

تخمین مقاومت فشاری در جای بتن بر اساس ضریب بلوغ به دست آمده از دمای محیط

سید عباس حسینی *

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

ساسان معتقد

گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

امین مشهدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.

محمد صادق شهیدزاده

استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.

چکیده

ارزیابی غیرمخرب خواص بتن در روزهای اولیه ساخت، برای اطمینان از کسب مقاومت کافی جهت تداوم فرایند اجرا، امری حیاتی است. روش بلوغ به عنوان ابزاری مؤثر برای تخمین مقاومت فشاری بر پایه دمای هیدراسیون بتن شناخته می‌شود؛ با این حال، نیاز این روش به اندازه‌گیری تاریخچه دمای درون بتن با استفاده از تجهیزات ابزار دقیق، چالشی عملی در محل پروژه ایجاد می‌کند. این پژوهش با هدف ارائه یک روش تقریبی و کاربردی‌تر برای سایت، به بررسی امکان جایگزینی تاریخچه دمای محیط به جای دمای درون بتن در مدل بلوغ پرداخته است. بدین منظور، نتایج حاصل از روش استاندارد بلوغ و روش پیشنهادی مبتنی بر دمای محیط، با یکدیگر مقایسه شدند. ارزیابی‌ها بر روی بتن در سنین کمتر از ۲۸ روز و در دو شرایط محیطی متفاوت (فصل گرم و سرد) انجام پذیرفت. یافته‌های کمی تحقیق نشان داد که حداکثر اختلاف نسبی تخمین مقاومت در روش جدید، در دوره گرم سال، ۵ درصد و در دوره سرد سال، ۱۰ درصد می‌باشد. با توجه به این مقادیر خطای محدود، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از دمای محیط به عنوان داده ورودی، روش بلوغ را به یک راهکار عملی و مقرون به صرفه برای تخمین مقاومت اولیه بتن در سایت تبدیل می‌کند و وابستگی به سخت افزارهای پیچیده را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بلوغ بتن، مقاومت درجا، مقاومت فشاری، دمای محیط، آزمایش غیر مخرب.

* نویسنده مسئول: a.hosseini@yu.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های بتن مسلح در طی دوره ساخت نیاز به مراقب تا رسیدن به مقاومت مطلوب دارند. به دلیل اهمیت زمان و برنامه‌ریزی برای کمینه کردن هزینه‌ها، داشتن اطلاعات کافی از روند کسب مقاومت بتن جهت انجام قالب برداری و ادامه فرایند ساخت از اهمیت زیادی برخوردار است. ارزیابی مقاومت، معمولاً از طریق نمونه‌برداری از بتن در حین بتن ریزی و یا انجام آزمایشات غیرمخرب صورت می‌گیرد [۱، ۲]. نمونه‌های برداشته شده از سازه‌ها که در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده‌اند، به عنوان اولین گزینه جهت اطمینان از طی شدن روند کسب مقاومت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. متفاوت بودن شرایط نگهداری نمونه در آزمایشگاه و ساختگاه موجب ایجاد عدم قطعیت در ارزیابی‌ها خواهد شد [۳]. نیاز به تخمین مقاومت بتن، موجب پیشنهاد روش‌های غیر مخربی شده است [۴]. یکی از این روش‌ها که مبتنی بر اندازه‌گیری تاریخچه‌ی دمای بتن است، تحت عنوان روش بلوغ بتن^۱ شناخته می‌شود [۵]. فلسفه‌ی این روش، ایجاد ارتباط بین دمای گیرش و روند کسب مقاومت بتن است [۶]. در این روش، یک طرح اختلاط از بتنی که قرار است مورد استفاده قرار بگیرد از قبل در آزمایشگاه در سنین مختلف مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و همزمان تاریخچه دمای آن ثبت می‌شود. با ایجاد ارتباط بین مقدار تجمعی تاریخچه‌ی دما و مقاومت فشاری، رابطه‌ای برای آن طرح به دست می‌آید که با داشتن تاریخچه‌ی دمای هر قطعه‌ی بتنی که از آن طرح مخلوط استفاده کرده باشد می‌توان مقاومت فشاری را تخمین زد [۷].

مقایسه نتایج آزمایشات مخرب با این روش نشان داده است که نتایج این روش مقداری متفاوت از مقدار واقعی بوده است [۸، ۹]. مهمترین دلیل این امر متفاوت بودن شرایط دمایی و رطوبت در ساختگاه و آزمایشگاه گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. به عنوان نمونه، تکرله و همکاران گزارش کرده‌اند که در شرایط آب و هوایی سرد این روش ممکن است مقاومت بتن را تا ۱۰ درصد بیش از حد واقعی تخمین بزند [۱۲].

علاوه بر اینکه گیرش سیمان موجب ایجاد دما می‌شود، دمای محیطی هم می‌تواند بر شرایط هیدراتاسیون اثرگذار باشد؛ به‌طوری

که علاوه بر خواص شیمیایی سیمان و نسبت آب به سیمان، دما یک شاخص مهم در روند هیدراتاسیون سیمان است [۱۳]. مطالعات نشان داده است که دمای بالای عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت در سنین پایین و در ادامه، موجب اثرات مخرب در طولانی مدت می‌شود [۱۴]. دمای بالای عمل‌آوری اثرات مخرب بر نفوذپذیری بتن نیز دارد [۱۵].

ساتسوس و همکاران گزارش کرده‌اند که وقتی که دمای عمل‌آوری بالا باشد، تابع بلوغ، مقدار پایین‌تری برای مقاومت فشاری در سنین پایین ارائه می‌دهد و در سنین بالاتر مقدار مقاومت فشاری تخمین زده شده، بالاتر از مقدار واقعی خواهد بود [۱۶]. عدل الجواد و همکاران برای بهبود اثر دمای محیط بر پیش‌بینی مقاومت در روش بلوغ در سنین بالا روابطی را ارائه کرده‌اند [۱۷]. والپارچ و همکاران گزارش کرده‌اند که در صورت استفاده از مواد مضاف در بتن مانند سرباره کوره آهن‌گدازی، اثرات دمای محیط می‌تواند باعث ایجاد عدم قطعیت بیشتر در روش بلوغ بشود [۱۸].

در بسیاری از ساختگاه‌ها، به دلیل نیاز به ابزار دقیق اندازه‌گیری دما که درون قطعه بتن قرار گرفته باشند، رصد تاریخچه دمای با چالش‌هایی مواجه است. هرچند استفاده از سنسورها و پیزوالکتریک‌ها جهت برداشت تاریخچه دمای بتن در برخی کشورهای توسعه یافته در حال گسترش می‌باشد اما در کشور ما استفاده از ابزار دقیق در سازه‌های بتن مسلح مرسوم نیست. با توجه به کمبود وسایل اندازه‌گیری درون بتن، در این پژوهش، امکان استفاده از دمای محیطی در مفهوم بلوغ بتن برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور تابع بلوغ بتن در آزمایشگاه به دست آمده و بر اساس این تابع مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در ساختگاه تخمین زده می‌شود. نتایج این تخمین با مقادیر واقعی مقاومت فشاری به دست آمده از ساختگاه مقایسه گردیده است.

۲- مفهوم بلوغ بتن

در مفهوم بلوغ بتن، بین دمای ایجاد شده ناشی از هیدراتاسیون سیمان و مقاومت فشاری بتن از طریق روابط تجربی ارتباط ایجاد می‌گردد. رویکردهای مختلفی برای ایجاد این ارتباط وجود دارد

¹ Concrete maturity

طرح یکسان در شرایط محیطی متفاوت یکسان باشد، انتظار می‌رود که مقاومت فشاری آنها نیز برابر باشد. روش فوق به عنوان یکی از روش‌های اصلی محاسبه مقاومت فشاری در جای بتن در استاندارد ASTM C1074 معرفی گردیده است [۲۱]. در این استاندارد از طرح اختلاط مورد نظر با قرار دادن سنسورهای دمایی، رابطه‌ی (۱) در سنین مختلف (t) محاسبه شده و در عین حال مقاومت فشاری در سن مورد نظر نیز اندازه‌گیری می‌شود. با رسم نمودار (درونیایی) مقادیر ضریب بلوغ و مقاومت فشاری متناظر آنها نمودار تعیین مقاومت فشاری بر اساس ضریب بلوغ بتن به دست می‌آید.

۳- مواد و روش‌ها

برای ارزیابی شاخص بلوغ بتن بر مبنای دمای محیط، از اطلاعات مربوط به یک کارگاه ساخت در شهر گچساران در طی دو دوره تابستان و زمستان استفاده شده است. انتخاب این دوره‌ها به منظور در نظر گرفتن شرایط محیطی با دمای بالا و با دمای پایین بوده است. از طرح مخلوط مورد استفاده در این کارگاه، جهت ساخت نمونه‌های استفاده شده در آزمایشگاه استفاده گردیده است. یک سری نمونه در آزمایشگاه و تحت شرایط استاندارد به همراه سنسور اندازه‌گیری دما ساخته شد و سری دیگر در شرایط دمایی کارگاه نگهداری شده است. نمونه‌ها جهت ارزیابی مقاومت فشاری و محاسبه شاخص بلوغ در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، نمودار بلوغ بر اساس دمای ثبت شده در شرایط استاندارد به دست آمده است. مقاومت‌های فشاری پیش‌بینی شده بر اساس نمودار دما-زمان به دست آمده در آزمایشگاه با مقادیر واقعی مقایسه گردیده است.

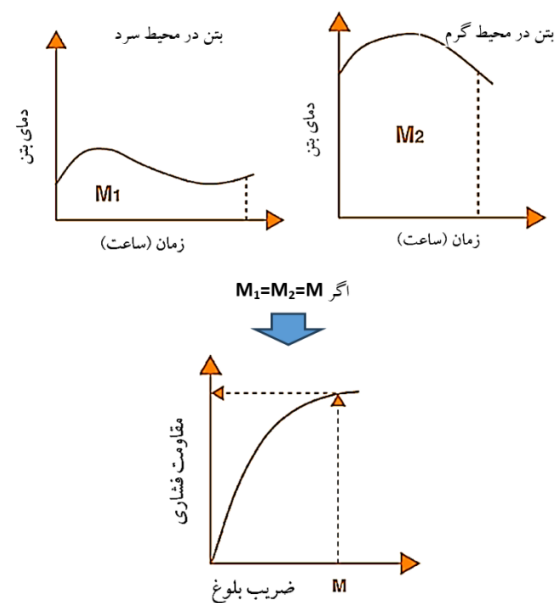
۳-۱- مشخصات مصالح و شرایط محیطی

طرح اختلاط استفاده شده در کارگاه ساخت شهر گچساران دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۲۵ مگاپاسکال و اسلامپ ۱۴ سانتیمتر بوده است. نسبت آب به سیمان (W/C) برابر با ۰/۴۷، عیار سیمان طرح ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. در این طرح از ۱۱۵۰ کیلوگرم در مترمکعب ماسه شسته با با وزن مخصوص ظاهری خشک ۲/۷۴ و

که شامل ضریب دما- زمان، سن معادل و دیگر معادلات اصلاح شده است [۱۹]. اساس این روش‌ها مبتنی بر ثبت تاریخچه دمای بتن است که می‌تواند به صورت پیوسته یا در بازه‌های زمانی مشخص انجام گیرد. روش بلوغ، اولین بار با رویکرد ضریب دما-زمان (TTF^۱) با عنوان تابع نرس-سائول به صورت زیر ارائه گردید [۲۰]:

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (۱)$$

در این رابطه، $M(t)$ ضریب بلوغ یا ضریب دما-زمان، Δt بازه زمانی بر حسب ساعت یا روز، T میانگین دمای بتن در بازه زمانی Δt بر حسب سلسیوس و T_0 دمای مبنا است. دمای مبنا بیانگر دمایی است که در آن هیدراسیون سیمان متوقف می‌شود. بر اساس مفهوم بلوغ بتن، وقتی دو نمونه بتن که دارای طرح مخلوط یکسانی هستند اگر دارای ضریب بلوغ یکسانی باشند، مقاومت فشاری آنها نیز با هم برابر خواهد بود. به تعبیر دیگر، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.



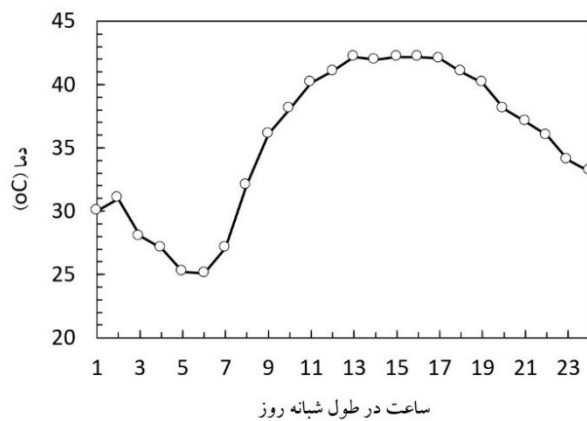
شکل ۱- محاسبه مقاومت فشاری بتن بر اساس ضریب بلوغ (M) علی رغم متفاوت بودن تاریخچه دمایی دو نمونه بتن

با در نظر گرفتن $T_0=0$ در رابطه‌ی (۱)، مساحت زیر نمودار دما- زمان تا لحظه‌ی t بیانگر شاخص بلوغ در آن زمان خواهد بود. بر اساس مفهوم بلوغ بتن، اگر مساحت زیر نمودار دما- زمان دو بتن با

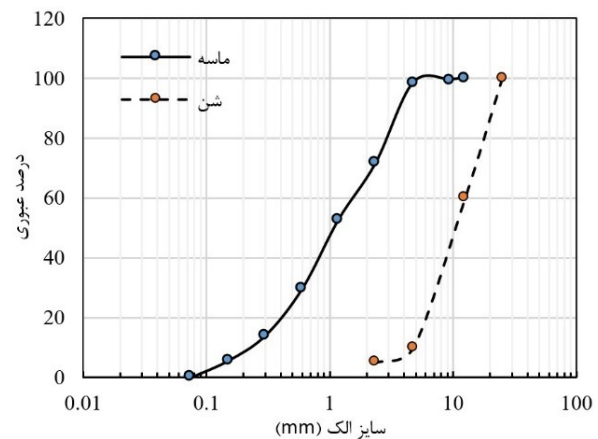
¹ temperature-time factor

دوره گرم از تاریخ ۲۴ مرداد تا ۲۰ شهریور سال ۱۴۰۲ و دوره سرد از تاریخ ۲۲ دیماه تا ۱۹ بهمن ماه ۱۴۰۲ بوده است. این دوره‌ها از زمان بتن ریزی تا گذشت ۲۸ روز از زمان بتن ریزی در کارگاه انتخاب شده‌اند. دما به صورت ساعتی در طی این دوره‌ها اندازه‌گیری شده است. در شکل ۳، تاریخچه دمایی در طول یک روز (در دوره گرم) و در شکل‌های ۴ و ۵ کل تاریخچه دمایی این دو دوره نشان داده شده است. بر اساس شکل‌های ۴ و ۵، میانگین دمای دوره گرم و سرد به ترتیب برابر با ۳۳/۹ و ۱۰/۹ درجه سلسیوس بوده است.

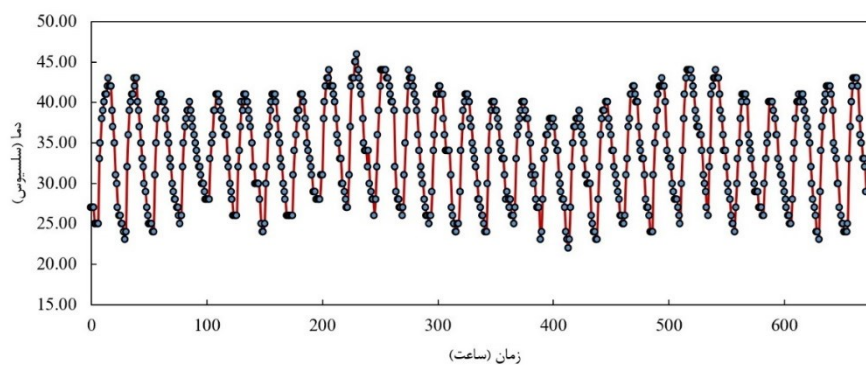
درصد جذب آب ۲/۸۲ استفاده شده است. برای درشت دانه از شن شکسته کارخانه‌ای از نوع دولومیتی با وزن مخصوص اشباع ۲/۶۶ و درصد جذب آب ۲/۳۱ استفاده گردید. مقدار شن در هر مترمکعب بتن برابر با ۷۰۰ کیلوگرم بوده است. دانه بندی شن و ماسه در شکل ۲ نشان داده شده است. آب مورد استفاده آب شرب شهر گچساران و سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان بهبهان مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی از دو بازه زمانی که شامل دوره گرم و سرد در حین بتن ریزی انجام گرفته در سایت بوده است استفاده گردید.



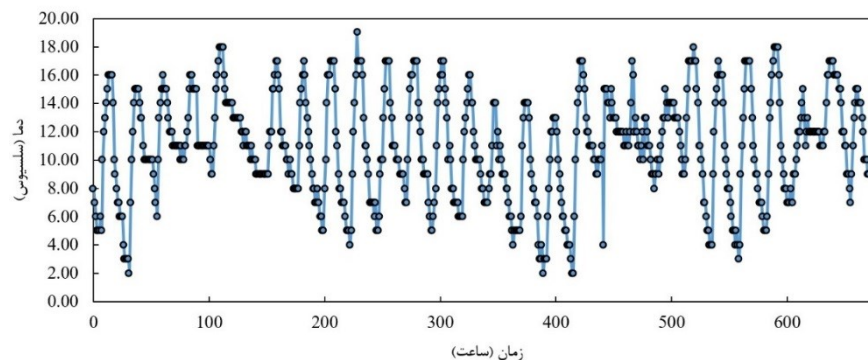
شکل ۳- تاریخچه میانگین دمای ساعتی در طول یک روز (دوره گرم)



شکل ۲- دانه بندی شن و ماسه استفاده شده در طرح



شکل ۴- دمای ثبت شده ساعتی در طی ۲۸ روز در طی دوره گرم در کارگاه ساخت، میانگین ۳۳/۹ درجه سلسیوس (۲۴ مرداد ماه تا ۲۰ شهریور ۱۴۰۲).



شکل ۵- دمای ثبت شده ساعتی در طی ۲۸ روز در طی دوره سرد در کارگاه ساخت، میانگین ۱۰/۹ درجه سلسیوس (۲۲ دیماه تا ۱۹ بهمن ۱۴۰۲).

۴- نتایج و تحلیل

دوره سرد افزایش یافته است. مقاومت فشاری در طول دوره سرد به مراتب کمتر از شرایط آزمایشگاهی بوده است به طوریکه نسبت مقاومت فشاری از ۰/۶۰ در سن یک روزه به ۰/۸۰ در سن ۲۸ روز رسیده است. بر اساس نتایج ارائه شده، در این ساختمان تاثیر پذیری مقاومت فشاری در دوره سرد بیشتر از دوره گرم بوده است.

جدول ۱- ضریب بلوغ و مقاومت فشاری نمونه‌ها در دوره گرم

روز	ضریب بلوغ M ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	مقاومت فشاری (MPa)	ساختمان	آزمایشگاه
۱	۸۶۸	۷۵۲	۵/۳۱	۴/۲۴
۳	۲۴۱۶	۱۸۶۰	۱۱/۸۷	۹/۸۶
۷	۵۶۴۹	۴۱۷۴	۱۷/۴۲	۱۷/۳۰
۱۴	۱۱۵۱۷	۸۲۲۴	۲۱/۷۹	۲۰/۸۰
۲۸	۲۲۷۸۴	۱۶۳۲۶	۳۵/۷۲	۳۱/۶۲

جدول ۲- ضریب بلوغ و مقاومت فشاری نمونه‌ها در دوره سرد

روز	ضریب بلوغ M ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)	مقاومت فشاری (MPa)	ساختمان	آزمایشگاه
۱	۲۲۸	۶۸۰	۳/۴۲	۵/۷۰
۳	۷۳۱	۱۸۰۷	۷/۱۲	۱۰/۱۷
۷	۱۹۱۳	۴۰۶۳	۱۰/۳۱	۱۸/۵۳
۱۴	۳۷۲۹	۸۰۱۱	۱۶/۷۸	۲۰/۷۳
۲۸	۷۳۵۷	۱۵۹۰۷	۲۱/۹۲	۲۷/۹۰

در هر دو دوره، تفاوت ضریب بلوغ آزمایشگاه و ساختمان نشان از تاثیر گذاری دمای محیط بر ضریب بلوغ بتن بوده است. حال باید بر اساس داده‌های محیطی ارتباطی بین دمای محیط و کسب مقاومت بتن ارائه گردد. قبل از آن، رابطه‌ی بلوغ بتن به صورت استاندارد محاسبه می‌گردد.

بر اساس مقادیر مقاومت فشاری و ضریب M آزمایشگاهی، نمودار بلوغ بتن به صورت استاندارد در شکل‌های ۶ و ۷ ترسیم شده است. در این شکل‌ها، نمودار درجه ۲ به مقادیر مقاومت فشاری و ضریب بلوغ برآورده شده و رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و ضریب بلوغ بتن در دوره‌های گرم و سرد ارائه شده است. این روابط برای دوره‌های گرم و سرد به ترتیب در روابط (۲) و (۳) به صورت زیر به دست آمده اند:

برای دوره‌های گرم و سرد سال، مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در کارگاه و همچنین نمونه‌های نگهداری شده در شرایط دمای محیطی در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز با استفاده از دستگاه جک بتن شکن اندازه گیری شد. با استفاده از رابطه‌ی (۱) و با در نظر گرفتن بازه زمانی یک ساعته ($\Delta t=1$) و تاریخچه‌ی دمایی نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵ در هر زمان، مقدار ضریب بلوغ برای شرایط کارگاهی محاسبه گردید (M_{field}). برای شرایط آزمایشگاهی نیز با استفاده از تاریخچه دمایی ثبت شده در وسط نمونه‌های مستغرق در حوضچه نگهداری نمونه‌ها (با دمای ثابت ۲۳ درجه سلسیوس)، ضریب $M(t)$ در هر ساعت محاسبه گردید (M_{Lab}). مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در آزمایشگاه و در کارگاه ساخت به ترتیب با $f_{c-field}$ و f_{c-Lab} نامگذاری گردیده‌اند.

در جدول‌های ۱ و ۲ مقادیر ضریب بلوغ برای شرایط ساختمان و آزمایشگاه به همراه مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز برای دوره گرم و سرد سال آورده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در دوره گرم مشخص است که ضریب بلوغ در همه زمان‌ها در ساختمان بیشتر از آزمایشگاه بوده است به طوری که اثرات دمای بالاتر محیط باعث شده که مقدار نسبت این ضریب در ساختمان به آزمایشگاه از ۱/۱۵ در سن یک روز به ۱/۴۰ در سن ۲۸ روز افزایش یابد. مقاومت فشاری در این دوره نیز نسبت به محیط آزمایشگاه بیشتر بوده است.

تفاوت مقاومت فشاری در سنین پایین بیشتر بوده است به طوریکه نسبت مقاومت فشاری در ساختمان به آزمایشگاه در سنین ۱ و ۳ به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۲۰ بوده در حالی که این نسبت در سنین ۱۴ و ۲۸ به ۱/۰۵ و ۱/۱۳ رسیده است. در این دوره دمای بالاتر ساختمان تاثیر مثبتی در کسب مقاومت بتن داشته است. دلیل نوسان نسبت مقاومت‌ها را می‌توان تا حدودی به اثرات رطوبت محیطی نسبت داد.

در دوره سرد، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، در زمان یکسان بر خلاف دوره گرم، به دلیل کمتر بودن دمای محیط نسبت به دمای آزمایشگاه، ضریب بلوغ در آزمایشگاه بیشتر از ساختمان بوده است. نسبت ضریب بلوغ در ساختمان نسبت به آزمایشگاه از ۰/۳۴ در سن یک روز به ۰/۴۷ در سن ۲۸ روز در

۷ به ترتیب ۵ درصد کمتر و ۶ درصد بیشتر از مقادیر ساختگاه بوده است که بیانگر مقداری قابل قبول برای ارزیابی مقاومت فشاری است. نسبت به دست آمده برای سن ۲۸ روز ۰/۸۷ بوده است که این عدد نمی تواند مورد استناد قرار گیرد چون عدد بلوغ بتن در سن ۲۸ روز در دوره گرم با عدد ۲۲۷۸۴ ساعت-سانتیگراد خارج از محدوده مقادیر آزمایشگاهی بوده است؛ بنابراین مقدار تخمین زده شده در محدوده برونیابی رابطه‌ی (۲) قرار داشته و موجب ایجاد خطا برای این سن شده است.

جدول ۳- مقاومت فشاری پیش بینی شده بر اساس روش بلوغ و نسبت مقاومت‌ها (دوره گرم)

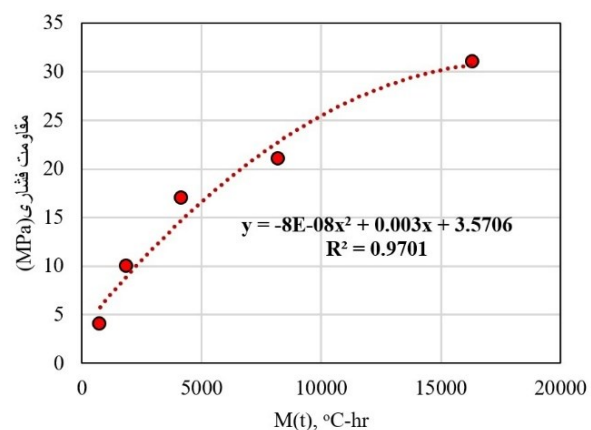
روز	f_{c-Pred} (MPa)	$\frac{f_{c-Pred}}{f_{c-field}}$	$\frac{M_{field}}{M_{Lab}}$	$\frac{f_{c-field}}{f_{c-Lab}}$
۱	۶/۱	۱/۲۲	۱/۱۵	۱/۲۵
۳	۱۱/۴	۰/۹۵	۱/۳۰	۱/۲۰
۷	۱۸/۰	۱/۰۶	۱/۳۵	۱/۰۱
۱۴	۲۷/۵	۱/۲۵	۱/۴۰	۱/۰۵
۲۸	۳۰/۴	۰/۸۷	۱/۴۰	۱/۱۳

همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است در دوره سرد، نسبت مقاومت تخمین زده شده از رابطه بلوغ با مقادیر به دست آمده در ساختگاه در سن یک روز دارای تفاوت زیادی ولی در دیگر سنین این مقادیر به هم نزدیک شده‌اند. در سن ۵ و ۷ روز که سنین مهمی جهت ارزیابی قالب برداری هستند مقادیر به دست آمده از تاریخچه دمایی بسیار نزدیک به مقادیر ساختگاه هستند به طوریکه در این سنین، حداکثر ۱۰ درصد تفاوت در مقدار مقاومت فشاری مشاهده گردیده است که این تفاوت به دلیل اینکه در جهت کمتر می باشد موجب برداشت محافظه کارانه تر و به تبع آن ایجاد اطمینان خواهد گردید. در مقایسه با دوره گرم مشخص است که مقادیر به جز برای روز اول، همه در جهت اطمینان هستند درحالی که در دوره گرم مقادیر پیش‌بینی شده برای برخی روزها بالاتر از مقادیر ساختگاه بوده است. تحلیل این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که تأخیر گرمایی بین دمای محیط و دمای هسته بتن، به‌ویژه در دوره گرم که گرادیان دمایی بزرگ‌تر است، دلیل اصلی بروز خطاهای بزرگ‌تر است. در دوره سرد، هم‌دمای بودن نسبی محیط و بتن سبب می‌شود تاریخچه دمای محیط بتواند به‌عنوان نماینده مناسبی برای بلوغ بتن عمل کند.

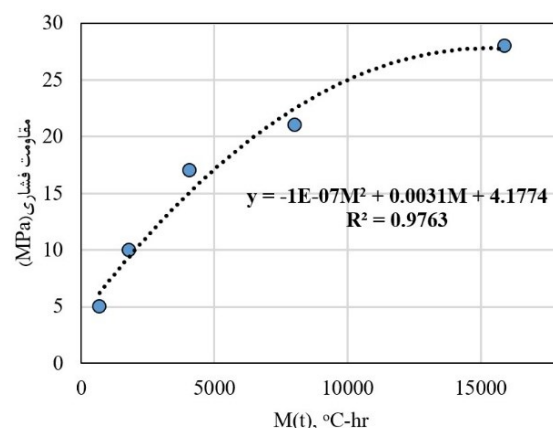
$$f_c = -8 \times 10^{-8} M^2 + 0.003M + 3.57 \quad (2)$$

$$f_c = -1 \times 10^{-7} M^2 + 0.0031M + 4.177 \quad (3)$$

در این روابط، M ضریب بلوغ بر حسب درجه سلسیوس-ساعت و f_c مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس توصیه‌ی استاندارد باید ضریب M برای بتن ساختگاه محاسبه شده و با استفاده از این نمودار مقاومت فشاری تخمین زده شود. مقادیر تخمین زده شده مقاومت فشاری بر اساس ضرایب M ساختگاهی ارائه شده در جدول ۲ محاسبه گردید و در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودار نسبت‌های مقاومت فشاری به دست آمده در آزمایشگاه، ساختگاه و مقاومت فشاری به دست آمده از روش بلوغ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار و رابطه‌ی بین ضریب M و مقاومت فشاری (دوره گرم)



شکل ۷- نمودار و رابطه‌ی بین ضریب M و مقاومت فشاری (دوره سرد)

بر اساس مقادیر مقاومت فشاری تخمین زده شده برای دوره گرم که در جدول ۳ ارائه شده مقاومت فشاری تخمینی در روزهای ۳ و

فشاری درجا انجام شد. بر پایه داده‌های تجربی گردآوری شده در دو فصل گرم و سرد، و ارزیابی مقاومت فشاری بر اساس دمای محیط، نتایج زیر به دست آمد:

۱. در مناطق با آب و هوای سرد یا در فصول سرد سال، روش بلوغ مبتنی بر دمای محیط با اطمینان بیشتری قابل استفاده است؛ زیرا خطای آن در جهت ایمن (کمتر از واقع) قرار دارد و نیاز به ضریب اطمینان اضافی را کاهش می‌دهد. مقدار این خطا در سن ۷ روز جهت قالب برداری ۱۰ درصد به دست آمده است.

۲. در شرایط گرم، استفاده از روش مبتنی بر دمای محیط تنها برای سنین اولیه (حداکثر تا ۷ روز) توصیه می‌شود؛ زیرا در این بازه خطا قابل قبول است. برای سنین بالاتر، باید از یک ضریب تصحیح مبتنی بر داده‌های محلی یا اندازه‌گیری مستقیم دمای درون بتن استفاده کرد.

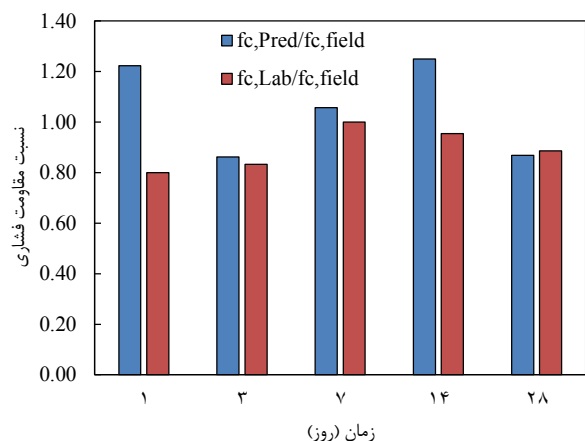
۳. با توجه به دقت قابل قبول روش در سنین ۵ و ۷ روز، می‌توان از آن به عنوان ابزار سریع و کم‌هزینه برای نظارت بر کسب مقاومت اولیه و تصمیم‌گیری درباره زمان قالب‌برداری بهره برد. در مجموع، روش پیشنهادی با حذف نیاز به حسگرهای درون‌بتنی، راهکار عملی و مقرون به صرفه‌ای برای تخمین مقاومت درجا ارائه می‌دهد، به شرطی که محدودیت‌های آن در شرایط گرم مورد توجه قرار گیرد. پژوهش‌های آتی می‌تواند بر توسعه مدل‌های اصلاح‌شده‌ای متمرکز شود که تأخیر گرمایی را به صراحت در نظر می‌گیرند و دقت پیش‌بینی را در تمامی سنین و شرایط آب‌وهوایی بهبود می‌بخشند.

۶- مراجع

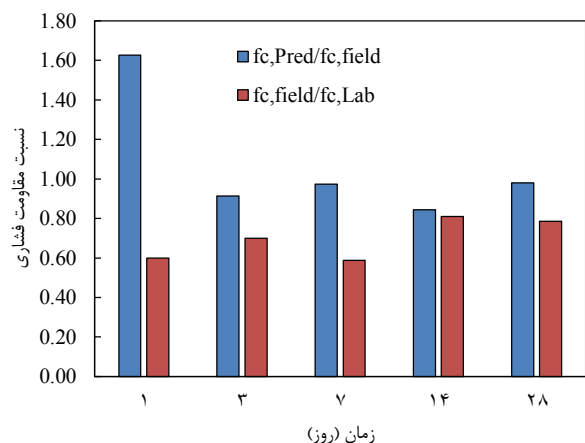
- [1] H. Araghi, R. Madandoust, M. Effati, Evaluation of Concrete Compressive Strength by Integrating Non-Destructive Methods and Image Processing, Concrete Research, 18(2) (2025) 43-57.
- [2] A.M. Rajabi, M. Zarrine Zadeh, S. Ghorashi, Evaluation of Concrete Strength Parameters with Variations in Aggregate Gradation, with Emphasis on Non-Destructive Methods, Concrete Research, (2026) -.
- [3] B. Sun, T. Noguchi, G. Cai, Q. Chen, Prediction of early compressive strength of mortars at different curing temperature and relative humidity by a modified maturity method, Structural Concrete, 22 (2021) E732-E744.

جدول ۴- مقاومت فشاری پیش‌بینی شده بر اساس روش بلوغ و نسبت مقاومت‌ها (دوره سرد)

روز	f_{c-Pred} (MPa)	$\frac{f_{c-Pred}}{f_{c-field}}$	$\frac{M_{field}}{M_{Lab}}$	$\frac{f_{c-field}}{f_{c-Lab}}$
۱	۴/۹	۱/۶۳	۰/۳۴	۰/۶۰
۳	۶/۴	۰/۹۰	۰/۴۰	۰/۷۰
۷	۹/۷	۰/۹۷	۰/۴۷	۰/۶۰
۱۴	۱۴/۳	۰/۸۴	۰/۴۷	۰/۸۱
۲۸	۲۱/۶	۰/۹۸	۰/۴۶	۰/۸۰



شکل ۸- نسبت مقاومت‌های تخمین زده شده، ساختگاه و آزمایشگاه (دوره سرد)



شکل ۹- نسبت مقاومت‌های تخمین زده شده، ساختگاه و آزمایشگاه (دوره سرد)

۵- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی امکان جایگزینی تاریخچه دمای محیط به جای دمای درون بتن در روش بلوغ برای تخمین مقاومت

- [16] M. Soutsos, A. Hatzitheodorou, F. Kanavaris, J. Kwasny, Effect of temperature on the strength development of mortar mixes with GGBS and fly ash, *Magazine of Concrete Research*, 69(15) (2017) 787-801.
- [17] Y.A. Abdel-Jawad, The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages, *Construction and building materials*, 20(10) (2006) 893-900.
- [18] A. Vollpracht, M. Soutsos, F. Kanavaris, Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function—A critical review, *Construction and Building Materials*, 162 (2018) 830-846.
- [19] D. Miller, N.-M. Ho, N. Talebian, Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method—An overview, in: *Structures*, Elsevier, 2022, pp. 1081-1104.
- [20] A. Saul, Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, *Magazine of Concrete Research*, 2(6) (1951) 127-140.
- [21] ASTM, ASTM c1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, in, ASTM International, 2021.
- [4] A. Dinesh, B.R. Prasad, Predictive models in machine learning for strength and life cycle assessment of concrete structures, *Automation in Construction*, 162 (2024) 105412.
- [5] G. Kampli, S. Chickerur, M. Chitawadagi, Real-time in-situ strength monitoring of concrete using maturity method of strength prediction via IoT, *Materials Today: Proceedings*, 88 (2023) 110-118.
- [6] M. Benaicha, Y. Burtschell, A.H. Alaoui, Prediction of compressive strength at early age of concrete—Application of maturity, *Journal of building engineering*, 6 (2016) 119-125.
- [7] S. Kazemifard, S. Motaghd, N. Eftekhari, NDT prediction of self-compacting concrete strength based on maturity method, *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 7(2) (2024) 1031-1043.
- [8] Z. Mi, Y. Hu, Q. Li, X. Gao, T. Yin, Maturity model for fracture properties of concrete considering coupling effect of curing temperature and humidity, *Construction and Building Materials*, 196 (2019) 1-13.
- [9] C. Vázquez-Herrero, I. Martínez-Lage, F. Sánchez-Tembleque, A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 393-398.
- [10] Z. Mi, B. Zheng, X. Fan, Y. Wang, Influence of ambient temperature and humidity on the evolution of the tension softening behavior in concrete, *Construction and Building Materials*, 456 (2024) 139242.
- [11] J. Wang, H. Li, C. Ma, C. Cai, J. Wang, Effect of surface curing condition on the humidity field and moisture transfer in concrete, *Construction and Building Materials*, 411 (2024) 134701.
- [12] B.H. Tekle, S. Al-Deen, M. Anwar-U-Saadat, N. Willans, Y. Zhang, C.K. Lee, Use of maturity method to estimate early age compressive strength of slab in cold weather, *Structural Concrete*, 23(2) (2022) 1176-1190.
- [13] B. Sun, T. Noguchi, G. Cai, W. Zhao, Effect of temperature and relative humidity on the development of the compressive strength of surface-layer cement mortar, *Construction and Building Materials*, 281 (2021) 122626.
- [14] C. Lee, S. Lee, N. Nguyen, Modeling of compressive strength development of high-early-strength-concrete at different curing temperatures, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(2) (2016) 205-219.
- [15] B. Liu, G. Luo, Y. Xie, Effect of curing conditions on the permeability of concrete with high volume mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 359-371.

Estimation of in-situ compressive strength of concrete based on the maturity coefficient and ambient temperature

Seyed Abbas Hosseini *

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Sasan Mitaghd

Associate Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil engineering and architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Amin Mashhadi

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Mohammad Sadegh Shahidzadeh

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Abstract

Non-destructive evaluation of concrete properties at early ages is critical to ensure adequate strength development for the continuation of construction activities. The maturity method is widely recognized as an effective tool for estimating compressive strength based on the temperature history of concrete hydration; however, its reliance on measuring in-situ concrete temperature using embedded instrumentation poses practical challenges on construction sites. This study aims to propose a simplified and more practical site-oriented approach by investigating the feasibility of substituting ambient temperature history for in-concrete temperature data in the maturity model. To this end, strength predictions obtained from the conventional maturity method were compared with those derived from the proposed ambient-temperature-based approach. Evaluations were conducted on concrete specimens at ages less than 28 days under two distinct environmental conditions, corresponding to hot and cold seasons. Quantitative results indicate that the maximum relative error in strength estimation using the proposed method was limited to 5% during the hot season and 10% during the cold season. Considering these relatively small deviations, it can be concluded that employing ambient temperature as the input parameter transforms the maturity method into a practical and cost-effective solution for estimating early-age concrete strength on site, while significantly reducing dependence on complex instrumentation.

Keywords: Concrete maturity, in-situ strength, compressive strength, ambient temperature, non-destructive test.

* Corresponding Author: a.hosseini@yu.ac.ir

