیر می باشد:

$$M(t) = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273 + T_c} - \frac{1}{273 + T_r} \right] \Delta t} \quad (2)$$

¹³- Friesleben Hansen

¹²- Copeland

۴- مطالعه موردی

۴-۱- طرح اختلاط بتن

همانطور که پیش‌تر گفته شد مدل مورد استفاده برای برقراری رابطه بین بلوغ و مقاومت بتن باید براساس طرح اختلاط بتن کالیبره شود؛ در این پژوهش از طرح اختلاط ارائه شده مطابق جدول ۱ که توسط یکی از کارخانه‌های تولید بتن آماده شهر اراک مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شد. سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ بوده و نسبت آب به سیمان مخلوط برابر ۰/۳۶ است. در ساخت نمونه‌های مورد مطالعه از هیچ‌گونه افزودنی شیمیایی استفاده نشد تا رابطه بین بلوغ و مقاومت فشاری برای یک طرح اختلاط پایه مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۱- طرح اختلاط

مصالح	مقدار مورد استفاده در طرح اختلاط برای یک مترمکعب (Kg/m ³)
سیمان	۳۵۵
ماسه	۱۱۰۰
شن	۷۵۰
آب	۱۳۰

پس از آن در گام‌های زمانی یک ساعته ثبت می‌شود [۱۱]. شایان ذکر است برای اندازه‌گیری دمای بتن از سنسورهای ضدآب DS18B20 با پوشش استیل و دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. صحت عملکرد سنسورها پیش از انجام آزمایش‌ها از طریق مقایسه با دماسنج استاندارد کنترل گردید. سنسورها در مرکز نمونه‌های بتنی تعبیه شده و داده‌های دمایی ثبت‌شده از طریق فناوری بلوتوث به نرم‌افزار طراحی‌شده بر روی تلفن همراه با سیستم‌عامل اندروید منتقل می‌شوند.

۴-۲- محاسبه ضرایب بلوغ

در مرحله بعد برای تعیین خواص حرارت‌زایی سیمان به منظور تعیین انرژی فعال‌سازی و مقدار سرعت واکنش و دمای مبنا در روش نرس- سائل بر روی نمونه‌های ملات

به‌دست آمده و بهترین ضرایب تابع مورد استفاده جهت دستیابی به نتایج با بیشترین دقت تعیین شود [۱۱]. قابل توجه است که مصالح موجود در مناطق مختلف جهت ساخت بتن متفاوت است؛ به همین جهت، یافتن تابعی بهینه برای تخمین میزان مقاومت بتن ساخته شده در هر منطقه یکی از چالش‌های مهندسی است. در این پژوهش از روش تابع نمایی استفاده شده است. رابطه تابع مذکور به صورت زیر می‌باشد:

$$S = S_u \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha} \quad (3)$$

در این رابطه، S مقاومت فشاری، S_u مقاومت حدی فشاری، t سن بتن، τ یک ثابت زمانی و α یک پارامتر شکل است.

با هدف ترسیم نمودار مقاومت برحسب شاخص بلوغ بتن، ۱۵ نمونه مکعبی در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر تهیه شده تا در هریک از سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری بتن تعیین شود. در این راستا در هریک از این سنین دو آزمون مورد آزمایش قرار می‌گیرد و مقدار میانگین مقاومت آن‌ها به‌عنوان مقاومت بتن در آن سن در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که مقدار میانگین اختلافی بیش از ۱۰ درصد با مقدار مقاومت هریک از این دو آزمون داشته باشد، آزمون سوم نیز مورد آزمایش قرار می‌گیرد. از آنجا که برای محاسبه شاخص بلوغ، تاریخچه دمایی نمونه‌ها نیز مورد نیاز است، تاریخچه دمایی آزمون‌ها ثبت می‌شود و میانگین مقادیر آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا بر مبنای توصیه استاندارد ASTM C1074 دمای بتن در ۴۸ ساعت ابتدایی در گام‌های زمانی نیم ساعته و

محدوده دمایی بین ۲۰- تا ۴۰+ درجه سانتیگراد دارد؛ همچنین در این پژوهش جهت گرم کردن تدریجی و یکنواخت، در یک بازه زمانی خاص از دستگاه بنماری استفاده شده است. در شکل ۲، نمایی از دستگاه ذوب یخ‌بندان و در شکل ۳، دستگاه بنماری و نمونه‌های ملات داخل آن مشاهده می‌شود.



شکل ۲- دستگاه ذوب و یخ‌بندان

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد لازم است دمای نمونه در فواصل مختلف زمانی ثبت شود؛ بنابراین سنسوری که از یک قسمت به برد الکترونیکی و باتری و از قسمتی دیگر با سیم به برد متصل شده است جهت ثبت دما با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد طراحی شده است؛ قابل توجه است که این سنسور به دلیل قرارگیری داخل بتن ضد آب طراحی شده است. در شکل ۴، نمایی از سنسور ثبت دما قابل مشاهده است. مقدار انرژی فعال‌سازی (E)، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k = Ae^{\frac{-E}{RT}} \quad (۴)$$

در این رابطه، k ضریب رشد، R ثابت عمومی گازها و T دمای مطلق برحسب کلونین است.

ماسه سیمان آزمایش‌هایی صورت می‌گیرد. طرح اختلاط ملات به گونه‌ای است که نسبت ماسه به سیمان و نسبت آب به سیمان ملات به ترتیب مشابه با نسبت شن به سیمان و نسبت آب به سیمان در مخلوط نمونه‌های بتنی است. مقدار مقاومت این نمونه‌ها در شش سن مختلف و سه دمای عمل‌آوری متفاوت تعیین شده است. مطابق دستورالعمل ذکر شده در ASTM C1074 اولین سن معادل با سنی که مقدار مقاومت فشاری به چهار مگاپاسکال می‌رسد و سنین بعدی به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که میزان مقاومت در هر سن دو برابر مقاومت در سن قبلی باشد [۱۱]. دماهای عمل‌آوری نمونه‌ها شامل کمترین دمای مورد انتظار، بیشترین دمای مورد انتظار و میانگین این دو دما است که در این پژوهش به ترتیب مقادیر ۱۵، ۳۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. برای تعیین مقاومت در هر دما و هر سن، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است.

برای محاسبه شاخص بلوغ، تاریخچه دمایی نمونه‌ها استخراج شده است. سپس با استفاده از داده‌ها و نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های بتنی و ملات در ابتدا پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه شاخص بلوغ برای بتن مورد مطالعه، تعیین گردیده است.

دستگاه ذوب و یخ‌بندان یکی از اصلی‌ترین دستگاه‌های استفاده شده در این پژوهش است که شبیه‌سازی شرایط محیطی مختلف و تعریف دوره‌های مختلف دمایی را فراهم می‌کند؛ این دستگاه توانایی ایجاد

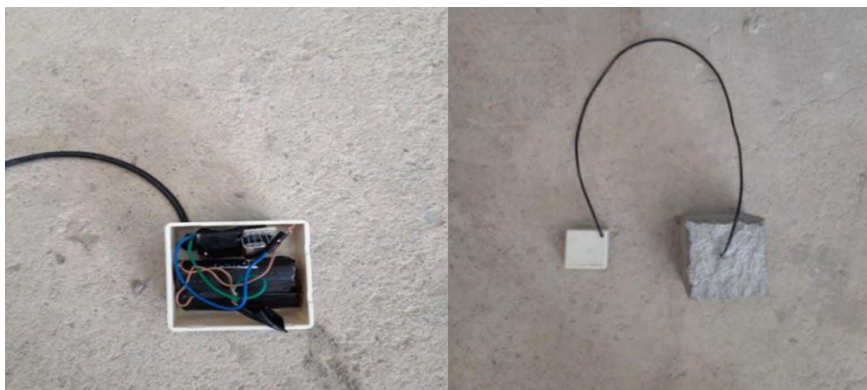


(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) دستگاه بنماری و (ب) نمونه‌های ملات داخل دستگاه بنماری



شکل ۴- سنسور دمایی

آن سن شروع می‌شود. مقدار این ضریب مطابق جدول ۲ برای نمونه‌های ملات در هر سه شرایط دمایی عمل‌آوری تعیین شده است. به منظور تعیین انرژی فعال‌سازی، با برازش یک خط از بین نقاطی که در دستگاه مختصات دکارتی با محور قائم لگاریتم بر مبنای عدد نپر مقدار k و محور افقی مقدار معکوس دما برحسب کلوین رسم شده‌اند، می‌توان از حاصل ضرب قدرمطلق شیب خط مذکور در ثابت عمومی گازها مقدار انرژی فعال‌سازی را تعیین کرد. مقدار ثابت عمومی گازها برابر $8/314 \text{ J/(K.mol)}$ است.

براساس دستورالعمل ASTM C1074 برای تعیین ضریب k ، براساس اطلاعات مقاومت- سن نمونه‌های ملات در دماهای مختلف عمل‌آوری نموداری با استفاده از الگوی تابع زیر برازش داده و مقدار ضریب مورد نظر تعیین گردیده است.

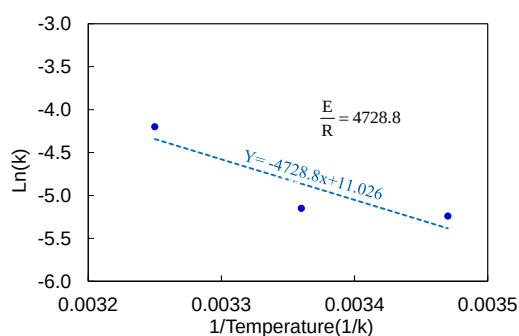
$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، t سن نمونه برحسب روز، S میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن t ، S_u مقاومت حدی، t_0 سن نمونه برحسب روز که فرض می‌شود رشد مقاومت از

جدول ۲- ثابت‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار متلب

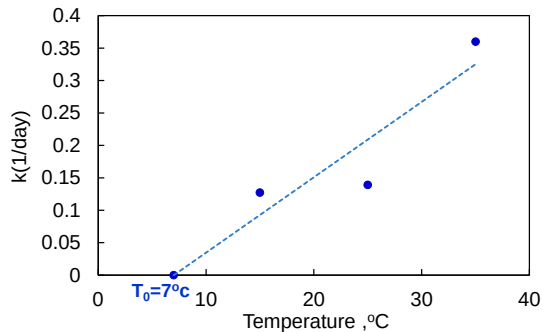
دما ($^{\circ}\text{C}$)	t_0 (hr)	S_u (Mpa)	k (hr^{-1})	$1/T$ (kelvin)
۱۵	۱۶/۰	۳۳/۲	$5/4 \times 10^{-3}$	$0/00347$
۲۵	۹/۸	۳۶/۵	$5/8 \times 10^{-3}$	$0/00335$
۳۵	۴/۰	۲۴/۴	$1/6 \times 10^{-3}$	$0/00324$

[۳۴]. همچنین فریزلین هنس و همکاران مقدار انرژی فعال‌سازی را $33/5$ تا 45 کیلوژول بر مول برآورد نمودند [۳۳].

شکل ۵- نقاط و خط برازش شده برای محاسبه E

در نمودار شکل ۵، نقاط مذکور و خط برازش داده شده نمایش داده شده است و بدین ترتیب مقدار نسبت قدرمطلق انرژی فعال‌سازی به ثابت عمومی گازها برابر با $4728/8$ به‌دست آمده است که با احتساب مقدار ثابت عمومی گازها، مقدار انرژی فعال‌سازی $39/3$ کیلوژول بر مول می‌باشد. این مقدار با یافته‌های مطالعات پیشین نیز همخوانی مناسبی دارد. به‌طوری که کارینو برای مخلوط‌های مختلف بتن و ملات مقادیر انرژی فعال‌سازی را بین 30 تا 63 kJ/mol و برای سیمان پرتلند نوع II مقادیری در حدود 41 تا 43 kJ/mol ارائه نموده است

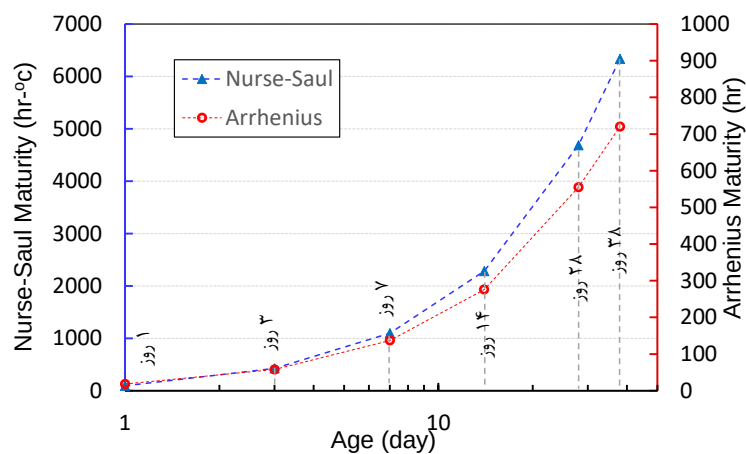
محاسبه کرد. در شکل ۷، نمودار تغییرات شاخص بلوغ بتن براساس روش نرس- سائول و آرنیوس، نشان داده شده است.



شکل ۶- استخراج دمای مبنا

۵-۲- مقاومت فشاری بتن

پس از محاسبه شاخص بلوغ بتن و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی در سنین مختلف، یک منحنی با الگوی تابع نمایی از بین اطلاعات تجربی موجود برازش داده شد.



شکل ۷- تغییرات شاخص بلوغ بتن بر اساس روش نرس- سائول و آرنیوس

نشان‌دهنده قدرت توصیف‌کنندگی بالاتر مدل است. از سوی دیگر، مجموع مربعات خطاها (SSE) معیاری از انحراف کلی پیش‌بینی‌های مدل از مقادیر واقعی است و هرچه مقدار آن کمتر باشد، دقت مدل بالاتر خواهد بود.

در این تحقیق، توابع نمایی برای دو سری داده مستقل حاصل از روش‌های متفاوت محاسبه شاخص بلوغ (روش نرس- سائول و روش آرنیوس) برازش داده شد. مقادیر محاسبه‌شده برای شاخص‌های آماری R^2 و SSE

برای تعیین مقدار دمای مبنا (T_0) در روش نرس- سائول برای مخلوط بتنی مورد مطالعه در این پژوهش، از نمودار ضریب رشد (k) در برابر دما (T) استفاده می‌شود. مطابق نمودار شکل ۶، براساس اطلاعات به‌دست آمده از نمونه‌های ملات بهترین خط از بین نقاط موجود برای سه دمای مختلف برازش داده شده و محل تلاقی آن با محور افقی به عنوان مقدار دمایی که میزان رشد واکنش به صفر می‌رسد، به عنوان مقدار دمای مبنا استخراج شده است؛ بنابراین دمای مبنا برابر با ۷ درجه سانتی‌گراد است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بلوغ بتن

با در اختیار داشتن پارامترهای موجود در روابط بلوغ و تاریخچه دمایی بتن می‌توان شاخص بلوغ بتن در سنین مختلف را با استفاده از روش نرس- سائول و آرنیوس

دقت و قابلیت اطمینان این تابع برازش‌یافته در پیش‌بینی مقاومت بتن، با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و مجموع مربعات خطاها (SSE) مورد ارزیابی قرار گرفت.

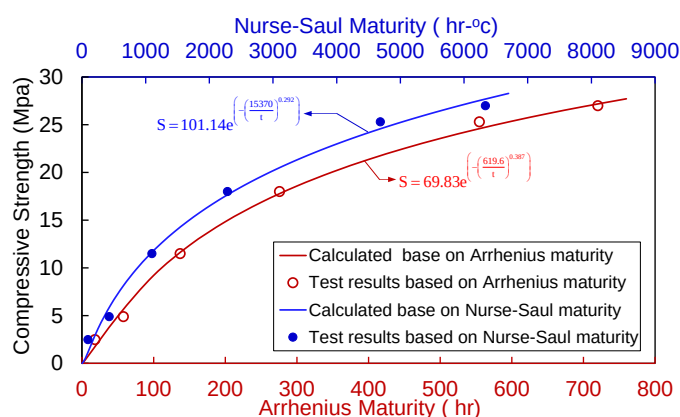
ضریب تعیین (R^2) که از مربع ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی مقاومت و مقادیر تخمین‌زده‌شده توسط تابع به‌دست می‌آید، نشان‌دهنده تناسب مدل با داده‌ها است. هرچه مقدار این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد،

هریک از این توابع، در جدول ۳ ارائه شده‌اند. مقایسه این مقادیر، امکان بررسی دقت تابع مورد نظر در برآورد مقاومت براساس شاخص بلوغ را فراهم می‌کند. مقدار ضریب تعیین تابع به دست آمده برای هر دو روش بلوغ، بیش از ۰/۹۹ و میزان مجموع مربعات خطاهای آن برای مقادیر بلوغ حاصل از روش نرس- سائول ۳/۸ و برای روش آرنیوس مقدار ۲/۸ می‌باشد که بیانگر توانایی مناسب تابع در برآورد میزان مقاومت بتن براساس شاخص بلوغ است ولیکن دقت تابع براساس روش آرنیوس بیشتر است. در واقع، افزایش دما موجب افزایش سرعت کسب مقاومت می‌شود، اما این وابستگی خطی نیست. روش نرس- سائول اثر دما را به‌صورت خطی در نظر می‌گیرد و ممکن است در دماهای بالا مقاومت را بیش‌برآورد کند. در مقابل، روش آرنیوس با لحاظ کردن انرژی فعال‌سازی، وابستگی غیرخطی سرعت

هیدراتاسیون به دما را مدل می‌کند و بنابراین تأثیر تاریخچه حرارتی بتن را دقیق‌تر منعکس می‌سازد و باعث شده تا مقاومت‌های پیش‌بینی‌شده با روش آرنیوس انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته باشند. برای ارزیابی بصری کارایی تابع نمایشی برازش‌یافته، مقادیر مقاومت فشاری آزمایشگاهی در برابر شاخص بلوغ محاسبه‌شده با هر دو روش، در شکل ۸ ترسیم گردیده‌اند. مشاهده می‌شود که در هر دو شکل، توزیع نقاط تجربی حول منحنی تابع نمایشی از پراکندگی اندکی برخوردار است که به‌وضوح نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده توانسته روند کلی افزایش مقاومت را با دقت مطلوبی دنبال نماید. این هماهنگی میان مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط تابع مذکور و نتایج حاصل از آزمایش، موید آن است که رابطه نمایشی انتخابی قادر به ارائه تخمینی معتبر از مقاومت فشاری بتن براساس پارامتر بلوغ است.

جدول ۳- مقادیر ضریب تعیین و مجموع مربعات خطاهای تابع نمایشی برای تعیین مقاومت فشاری بتن

روش آرنیوس		روش نرس- سائول	
SSE	R ²	SSE	R ²
۲/۸	۰/۹۹۵	۳/۸	۰/۹۹۳



شکل ۸- نمودار مقاومت تخمینی بتن براساس شاخص بلوغ نرس- سائول و آرنیوس و مقاومت به دست آمده از آزمایش

۵-۳- صحت‌سنجی

با هدف صحت‌سنجی تابع پیشنهادی مقاومت سه سری نمونه بتنی که در بازه‌های دمایی متفاوتی نگهداری شده بودند با مقاومت به‌دست آمده براساس تابع نمایشی در سنین مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا نمونه‌های مکعبی بتنی به ابعاد ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر ساخته

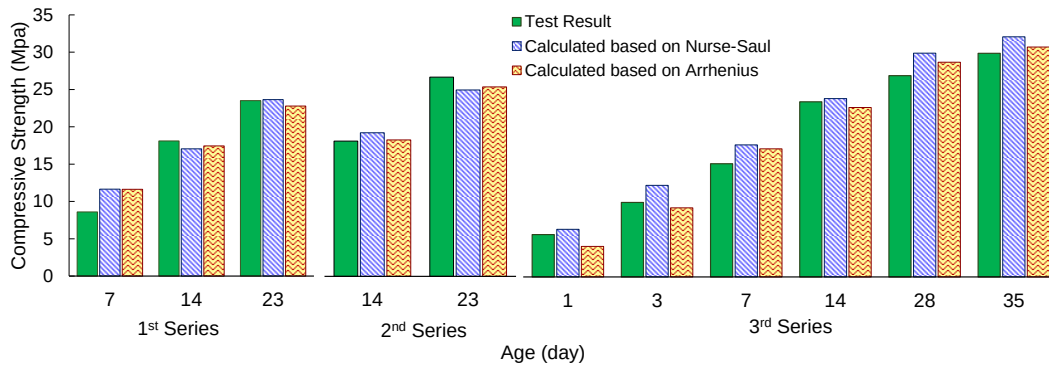
و در یکی از آن‌ها سنسور در مرکز مکعب قرار داده شد و بقیه نمونه‌ها در شرایط کاملاً یکسان در محیط کارگاه قرار گرفتند. در شکل ۹، مقایسه نتایج مقاومت نمونه‌های بتنی و مقاومت محاسبه شده با استفاده از این تابع نشان داده شده است.

در سری اول آزمایش‌های صحت‌سنجی بازه دمایی بین ۸ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده و مقاومت فشاری

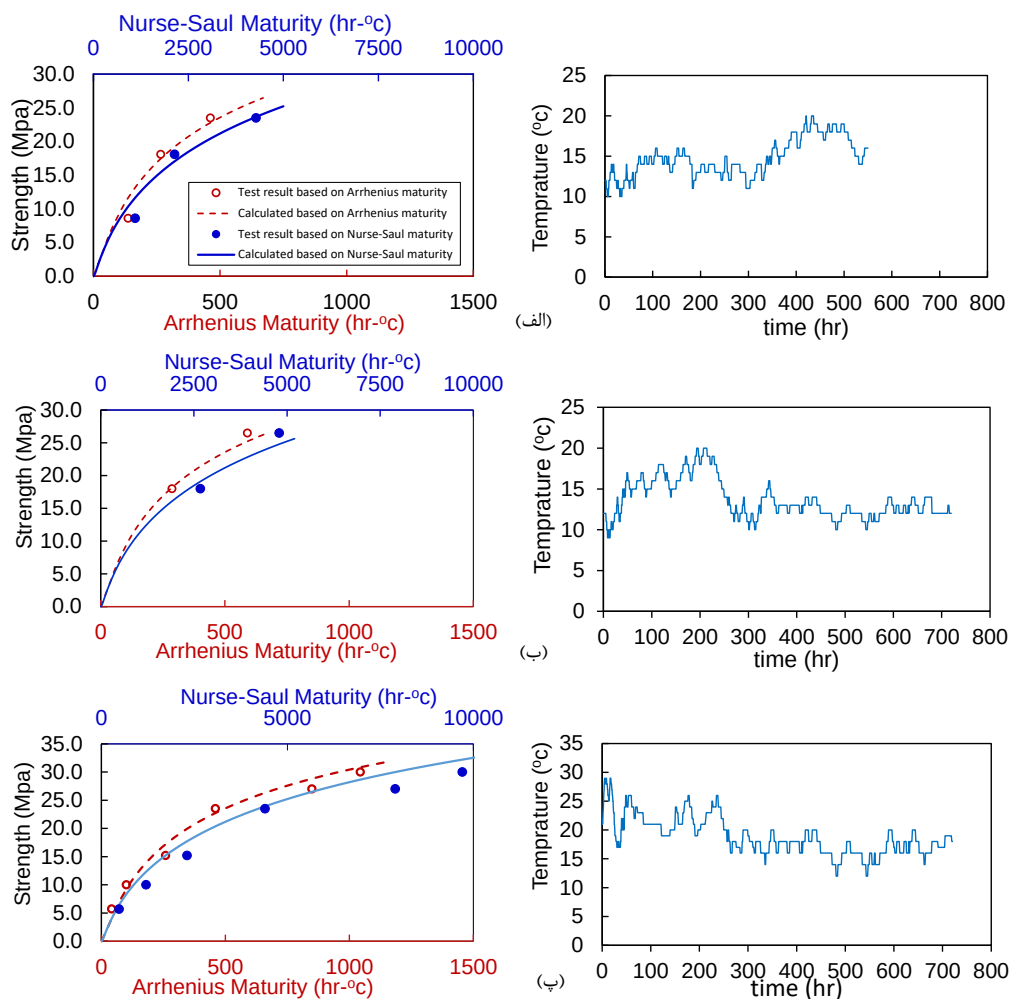
نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۳ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

در شکل ۱۰- الف، تاریخچه دمایی نمونه‌های سری اول صحت‌سنجی و نمودار تخمین مقاومت فشاری به روش نرس- سائول و آرنیوس نتایج حاصل از آزمایش نشان داده

شده است. مشاهده می‌شود تخمین مقاومت فشاری از طریق شاخص بلوغ بتن از هر دو روش آرنیوس و نرس- سائول تقریباً به درستی انجام شده و نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری با مقدار تخمین زده شده، به خصوص در سنین بالاتر نمونه، اختلاف کمی دارند.



شکل ۹- مقایسه نتایج مقاومت نمونه‌های بتنی و مقاومت محاسبه شده با استفاده از تابع نمایی

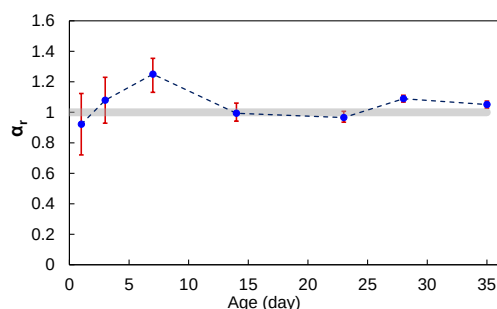


شکل ۱۰- نمودارهای دما- زمان و نمودار تخمین مقاومت به روش نرس- سائول و آرنیوس و مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش نمونه‌های صحت‌سنجی، (الف) سری اول، (ب) سری دوم و (پ) سری سوم

به منظور بررسی کمی توانایی تابع نمایی جهت تخمین مقاومت بتن براساس میزان بلوغ محاسبه شده با روش های آرنیوس و نرس- سائل، پارامتر α_r به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$\alpha_r = \frac{CS_{Ar,N-S}}{CS_E} \quad (5)$$

در این رابطه، $CS_{Ar,N-S}$ مقاومت به دست آمده از تابع نمایی و CS_E میانگین مقاومت به دست آمده از آزمایش نمونه‌های صحت سنجی در سنین مختلف است. نتایج کمی نسبت α_r در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. تغییرات کمیت α_r وابستگی قابل توجه دقت مدل را به زمان نشان می‌دهد. در سنین کمتر از ۱۴ روز، میانگین خطای مدل در تخمین مقاومت ۱۴ درصد است و همچنین میانگین پراکندگی داده‌ها براساس معیار ضریب تغییرات ۱۵ درصد می‌باشد. در مقابل، برای سنین بالاتر از ۱۴ روز، عملکرد مدل به صورت چشمگیری بهبود یافت به طوری که میانگین خطا به حدود ۵ درصد کاهش پیدا کرد و پراکندگی نتایج نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افت کرد، به طوری که ضریب تغییرات به ۴ درصد تقلیل یافت.



شکل ۱۱- میانگین نسبت مقاومت ارزیابی شده با توابع بلوغ به مقدار آزمایشگاهی بتن در سنین مختلف

مقدار خطای پیش‌بینی شده در روش آرنیوس و نرس- سائل در نمودار شکل ۱۲ نمایش داده شده است. مطابق نمودار میزان خطای ناشی از محاسبه مقاومت با روش های نرس- سائل و آرنیوس تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. در هر دو روش در سنین بالای ۱۴ روز درصد خطا کاهش یافته است. در روش نرس- سائل در اکثر نمونه‌ها

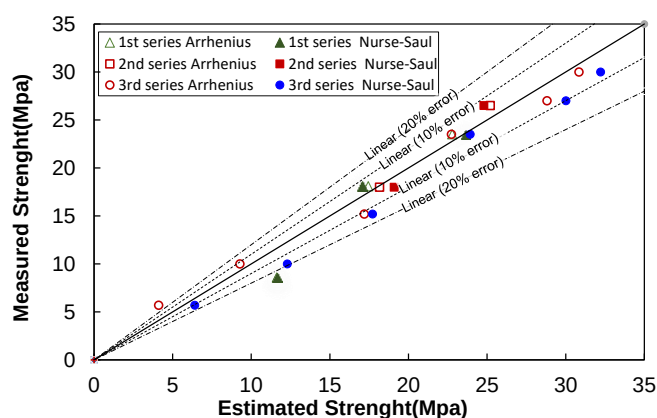
در سری دوم آزمایش‌های صحت‌سنجی، بازه دمایی بین ۹ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده و نمونه‌ها در سنین ۱۴ و ۳۰ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند؛ در شکل ۱۰- ب، تاریخچه دمایی آزمایش‌های صحت‌سنجی سری دوم و نمودار تخمین مقاومت فشاری در برابر بلوغ براساس تابع نمایی و نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داده شده است. از نتایج صحت‌سنجی دوم مشخص است که مقدار مقاومت تخمین زده شده از روش آرنیوس و نرس- سائل تا حد زیادی به هم نزدیک است؛ با این حال نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری با مقدار تخمینی از روش آرنیوس نزدیک‌تر بوده است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد در این سری از آزمایش‌ها تخمین مقاومت روش آرنیوس تا حدودی بهتر از روش نرس- سائل بوده است.

سری سوم آزمایش‌های صحت‌سنجی نمونه‌ها در دمای بالاتری (بازه دمایی بین ۲۰ تا ۳۵ درجه) نسبت به سری اول و دوم قرار گرفته و مقاومت فشاری آن‌ها در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۳۵ روز اندازه‌گیری شد. تاریخچه دمایی این سری از آزمایش‌ها و تغییرات مقاومت فشاری نسبت به میزان بلوغ بتن در تابع نمایی و مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۱۰- پ نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد مقاومت های محاسبه شده براساس شاخص بلوغ آرنیوس در مقایسه با مقاومت های محاسبه شده براساس بلوغ نرس- سائل از انطباق بیشتری با نتایج به دست آمده از آزمایش برخوردارند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد با افزایش دمای نگهداری نمونه های بتنی، تابع نمایی مقادیر مقاومت براساس شاخص بلوغ نرس- سائل را دست بالا برآورد می‌کند. دلیل این امر آن است که در روش نرس- سائل، تأثیر دما بر پیشرفت هیدراتاسیون به صورت خطی مدل‌سازی می‌شود، در حالی که سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون تابعی نمایی از دما و وابسته به انرژی فعال‌سازی است. از این‌رو، در دماهای بالا شاخص بلوغ محاسبه‌شده با این روش بزرگ‌تر از مقدار متناظر با میزان واقعی پیشرفت هیدراتاسیون بوده و منجر به بیش‌برآورد مقاومت فشاری می‌شود.

توسعه مقاومت را بهتر از تابع خطی نرس- سائول مدل سازی کند [۳۴ و ۳۷]. همچنین نیکسون^{۱۷} گزارش کرده است که در سنین اولیه، توابع مبتنی بر آرنیوس معمولاً خطای کمتری نسبت به تابع نرس- سائول داشته و تخمین دقیق تری از مقاومت ارائه می کنند [۳۵]. بخشی از اختلاف مشاهده شده بین مقاومت های اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده را می توان به منابع مختلف عدم قطعیت در روش بلوغ نسبت داد. این روش بر این فرض استوار است که نمونه های دارای شاخص بلوغ یکسان، مقاومت یکسانی خواهند داشت؛ در حالی که تفاوت در شرایط عمل آوری، نرخ هیدراتاسیون و فرآیند شکل گیری ریزساختار خمیر سیمان می تواند سبب ایجاد مقاومت های متفاوت در مقادیر بلوغ مشابه شود. علاوه بر این، خطاهای ناشی از اندازه گیری دما، اختلاف دمای موضعی در نقاط مختلف عضو بتنی، پراکندگی ذاتی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و محدودیت مدل های بلوغ در توصیف رفتار پیچیده هیدراتاسیون، از دیگر عوامل مؤثر بر عدم قطعیت پیش بینی ها هستند. این اثرات در سنین اولیه که نرخ تغییرات مقاومت زیاد است، نمود بیشتری دارند؛ در حالی که با افزایش سن بتن و کاهش سرعت هیدراتاسیون، حساسیت مقاومت به تغییرات دما کاهش یافته و دقت پیش بینی افزایش می یابد.

مقاومت محاسبه شده با استفاده از تابع نمایی بیشتر از مقدار اندازه گیری شده در آزمایش می باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش با یافته های مطالعات پیشین نیز همخوانی مناسبی دارد. نیکسون گزارش نمود که میانگین خطای روش های بلوغ در شرایط میدانی و بسته به نوع تابع بلوغ و شرایط عمل آوری، معمولاً در محدوده ۶ تا ۱۵ درصد قرار دارد. همچنین بررسی های انجام شده نشان می دهد که خطای پیش بینی مقاومت با روش بلوغ می تواند از کمتر از یک درصد در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده تا حدود ۲۷ درصد در شرایط پیچیده میدانی متغیر باشد [۳۵]. دمیر و آلیاماچ^{۱۴} نیز برای بتن های با مقاومت بالا، میانگین خطای نسبی بین ۰/۱ تا ۱۰/۱ درصد را گزارش کردند [۳۶]. در پژوهش حاضر، میانگین خطای پیش بینی مقاومت در سنین کمتر از ۱۴ روز، حدود ۱۴ درصد و در سنین بالاتر از ۱۴ روز، حدود پنج درصد به دست آمد که در محدوده مقادیر گزارش شده در تحقیقات پیشین قرار دارد. مقایسه روش های آرنیوس و نرس- سائول نشان داد که هر دو روش قادر به پیش بینی مناسب مقاومت بتن هستند، اما روش آرنیوس به ویژه در شرایط دمایی متغیر و دماهای بالاتر عملکرد دقیق تری ارائه می کند. این مشاهده با نتایج کارینو^{۱۵} و کجلسن^{۱۶} همخوانی دارد که بیان کرده اند تابع آرنیوس به دلیل در نظر گرفتن وابستگی غیرخطی سرعت هیدراتاسیون به دما، قادر است روند واقعی



شکل ۱۲- نمودار مقدار خطا در پیش بینی مقاومت با تابع نمایی در روش نرس- سائول و آرنیوس

16- Kjellsen

17- Nixon

14- Demir and Alyamaç

15- Carino

۶- نتیجه‌گیری

یافته‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که تابع نمایی مؤثرترین رابطه بین بلوغ بتن و مقاومت فشاری را ارائه می‌دهد. اگرچه هر دو روش نرس- سائول و آرنیوس از طریق این تابع، پیش‌بینی مقاومت را ممکن ساختند، اما رویکرد مبتنی بر آرنیوس، به دلیل در نظر گرفتن دقیق‌تر تأثیر ترمودینامیکی دما بر سینتیک هیدراتاسیون، دقت بالاتری را نتیجه داد. دقت پیش‌بینی و یکنواختی نتایج برای سنین فراتر از ۱۴ روز به‌طور چشمگیری بهبود یافت، به‌طوری‌که خطای متوسط به حدود ۵ درصد کاهش پیدا کرد.

برای پژوهش‌های آتی، توصیه می‌شود تأثیر سایر متغیرها نظیر رطوبت نسبی در حین عمل‌آوری، استفاده مواد افزودنی شیمیایی مختلف (مانند زودگیر یا دیرگیرکننده‌ها) در تعیین میزان بلوغ بتن و تخمین مقاومت آن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین اعتبار مدل پیشنهادی با دامنه وسیع‌تری از طرح‌های اختلاط بتن، از جمله بتن‌های با عملکرد بالا، قابلیت تعمیم‌پذیر آن تقویت گردد.

این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی- عددی به ارزیابی تطبیقی توابع بلوغ نرس- سائول و آرنیوس برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف و تحت دمای عمل‌آوری متفاوت پرداخت. هدف اصلی، توسعه و اعتبارسنجی یک مدل محاسباتی قابل‌اطمینان برای تبدیل مقادیر بلوغ محاسبه‌شده به تخمین‌های دقیقی از مقاومت بود.

اهمیت اصلی این مطالعه در اعتبارسنجی یک ابزار عملی و غیرمخرب برای تخمین مقاومت درجا نهفته است که به واسطه آن دست‌اندرکاران می‌توانند با استفاده از پایش معمول دما، تصمیمات آگاهانه و مبتنی بر داده برای فعالیت‌های واقع در مسیر بحرانی عملیات اجرایی ساخت، مانند برداشتن قالب‌بندی و پیش‌تنیدگی اتخاذ کنند. این موضوع به‌طور همزمان کارایی اقتصادی و ایمنی سازه‌ای پروژه‌های ساختمانی را افزایش می‌دهد.

References

- [1] Malhotra VM, Carino NJ, editors. Nondestructive testing of concrete. New York, NY, USA:: CRC press; 2004.
- [2] De Carufel S, Fahim A, Ghods P, Alizadeh A. Concrete maturity from theory to application. Giatec Scientific Inc. 2018; 20: 21.
- [3] Dastan Diznab MA, Mosavi M, Karmi Mehrabadi M, Akhane M. Evaluation of heat transfer and rate of strength gain of concrete. Sharif Journal of Civil Engineering. 2021; 36(4.1): 131-139. doi: 10.24200/j30.2020.54432.2639 [In Persian]
- [4] Hosseini P, Naghian A, Abedi A. Innovative approach to sustainable construction: utilization of refined travertine processing by-products as partial cement replacement in eco-friendly concrete. Journal of Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 105-125. doi: 10.22091/CER.2025.11940.1588 [In Persian]
- [5] Saadatkhosh M, Aezoumandi M, Pour Hosseini SH. Verification of mechanical properties provisions of existing codes for lightweight concrete. Journal of Civil Infrastructure Researches. 2018; 4(1): 41-55. doi: 10.22091/CER.2018.2951.1109 [In Persian]
- [6] Carino NJ. The maturity method: theory and application. Cement, Concrete, and Aggregates. 1984; 6(2): 61-73. doi: 10.1520/CCA10358J
- [7] Anderson KW, Uhlmeier JS, Kinne C, Pierce LM, Muench S. Use of the maturity method in accelerated PCCP construction. Olympia (WA): Washington State Department of Transportation; Report No: WA-RD 698.1. 2009.
- [8] Johnson R, Hosten AM. Implementation of the concrete maturity meter for Maryland. Final report. Baltimore (MD): Maryland State Highway Administration; Report No.: MD-11-SP708B4K. 2011.
- [9] Henault JW. Assessing ConnDOT's portland cement concrete testing methods phase II: field trials and implementation. Final report. Hartford (CT): Connecticut Department of Transportation; Report No: CT-2252-F-12-3. 2012.
- [10] Azhar S. Utilization of the maturity method for concrete quality assurance in bridge substructure in Florida. Presented at: Transportation Research Board 85th Annual Meeting; Washington, DC, USA. 2006 Jan; 22-26.

- [11] ASTM International. ASTM C1074-19e1: Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2021. **doi:10.1520/C1074-19E01**
- [12] Miller D, Ho NM, Talebian N. Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method: an overview. *Structures*. 2022; 44: 1081-1104. **doi: 10.1016/j.istruc.2022.08.077**
- [13] Soutsos MN, Turu'allo G, Owens K, Kwasny J, Barnett SJ, Basheer PAM. Maturity testing of lightweight self-compacting and vibrated concretes. *Constr Build Mater*. 2013; 47: 118-125. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.045**
- [14] Boubekeur T, Ezziane K, Kadri EH. Estimation of mortar compressive strength at different curing temperatures by the maturity method. *Constr Build Mater*. 2014; 71: 299-307. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.084**
- [15] Galobardes I, Cavalaro SH, Goodier CI, Austin SA, Rueda Á. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. *Constr Build Mater*. 2015; 79: 357-369. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038**
- [16] Zhang J, Cusson D, Monteiro PJM, Harvey JT. New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications. *Cem Concr Res*. 2008; 38(12): 1438-1446. **doi: 10.1016/j.cemconres.2008.08.001**
- [17] Ibrahim MS, Moustafa MA, Shoaib S. Compressive strength and maturity of UHPC cubes and cylinders: new conversion factors and recommendations for early-age quality control. *Scientific Reports*. 2026; 16: 2450. **doi: 10.1038/s41598-025-32316-z**
- [18] Waller V, d'Aloia L, Cussigh F, Lecrux S. Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cem Concr Compos*. 2004; 26(5): 589-599. **doi: 10.1016/S0958-9465(03)00080-5**
- [19] Yikici TA, Chen HLR. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. *Constr Build Mater*. 2015; 95: 802-812. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026**
- [20] Jin NJ, Seung I, Choi YS, Yeon J. Prediction of early-age compressive strength of epoxy resin concrete using the maturity method. *Constr Build Mater*. 2017; 152: 990-998. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.066**
- [21] Nandhini K, Karthikeyan J. The early-age prediction of concrete strength using maturity models: A review. *J Build Pathol Rehabil*. 2021; 6(1): 7. **doi: 10.1007/s41024-020-00102-1**
- [22] Ryu GS, An GH, Yoon YS, Kim JY, Choi S. Evaluation of concrete compressive strength prediction using the maturity method incorporating various curing temperatures and binder compositions. *Materials*. 2024; 17(23): 5794. **doi: 10.3390/ma17235794**
- [23] Wang L, Zhou H, Zhang J, Wang Z, Zhang L, Nehdi ML. Prediction of concrete strength considering thermal damage using a modified strength-maturity model. *Construction and Building Materials*. 2023; 400: 132779. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132779**
- [24] Kanavaris F, Soutsos M, Chen JF. Enabling sustainable rapid construction with high-volume GGBS concrete through elevated temperature curing and maturity testing. *Journal of Building Engineering*. 2023; 63: 105434. **doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105434**
- [25] Ju H, Xing L, Ali AH, El-Arab IE, Elshekh AE, Abbas M, Abdullah N, Elattar S, Hashmi A, Ali E, Assilzadeh H. Predicting concrete strength early age using a combination of machine learning and electromechanical impedance with nano-enhanced sensors. *Environmental Research*. 2024; 258: 119248. **doi: 10.1016/j.envres.2024.119248**
- [26] ASTM International. ASTM C31/C31M-24: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2024.
- [27] ASTM International. ASTM C42/C42M-20: Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
- [28] ASTM International. ASTM C805/C805M-19: Standard test method for rebound number of hardened concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2019.
- [29] ASTM International. ASTM C900-25: Standard test method for pullout strength of hardened concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2025.
- [30] ASTM International. ASTM C597-22: Standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.
- [31] ASTM International. ASTM C803/C803M-23: Standard test method for penetration resistance of hardened concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2023.
- [32] Pinto RCA, Hover KC. Application of maturity approach to setting times. *ACI Mater J*. 1999; 96(6): 686-691. **doi: 10.14359/795**
- [33] Hansen PF, Pedersen EJ. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. *Nordiska Betongfoerbundet*. 1977; 1: 19-34.
- [34] Carino NJ. The maturity method: theory and application. *Cement, Concrete, and Aggregates*. 1984; 6(2): 61-73. **doi: 10.1520/CCA10358J**

- [35] Nixon J. Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength in Field Applications. Master's thesis. Auburn (AL): Auburn University. 2006.
- [36] Demir T, Alyamaç KE. Development of numerical models to predict the compressive strength of high strength concretes based on maturity method. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2025; 37(1): 49-60. **doi: 10.35234/fumbd.1464418**
- [37] Kjellsen KO, Detwiler RJ. Later-age strength prediction by a modified maturity model. *ACI Mater J*. 1993; 90(3): 220-227.