Journal of Structural and Construction Engineering, 8(11), 2022, pp. 278-291

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigating the Effects of Liquid Nitrogen on Concrete Properties in Hot Weather Concreting

Ali Gholipur Azim[1], Hasan Afshin[2], Mohammad Charkhtab Basim[3]*

1- MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Sahand university of Technology, Tabriz, Iran
2 -Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand university of Technology, Tabriz, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand university of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Concrete structures are always affected by environmental conditions, and hot weather condition during mixing and casting impressively affect the performance of concrete. Concrete producers have been using different methods of reducing the temperature of concrete such as liquid nitrogen through direct injection of it into the drums of concrete trucks. Liquid nitrogen with having temperature of -196$^{\circ C}$ provide accurate temperature control and is not limited by the water-cement ratio as in the case of chilled water or ice. The purpose of this research was to investigate the effects of liquid nitrogen on concrete properties such as slump, setting time, compressive strength, tensile strength and flexural strength with two different curing methods. In this research, three mixtures were prepared: control, hot and LN-cooled. The temperature in control mixture was considered to be 27$^{\circ C}$. Hot mixture which was made from materials stored for 72 hours at the desired temperature (50$^{\circ C}$) to simulate hot weather condition, and the temperature in this mixture was obtained 40$^{\circ C}$. The process in preparation of the LN-cooled mixture was the same with the hot mixture with the difference that, the temperature of the LN-cooled mixture was lowered to the control mixture (27$^{\circ C}$). The results indicate that the liquid nitrogen improved the properties of concrete in hot weather and additionally the results show that the properties of concrete are relatively unaffected when cooled with liquid nitrogen to room temperature. Finally based on findings in this research, liquid nitrogen is an appropriate option in hot weather concreting.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 December 2020
Revise Date: 14 May 2021
Accept Date: 10 June 2021

Keywords:
Hot Weather
Concreting
Temperature
Concrete Properties
Liquid Nitrogen

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262434.2311

*Corresponding author: Mohammad Charkhtab Basim
Email address: basim@sut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی تأثیرات استفاده از نیتروژن مایع بر خواص بتن در بتن ریزی هوای گرم

علی قلی پور عظیم[۱]، حسن افشین[۲]، محمد چرختاب بسیم[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

چکیده

آب‌وهوای گرم در حین بتن‌ریزی تأثیرات نامطلوبی را بر خواص بتن می‌گذارد. ازاین‌رو، روش‌های مختلفی توسط تولیدکننده‌های بتن برای پایین آوردن دمای بتن استفاده می‌شود که استفاده از نیتروژن مایع یکی از روش‌های نوین برای این منظور می‌باشد. نیتروژن مایع با داشتن دمایی در حدود ۱۹۶- درجه سلسیوس قابلیت پایین آوردن دمای بتن به‌اندازه دلخواه را داشته و محدودیتی در مورد نسبت آب به سیمان ایجاد نمی‌کند. هدف این پژوهش بررسی تأثیرات استفاده از نیتروژن مایع بر خواص بتن از قبیل اسلامپ، زمان‌گیرش، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی طی دو نوع عمل‌آوری مختلف است. در این تحقیق سه نوع مخلوط تهیه‌شده است، به‌این‌ترتیب که مخلوط اول، مخلوط کنترل بوده و دما به هنگام تهیه آن $۲۷^{\circ}C$ به‌دست‌آمده است. مخلوط دوم، مخلوط گرم با دمای $۴۰^{\circ}C$ و مخلوط سوم، مخلوط گرمِ سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع می‌باشد که دمای آن از $۴۰^{\circ}C$ به دمای مخلوط کنترل ($۲۷^{\circ}C$) کاهش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیتروژن مایع توانسته مشخصات بتن در هوای گرم را بهبود ببخشد، به‌عنوان‌مثال در مورد زمان‌گیرش، نیتروژن مایع توانسته به ازای کاهش دما به میزان $۱۵^{\circ}C$، گیرش اولیه را به میزان ۱۷ درصد و گیرش نهایی را حدود ۱۱ درصد به تأخیر بیندازد و به‌تبع آن فرصت کافی برای انجام عملیات جایدهی، تراکم و پرداخت بتن را فراهم آورد. همچنین مقایسه بین دو مخلوط کنترل و گرمِ سرد شده حاکی از آن است که در اکثر موارد، تفاوت چشم‌گیری بین این دو مخلوط دیده نمی‌شود و نیتروژن مایع توانسته عملکرد قابل قبولی در بتن‌ریزی هوای گرم داشته باشد.

کلمات کلیدی: نیتروژن مایع، بتن‌ریزی، هوای گرم، خواص بتن، دما.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262434.2311	doi:
۱۳۹۹/۰۹/۲۷	۱۴۰۰/۰۲/۲۴	۱۴۰۰/۰۳/۲۰	۱۴۰۰/۰۳/۲۰	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	10.22065/jsce.2021.262434.2311	

*نویسنده مسئول: محمد چرختاب بسیم

پست الکترونیکی: basim@sut.ac.ir

۱- مقدمه

دمای زیاد باعث می‌شود آب موجود در بتن سریع‌تر تبخیر شده و سرعت واکنش هیدراتاسیون افزایش یابد. به‌تبع آن گیرش خمیر سیمان تسریع شده و کارایی بتن تازه با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و درنتیجه آن فرصت لازم برای حمل، جای‌دهی، تراکم و پرداخت بتن پس از اختلاط اولیه کاهش می‌یابد. تحقیقات زیادی در زمینه اثرات نامطلوب هوای گرم بر خواص بتن صورت گرفته که ازجمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات Vijaya Mohan Rao [۱] در سال 2016 اشاره کرد که در آن از تأثیرات نامطلوب هوای گرم بر خواص بتن به مواردی ازجمله افزایش نرخ زمان‌گیرش، افزایش نرخ افت اسلامپ، افزایش آب موردنیاز، افزایش احتمال ایجاد ترک‌های پلاستیک و افزایش احتمال ایجاد ترک‌های حرارتی اشاره شده است. همچنین او از تأثیرات هوای گرم بر خواص سخت‌شده بتن مواردی ازجمله کاهش مقاومت، کاهش دوام، عدم یکنواختی سطح ظاهری بتن، افزایش نفوذپذیری، کاهش مقاومت سایشی و افزایش احتمال ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی را بیان کرده است.

همواره روش‌های مختلفی برای پیشگیری از گرم شدن بتن به کار گرفته می‌شود که از جمله آنها می‌توان به مواردی ازجمله انتخاب مصالح مناسب برای هوای گرم، ایجاد سایه‌بان و نگهداری مصالح در انبارهای سرپوشیده، کاهش دمای ابزارها و تجهیزات با پاشیدن آب سرد بر روی آن‌ها، غرقاب کردن و آب‌پاشی توده دانه‌های سنگی انبارشده اشاره کرد؛ اما با توجه به نیاز مبرم خنک‌سازی بتن در اقلیم گرم و خشک، علاوه بر رعایت مواردِ جلوگیری از افزایش دمای بتن، می‌بایست از روش‌های خنک‌سازی بتن حین ساخت نیز استفاده نمود. یخ و آب سرد جزو روش‌های متداولی است که برای کاهش دمای بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما در مورد استفاده از هرکدام از این دو روش محدودیت‌هایی وجود دارد. به‌عنوان نمونه اگر چنانچه تمام آب مورداستفاده در طرح مخلوط با آب سرد جایگزین شود، در حالت ایده آل فقط می‌تواند ۲٫۷ درجه سانتی‌گراد دمای بتن را کاهش دهد. همچنین در مورد یخ نمی‌توان از توزیع یکنواخت آن در بتن اطمینان حاصل نمود و حداکثر کاهش دمایی که در این روش حاصل می‌شود، حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۲-۳].

مشکل مهم دیگری که در هوای گرم وجود دارد مربوط به بتن حجیم است که در آن گرمای آزادشده بیش‌ازاندازه ناشی از واکنش هیدراتاسیون منجر به ترک‌های حرارتی شده و کاهش دوام و مقاومت نهایی را در پی دارد. ازاین‌رو و با توجه به اینکه در خیلی از مواقع نیاز به پایین آوردن دمای بتن بیش از ۱۱ درجه سانتی‌گراد ضروری به نظر می‌رسد، استفاده از نیتروژن مایع بیش‌ازپیش احساس می‌شود [۴].

نیتروژن مایع با داشتن دمایی در حدود ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد قابلیت پایین آوردن دمای بتن به اندازه دلخواه را داشته بدون آنکه تغییراتی در نسبت آب به سیمان به وجود آورد که عملاً این کار در سایر روش‌ها خیلی مشکل به نظر می‌رسد. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های مورداستفاده در این روش به این شکل است که کامیون‌های بتن آماده زیر ستاپ طراحی‌شده قرار می‌گیرند و نیتروژن مایع به داخل میکسر تزریق می‌گردد. مطابق شکل ۱ در عرض چند ثانیه به دلیل تفاوت دمایی موجود، نیتروژن از حالت مایع به گاز تبدیل شده که گاز نیتروژن دارای پتانسیل سرمایی بسیار بالایی می‌باشد.

شکل ۱: تزریق مستقیم نیتروژن مایع داخل تراک میکسر [۳].

اولین بار محققین ژاپنی، در سال ۱۹۹۲ تحقیقاتی درباره تأثیر نیتروژن مایع بر رشد مقاومت بتن انجام دادند که نتایج آنان نشان می‌داد که نیتروژن مایع تأثیری در رشد مقاومت بتن نداشته است [۵]. John Hema [۶] در سال ۲۰۰۷ در قالب پایان‌نامه خود به بررسی تأثیرات نیتروژن مایع بر خواص بتن پرداخته است. نتایج تحقیق وی نشان می‌دهد که در اغلب موارد تفاوت چشمگیری بین مخلوط کنترل و مخلوط گرمِ سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع که دمای آن به دمای مخلوط کنترل تقلیل داده شده است، دیده نمی‌شود. همچنین Maria و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ تحقیقاتی در مورد تأثیر نیتروژن مایع بر مشخصات تازه بتن شامل اسلامپ و زمان‌گیرش را انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که رفتار گیرش نمونه‌ی گرمِ سرد شده مشابه گیرش نمونه‌ی کنترل می‌باشد. همچنین در مورد اسلامپ نتایج بیانگر این نکته بود که نیتروژن مایع نمی‌تواند کاهش اسلامپی که در هوای گرم اتفاق می‌افتاد را برطرف کند.

در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد که نیتروژن مایع چه تأثیری بر خواص تازه و سخت شده بتن دارد و در آخر سعی خواهد شد به این سؤال پاسخ داده شود که آیا نیتروژن مایع به‌عنوان یک روش قابل‌اتکا می‌تواند در بتن‌ریزی در هوای گرم مورد استفاده قرار گیرد یا خیر.

۲- روش تحقیق و مواد و مصالح مصرفی

۲-۱- مصالح مصرفی

کلیه مصالح مصرفی در تهیه‌ی بتن مورداستفاده در این تحقیق شامل شن نخودی، ماسه، سیمان، آب و نیتروژن مایع می‌باشند. ماسه مورداستفاده از ماسه شویی آناخاتون (اصلاح شده به‌وسیله عبور دادن از الک شماره ۴) تهیه گردیده است. درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک این ماسه به ترتیب برابر با ۱٫۱۴ و ۲٫۶۵ می‌باشد. همچنین از شن نخودی آناخاتون با درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک به ترتیب ۰٫۷۵ و ۲٫۶۳ استفاده شده است. آب استفاده‌شده در طرح مخلوط‌ها، آب شرب دانشگاه صنعتی سهند بوده و همچنین سیمان تیپ ۲ صوفیان با مشخصات مندرج در جداول ۱ و ۲ در پروژه مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی سیمان.

Character	Amount
Blaine fineness(cm^2/gr)	2860
Dilatation longitudinal	0.23
Initial Setting time(min)	80
Final Setting time(min)	275
3 Days Compressive Strength(kgf/cm^2)	179
7 Days Compressive strength(kgf/cm^2)	274
28 Days Compressive strength(kgf/cm^2)	370

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان.

Chemical Compounds	Percentage
SiO_2	21.91
Al_2O_3	4.85
Fe_2O_3	3.46
CaO	64.56
MgO	2.38
SO_3	1.71
Na_2O	0.34
K_2O	0.97
Free-Ca(CaO.f)	1.08
Loss on Ignition (LOI)	0.75
Insoluble Residue (I.R)	0.58
C_3S	49.50
C_2S	25.47
C_3A	7.00
C4AF	10.35

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پروژه به بررسی تأثیرات استفاده از نیتروژن مایع بر خواص بتن، اعم از خواص خمیری و سخت شده آن پرداخته شده است. برای این منظور سه نوع مخلوط تهیه گردیده است. مخلوط اول، مخلوط کنترل (Control) بوده و دما به هنگام تهیه آن $^{\circ C}$۲۷ به‌دست آمده است. مخلوط دوم، مخلوط گرم (Hot) بوده که در تهیه آن به‌منظور شبیه‌سازی شرایط هوای گرم، مصالح به مدت ۷۲ ساعت در اتاق کنترل با دمای $^{\circ C}$۵۰ قرار داده شده‌اند. دمای این مخلوط به هنگام تهیه آن $^{\circ C}$۴۰ به‌دست‌آمده است. مخلوط سوم، مخلوط گرمِ سرد شده (LN) به‌وسیله نیتروژن مایع است و روند تهیه آن دقیقاً مشابه مخلوط گرم بوده، با این تفاوت که دمای آن به دمای مخلوط کنترل ($^{\circ C}$۲۷) کاهش داده شده است. شایان‌ذکر است که بتن‌ریزی در محیط آزمایشگاه با دمای $^{\circ C}$۲۱ و رطوبت ۵۵ درصد انجام گرفته است.

۲-۳- طرح اختلاط

برای انتخاب طرح اختلاط نهایی برای انجام آزمایش‌های اصلی، از بین ۵ طرح اختلاط مختلف که مورد بررسی قرار گرفته بود، طرح اختلاط آورده شده در جدول ۳ انتخاب شده است. معیار انتخاب طرح اختلاط نهایی، مقاومت فشاری و اسلامپ بتن تازه بوده است.

جدول ۳ : طرح اختلاط نهایی.

Material	kg/m^3
Cement	360.9
Water	229.6
Coarse Aggregate	729.4
Fine Aggregate	1069.9

شایان ذکر است که به‌منظور مقایسه و یکسان در نظر گرفتن شرایط آزمایش‌ها، بتن‌ریزی در هر سه مورد (کنترل، گرم و گرمِ سرد شده) حالت اشباع با سطح خشک در نظر گرفته شده است. همچنین نحوه اختلاط با استناد به تحقیق انجام گرفته توسط Jhon Hema [۶] صورت پذیرفته است، به‌این‌ترتیب که بعدازاینکه مصالح داخل میکسر ریخته شدند، به مدت ۳ دقیقه اختلاط بتن انجام گرفته و بعد از ۳ دقیقه دمای بتن اندازه گرفته شده است. در مخلوط‌های کنترل و گرم اختلاط بدون توقف ادامه پیدا کرده است، اما در مورد مخلوط گرمِ سرد شده پس از اندازه‌گیری دما، نیتروژن مایع به داخل مخلوط تزریق شده تا دمای آن به دمای مخلوط کنترل برسد.

شکل ۲: اندازه‌گیری دمای بتن با استفاده از دماسنج بتن

۴-۲- تهیه و تست نمونه‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌های خمیری بتن از استاندارد ASTM C143 [۸] برای تعیین اسلامپ و برای تعیین مدت‌زمان لازم برای گیرش اولیه و نهایی که بر روی نمونه‌های خمیر سیمان و با استفاده از دستگاه ویکات انجام گرفته است، از استاندارد ASTM C191 [۹] استفاده شده است. همچنین برای انجام آزمایش‌های خواص سخت‌شده بتن از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری بر اساس بخش اول و سوم استاندارد BS 12390 [۱۰] برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متری بر اساس استاندارد ASTM C496 [۱۱] برای تعیین مقاومت کششی و از نمونه‌های تیر منشوری ۳۵×۷۵×۷۵ میلی‌متری بر اساس استاندارد ASTM C293 [۱۲] برای تعیین مقاومت خمشی استفاده شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی از جک بتن شکن با بارگذاری تحت کنترل بار با نرخ بارگذاری یک کیلو نیوتن در ثانیه استفاده شده است. همچنین برای انجام تست خمش از دستگاه UTM استفاده شده که نوع بارگذاری از نوع تغییرشکل کنترل بوده و نرخ بارگذاری برابر با ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

عمل‌آوری تمامی نمونه‌های هر سه نوع مخلوط (کنترل، گرم، گرم سرد شده) به دو طریق انجام گرفته است. سری اول نمونه‌ها بلافاصله بعد از تهیه‌ی بتن در اتاق گرم با دمای $50^{\circ}C$ قرار داده‌شده‌اند (without curing) و سری دوم نمونه‌ها بعد از گذشت یک روز از تهیه‌ی بتن، در داخل آب با دمای محیط آزمایشگاه قرارگرفته‌اند (curing in water). شایان‌ذکر است در مقاله‌ای که توسط Abdullah Zeyad [۱۳] در سال ۲۰۱۹ انجام گرفته از بین سه روش بررسی‌شده یعنی عمل‌آوری با گونی خیس، پاشش آب بر سطح بتن و غوطه‌ور کردن بتن در آب برای عمل‌آوری بتن در هوای گرم، غوطه‌ور کردن بتن در آب بالاترین مقاومت فشاری را در پی داشته است. بر این اساس در این تحقیق نیز از این نوع عمل‌آوری استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

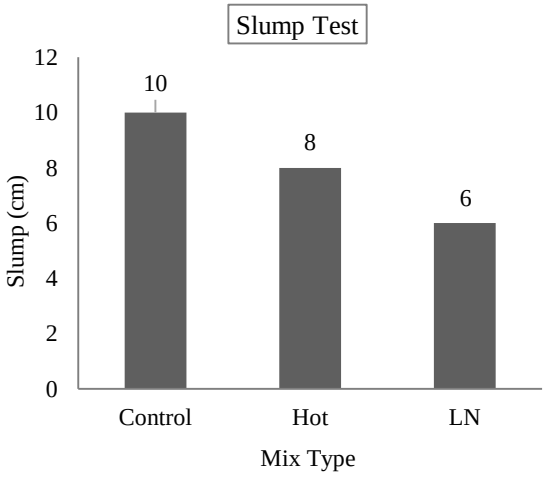
۱-۳- اسلامپ

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که در هوای گرم با آن مواجه هستیم مربوط به افت اسلامپ می‌باشد. انتظار می‌رود نیتروژن مایع دمای بتن را پایین آورده و به‌تبع آن سرعت واکنش هیدراتاسیون کاهش یافته و از میزان افت اسلامپ بکاهد.

به دلیل تفاوت دمایی زیاد بین نیتروژن مایع و محیط آزمایشگاه، مشاهده می‌شود بلافاصله بعد از تزریق نیتروژن مایع داخل میکسر، نیتروژن از حالت مایع به گاز تبدیل شده و نگرانی‌هایی در مورد خارج شدن آب از داخل میکسر به وجود می‌آید، به‌این‌ترتیب که امکان تبخیر آب از میکسر فراهم شده و این شرایط منجر به کاهش اسلامپ شود. به‌منظور حل این مشکل مطابق شکل ۳ با استفاده از کاور دهانه میکسر کاملاً پوشانده شده و بدین ترتیب از خارج شدن بخار از داخل میکسر جلوگیری گردیده است. نتایج مربوط به آزمایش تعیین اسلامپ در شکل ۴ آورده شده است.

(ب) (الف)

شکل ۳: (الف) تبخیر نیتروژن مایع به هنگام تزریق آن داخل میکسر (ب) جلوگیری از تبخیر نیتروژن با استفاده از کاور.



شکل ۴: نتایج آزمایش اسلامپ.

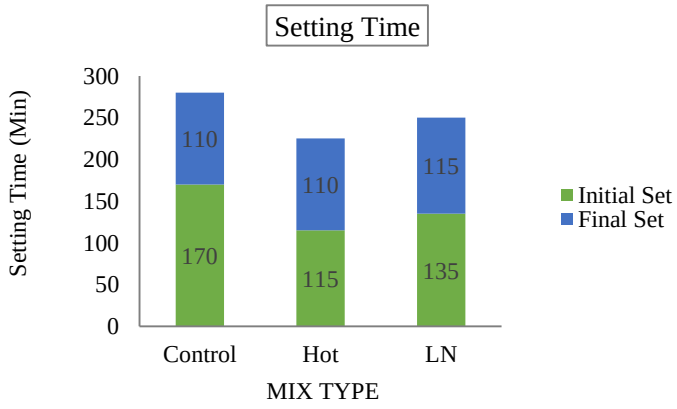
مطابق انتظار اسلامپ مخلوط گرم با دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در مقایسه با مخلوط کنترل با دمای ۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده است که این افت اسلامپ ناشی از تسریع واکنش هیدراتاسیون و کاهش آب آزاد در بتن است. آب آزاد موجود در بتن با خیس کردن سطح ذرات، فاصله آن‌ها را از همدیگر افزایش داده و به لغزش آسان ذرات روی یکدیگر کمک می‌کند [۱۴]. با کاهش آب آزاد در بتن و افزایش اصطکاک بین سنگدانه‌ها و ذرات سیمان، روانی مخلوط کم شده و منجر به کاهش اسلامپ مخلوط گرم شده است. اما موضوع جالبی که در این آزمایش مشاهده گردید، کاهش محسوس اسلامپ مخلوط گرم سرد شده از طریق تزریق نیتروژن مایع بود. مطابق شکل ۴، اسلامپ مخلوط گرمِ سرد شده نه‌تنها از مخلوط کنترل کمتر است، بلکه نسبت به مخلوط گرم نیز کاهش پیدا کرده است.

افت اسلامپ در بتن ناشی از دو دلیل عمده است، بدین‌صورت که افت اسلامپ یا ناشی از گیرش سیمان بوده و یا ناشی از کاهش آب در طرح مخلوط می‌باشد [۶]. در ادامه مشاهده خواهد شد که افت اسلامپ ناشی از دلیل اول نیست، چراکه در آزمایش زمان‌گیرش مشاهده می‌شود که نیتروژن مایع گیرش را به تأخیر انداخته و زمان‌گیرش مخلوط گرم سرد شده نسبت به مخلوط گرم افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین افت اسلامپ ناشی از کاهش میزان آب در طرح مخلوط می‌باشد. همان‌طور که قبل‌تر اشاره شد، به هنگام آزمایش از خارج شدن بخار از داخل میکسر به‌وسیله کاور جلوگیری شده بود، اما بااین‌وجود در حدفاصل تزریق نیتروژن مایع به داخل میکسر و انداختن کاور بر روی آن، احتمال می‌رود که مقداری از آب اختلاط همراه با بخار ناشی از تزریق نیتروژن خارج شده و منجر به کاهش اسلامپ گردیده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که بخار ناشی از تزریق نیتروژن مایع، تبخیر آب را تسهیل کرده و منجر به کاهش اسلامپ می‌شود؛ بنابراین به هنگام استفاده از نیتروژن مایع برای سرد کردن بتن، بایستی تمهیدات لازم جهت جلوگیری از تبخیر آب مخلوط، اندیشیده شود.

۲-۳- زمان گیرش

گیرش بتن یکی دیگر از مشخصات تازه بتن می‌باشد که به‌شدت از دما تأثیر می‌گیرد، به این شکل که هوای گرم موجب تسریع واکنش بین سیمان و آب شده و منجر به کاهش زمان‌گیرش می‌شود و نهایتاً این عامل مشکلاتی در عملیات جایدهی، تراکم و پرداخت سطح بتن را پدید می‌آورد. پایین آوردن نرخ گیرش در هوای گرم با پایین آوردن دمای بتن میسر می‌شود که این کار می‌تواند با استفاده از نیتروژن مایع صورت پذیرد.

هدف این آزمایش مشاهده تأثیر دما بر زمان‌گیرش و همچنین تأثیر نیتروژن مایع بر زمان‌گیرش می‌باشد. شکل ۵ نتایج زمان‌گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های کنترل، گرم و گرم سرد شده را نشان می‌دهد.

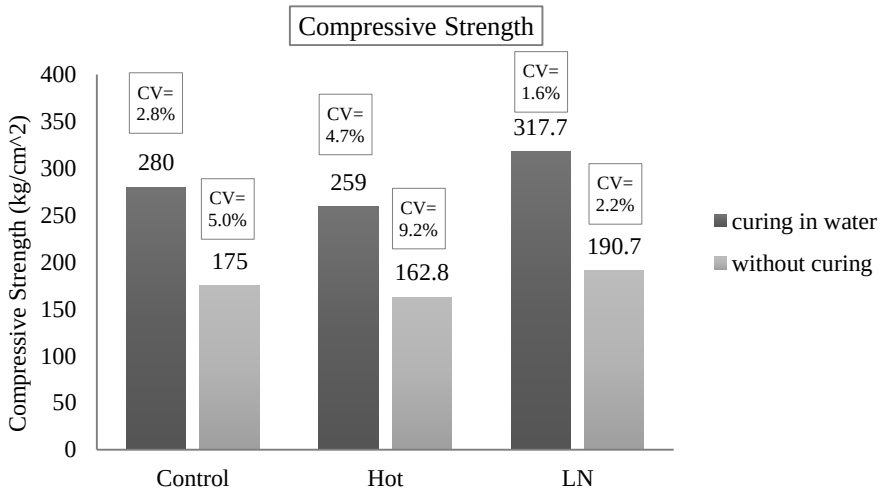


شکل ۵: گیرش اولیه و نهایی نمونه‌ها.

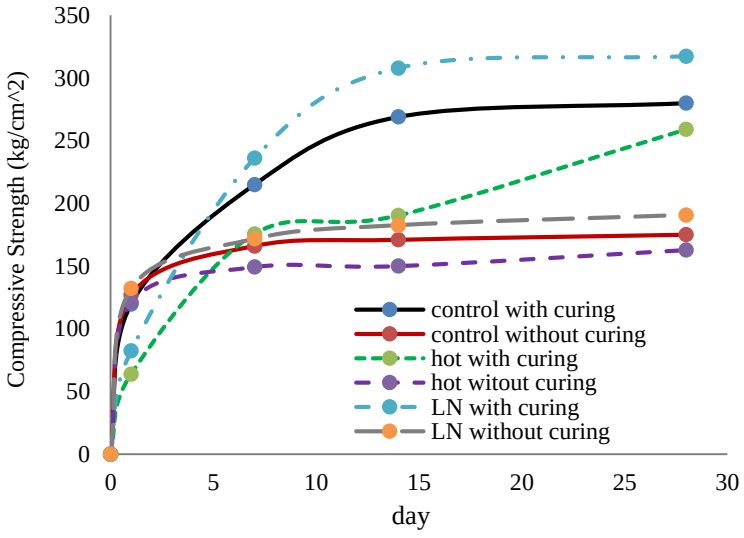
همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، زمان‌گیرش نمونه گرم نسبت به نمونه کنترل کاهش پیدا کرده است که یک امر بدیهی می‌باشد، چراکه با توجه به دمای بالای آن (۴۰°C) در مقایسه با دمای نمونه کنترل (۲۵°C)، واکنش هیدراتاسیون تسریع یافته و نهایتاً ۳۰ درصد کاهش در گیرش اولیه و ۲۰ درصد کاهش در گیرش نهایی را در پی داشته است. نمودار نمونه سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع حاکی از آن است که پایین آوردن دما مؤثر بوده و در مقایسه با نمونه گرم، مشاهده می‌شود نیتروژن مایع گیرش اولیه را به میزان ۱۷ درصد و گیرش نهایی را حدود ۱۱ درصد به تأخیر انداخته است، هرچند گیرش آن نسبت به نمونه کنترل سریع‌تر اتفاق افتاده است. نکته‌ی قابل‌توجه دیگری که به چشم می‌خورد مربوط به حدفاصل گیرش اولیه و نهایی می‌باشد که کوتاه شدن این زمان منجر به کاهش فرصت لازم برای پرداخت سطح می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این زمان تأثیر خاصی از تغییر دما نگرفته است و در هر سه نمونه تقریباً زمان مشابهی ثبت شده است.

۳-۳- مقاومت فشاری

یکی از مهم‌ترین مشخصات بتن، مقاومت فشاری آن است و آزمایش تعیین مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های بتن سخت شده می‌باشد. در این قسمت، تأثیر دما بر مقاومت فشاری و روند کسب آن و همچنین تأثیر نیتروژن مایع بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ میانگین نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کنترل، گرم و گرمِ سرد شده که به دو طریق عمل‌آوری شده‌اند را نشان می‌دهد. ضریب تغییرات (CV) داده‌های بدست آمده از ۳ نمونه آزمایش نیز در بالای هر ستون درج شده است. همچنین روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۶: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها.



شکل ۷: روند کسب مقاومت فشاری.

نتایج شکل ۶ که مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ها می‌باشد، حاکی از آن است که مقاومت نمونه‌های گرم نسبت به نمونه‌های کنترل در هر دو حالتِ بدون عمل‌آوری و عمل‌آوری در آب، تقریباً به میزان ۷ درصد کاهش پیدا کرده است. این کاهش مقاومت ناشی از دمای بالای نمونه‌های گرم نسبت به نمونه‌های کنترل است به این صورت که دمای بالا موجب تسریع واکنش هیدراتاسیون شده و این موضوع تشکیل غیریکنواخت ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-H-S) را در پی داشته و مقاومت آن کاهش پیدا کرده است [۱۵]. در ضمن ذکر این نکته ضروری است که تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان تهیه‌شده‌اند و اگر چنانچه خواسته می‌شد که اسلامپ در همه‌ی مخلوط‌ها ثابت باقی

بماند، ناچار به افزایش آب در طرح اختلاط مربوط به مخلوط گرم بودیم که در این صورت افت مقاومت بیشتر از آن چیزی بود که هم‌اکنون مشاهده می‌شود.

مقایسه دو نمودار گرمِ سرد شده و کنترل، حاکی از افزایش مقاومت نمونه گرم سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع نسبت به نمونه کنترل می‌باشد. درواقع این موضوع را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که در حدفاصل تزریق نیتروژن به داخل میکسر و گرفتن کاور، مقداری از آب به همراه بخار ناشی از تزریق نیتروژن خارج شده و منجر به کاهش نسبت آب به سیمان گردیده و نهایتاً افزایش مقاومت نمونه گرم سرد شده را در پی داشته است. این موضوع در تحقیق انجام‌گرفته توسط Jhon Hema [۶] نیز خود را نشان می‌دهد. به این صورت که مقاومت نمونه‌های گرمِ سرد شده نسبت به نمونه‌های کنترل افزایش پیدا کرده است. برای بررسی این موضوع هما علاوه بر انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه، آزمایشی را در محیط بیرون از آزمایشگاه و با حجم بتن‌ریزی زیاد انجام داده است. نتایج این آزمایش نشان داده است که تفاوت خیلی کمی بین مخلوط گرمِ سرد شده و کنترل وجود دارد. او این تناقض در مورد نتایج آزمایشگاهی و صحرایی را بدین شکل تفسیر کرده است که حجم بتن تهیه‌شده در محیط آزمایشگاه کم بوده و در مقایسه با این حجم بتن‌ریزی دهانه میکسر بزرگ بوده و به‌تبع آن مقدار بخار ناشی از تزریق نیتروژن زیاد بوده و در نتیجه این موضوع، با کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت نمونه گرمِ سرد شده افزایش پیدا کرده است.

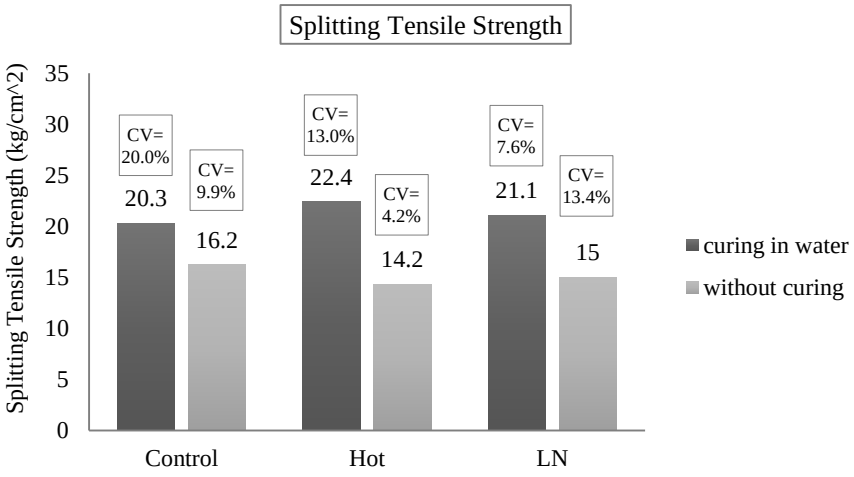
در تمامی نمونه‌ها تأثیر چشم‌گیر عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌ها به چشم می‌خورد، به این شکل که در هر سه مخلوط کنترل، گرم و گرم سرد شده شاهد افزایش تقریباً ۶۰ درصدی مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده نسبت به نمونه‌های بدون عمل‌آوری هستیم.

شکل ۷ روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌های کنترل، گرم و گرم سرد شده که به دو طریق تهیه‌شده‌اند را نشان می‌دهد. نکته‌ی مهمی که به چشم می‌خورد افت مقاومت نمونه‌های قرار داده‌شده در اتاق گرم ($۵۰^{\circ C}$) نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد. درحالی‌که نمونه‌های بدون عمل‌آوری دارای مقاومت اولیه‌ی بیشتری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده هستند، مشاهده می‌شود که باگذشت زمان مقاومت آن‌ها رشد مناسبی نداشته و نهایتاً در تمامی مخلوط‌های کنترل، گرم و گرمِ سرد شده رشد مقاومت آن‌ها کاهش یافته است. دلیل این مشاهده را می‌توان چنین تفسیر کرد که دمای بالای اتاق ($۵۰^{\circ C}$) منجر به سریع‌تر شدن فعل‌وانفعالات هیدراتاسیون شده و باعث می‌شود که محصولات هیدراتاسیون اطراف سنگدانه‌ها سریع‌تر تشکیل شوند که به‌تبع آن مقاومت بالا در سنین اولیه را در پی دارد؛ اما با توجه به توزیع سریع و ناهمگون محصولات هیدراتاسیون و در نتیجه آن ایجاد خلل و فرج‌های درشت در ماتریس سیمان، مقاومت نهایی بتن کاهش یافته است.

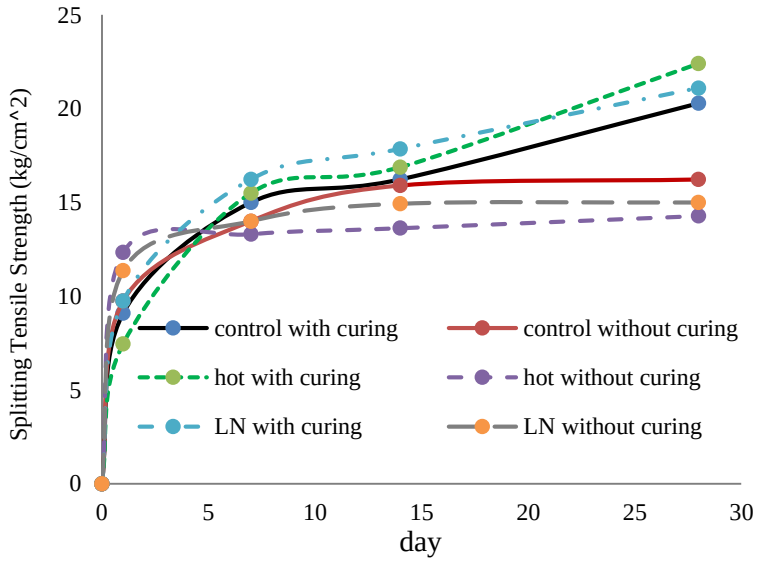
همچنین مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که نمونه‌های بدون عمل‌آوری در هر سه حالت تقریباً ۹۰ درصد از مقاومت ۲۸ روزه خود را در سن ۷ روزه کسب کرده‌اند، درحالی‌که این مقدار در سن ۷ روزه برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب، برابر با ۷۰ درصد هست.

۴-۳- مقاومت کششی

اگرچه معمولاً اعضای بتنی به‌گونه‌ای طراحی نمی‌گردند که تنش کششی مستقیم را تحمل نماید، ولی دانستن مقاومت کششی بتن در تخمین باری که ترک‌ها در آن توسعه می‌یابند، باارزش است. در این قسمت، تأثیر دما بر مقاومت کششی و روند کسب آن و همچنین تأثیر نیتروژن مایع بر مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ نتایج مقاومت کششی نمونه‌های کنترل، گرم و گرمِ سرد شده که به دو طریق تهیه شده‌اند را نشان می‌دهد. ضریب تغییرات (CV) داده‌های بدست آمده از نمونه‌های آزمایش شده نیز در بالای هر ستون درج شده است. همچنین روند کسب مقاومت کششی نمونه‌ها در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۸: مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها.



شکل ۹: روند کسب مقاومت کششی.

با توجه به شکل ۸ و مقایسه دو نمودار گرمِ سرد شده و کنترل حاکی از افزایش مقاومت کششی نمونه گرمِ سرد شده با استفاده از نیتروژن مایع در حالت عمل‌آوری شده در آب می‌باشد که همانند بخش‌های قبلی این افزایشِ مقاومت ناشی از تبخیر آب از درون میکسر به هنگام تزریق نیتروژن مایع می‌باشد؛ اما در نمونه‌های بدون عمل‌آوری شاهد کاهش مقاومت نمونه گرمِ سرد شده هستیم.

همچنین در مقایسه نمونه‌های گرم و کنترل در حالت بدون عمل‌آوری شاهد کاهش مقاومت نمونه‌های گرم هستیم، اما مقایسه نمودارهای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب حاکی از آن است که مقاومت نمونه‌های گرم افزایش پیدا کرده است.

ذکر این نکته ضروری است با توجه به اینکه در همه‌ی حالت‌های کنترل، گرم و گرمِ سرد شده اختلاف مقاومت‌ها کم بوده و اعداد به‌دست‌آمده نزدیک به هم می‌باشند و همچنین نظر به اینکه این آزمایش در دستگاه ۲۰۰ تنی صورت گرفته است، بروز خطاهای آزمایشگاهی اجتناب‌ناپذیر بوده است.

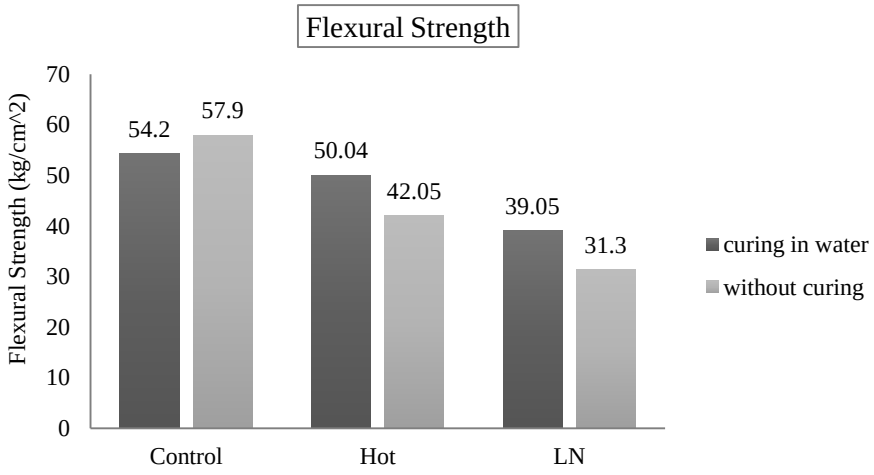
با توجه به شکل ۹ همان تفاسیری که در مورد روند کسب مقاومت فشاری وجود داشت، در این آزمایش نیز صادق است. به‌این‌ترتیب که با توجه به تسریع واکنش هیدراتاسیون در نمونه‌های قرار داده‌شده در اتاق گرم، علیرغم داشتن مقاومت بالا در سنین اولیه،

مقاومت آن‌ها در طی زمان رشد مناسبی نداشته و نهایتاً مقاومت ۲۸ روزه آن‌ها در مقایسه با نمونه‌های مشابه عمل‌آوری شده در آب کاهش پیدا کرده است.

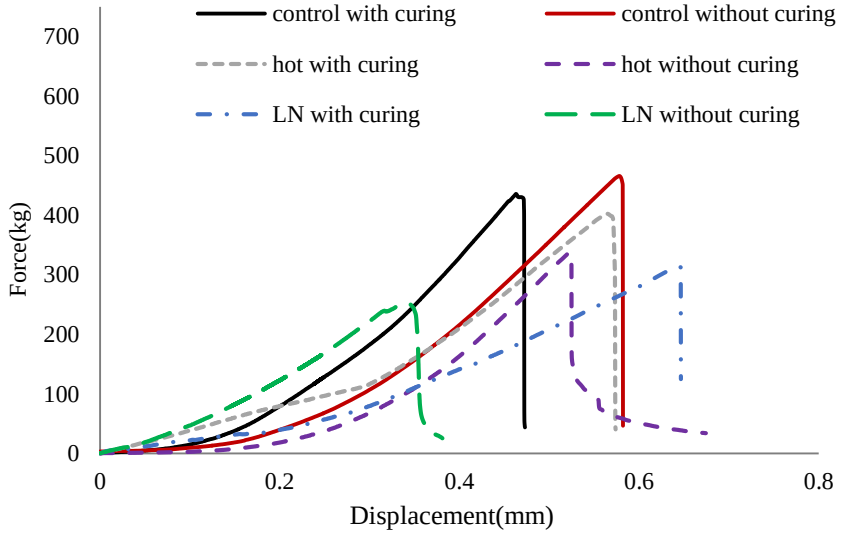
۵-۳- مقاومت خمشی

عدم وجود ترک در حفظ و دوام سازه‌های بتنی به جهت جلوگیری از خوردگی میلگردها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در آزمایش مقاومت خمشی تنش کششی ماکزیمم تئوریکی در تارهای پایینی تیر مورد آزمایش به وجود می‌آید که مدول گسیختگی نامیده می‌شود و در طراحی بزرگراه‌ها و روسازی فرودگاه‌ها به کار می‌رود.

مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی نمونه‌های گرم در هر دو حالت عمل‌آوری شده و بدون عمل‌آوری نسبت به نمونه‌های کنترل کاهش پیدا کرده است. می‌توان گفت تمامی تفاسیری که در مورد آزمایش‌های قبلی داشتیم در این آزمایش نیز صدق می‌کند، به‌این‌ترتیب که افزایش دما واکنش بین سیمان و آب را تسریع بخشیده و به‌تبع آن مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های مخلوط گرم نسبت به مخلوط کنترل کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۰: مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌ها.



شکل ۱۱: نمودار مقایسه‌ای بار-خیز نمونه‌ها.

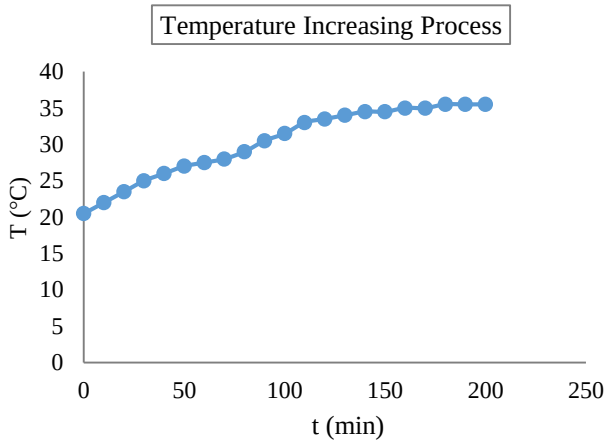
با توجه به نمودار بار-خیز نمونه‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تقریباً رفتار نمونه‌ها در مورد شکل‌پذیری مشابه هم بوده و تمامی آن‌ها رفتار تردی از خود بر جای گذاشته‌اند.

۶-۳- روند افزایش دما در بتن سردشده به‌وسیله نیتروژن مایع

به هنگام سرد کردن بتن با استفاده از روش نیتروژن مایع بایستی علاوه بر رعایت موارد مبنی بر مدت‌زمان مجاز برای باقی ماندن بتن در کامیون، به این نکته نیز توجه شود که بعد از عملیات سرد کردن، بتن باید بتواند مدت‌زمان معینی را سرد باقی مانده و مشکلات مربوط به تسریع واکنش هیدراتاسیون در آن اتفاق نیفتد.

برای این منظور آزمایشی در این تحقیق تدارک دیده شده است تا از عدم افزایش سریع دما پس از سرد کردن بتن اطمینان حاصل شود. به این صورت که دمای بتن از $^{\circ}C$ ۴۰ به $^{\circ}C$ ۲۰ رسانده شده و پس از پایان یافتن عملیات سرد کردن بلافاصله نمونه‌ی تهیه‌شده در اتاق کنترل با دمای $^{\circ}C$ ۵۰ قرار داده شده و از هر ۱۰ دقیقه دمای بتن قرائت گردیده است. نتیجه حاصله در شکل ۱۲ آورده شده است.

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است، روند افزایش دما سریعاً اتفاق نیفتاده است. البته بدیهی است که هرچقدر دمای بتن بیشتر پایین آورده شود، بتن مدت‌زمان زیادی را می‌تواند سرد باقی بماند. در این تحقیق دمای هدف $^{\circ}C$ ۲۰ در نظر گرفته شده بود و هدف این بود که از عدم افزایش سریع دمای بتن سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع اطمینان حاصل شود.



شکل ۱۲: روند افزایش دما.

۴- نتیجه‌گیری

۱- افزایش دما به میزان $^{\circ}C$ ۱۳، ۲۰ درصد کاهش در اسلامپ را در پی داشته است. همچنین بخار ناشی از تزریق نیتروژن مایع، تبخیر آب را تسهیل کرده و منجر به کاهش اسلامپ می‌شود.

۲- در رابطه با زمان‌گیرش، نیتروژن مایع در هوای گرم عملکرد مطلوبی داشته و توانسته گیرش اولیه را به میزان ۱۷ درصد و گیرش نهایی را حدود ۱۱ درصد به تأخیر بیندازد و به‌تبع آن فرصت کافی برای انجام عملیات جایدهی، تراکم و پرداخت بتن را فراهم آورد.

۳- مقاومت فشاری نمونه‌های سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع نسبت به نمونه‌های کنترل تقریباً ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است. این افزایش مقاومت را می‌توان با تبخیر آب به هنگام تزریق نیتروژن مایع و به‌تبع آن کاهش نسبت آب به سیمان، مرتبط دانست. همچنین در تمامی نمونه‌ها تأثیر چشم‌گیر عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها به چشم می‌خورد، به این شکل که در هر سه مخلوط کنترل، گرم و گرمِ سرد شده شاهد افزایش تقریباً ۶۰ درصدی مقاومت نهایی نمونه‌های عمل‌آوری شده نسبت به نمونه‌های

بدون عمل‌آوری هستیم.

۴- مقایسه مقاومت کششی مخلوط‌های کنترل و گرمِ سرد شده به‌وسیله نیتروژن مایع نشان می‌دهد که نیتروژن مایع تأثیر خاصی بر مقاومت کششی نداشته و اعداد به‌دست‌آمده نزدیک به هم می‌باشند.

۵- نمونه‌های قرار داده‌شده در اتاق کنترل با دمای $^{\circ}C$ ۵۰، ۹۰ درصد از مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه خود را در سن ۷ روزه کسب کرده‌اند، درصورتی‌که این مقدار برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب در سن ۷ روزه برابر با ۷۰ درصد می‌باشد.

۶- مقایسه نمودار بار-خیز نمونه‌ها نشان می‌دهد که رفتار نمونه‌ها ازنظر شکل‌پذیری تقریباً نزدیک به هم بوده و تمامی آن‌ها رفتار تردی از خود نشان داده‌اند.

۷- روند افزایش دما پس از سرد کردن بتن توسط نیتروژن مایع، تدریجی می‌باشد که این موضوع فرصت کافی جهت انجام عملیات حمل، جایدهی و پرداخت بتن پس از سرد کردن آن را فراهم آورده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مسئولین فنی آزمایشگاه بتن و ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی سهند به سبب تلاش‌ها و زحمات ایشان تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] Rao, M. (2016) *Concrete In Hot Weather Conditions-Challenges-Precautions*. Science and Research 5(1).
[2] Gajda, J., Kaufman, A. L., and Sumodjo, F. (2005) Precooling Mass Concrete: Liquid Nitrogen Proved to be the Best Alternative on the San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Concrete Construction*, 50 (8), 36-40.
[3] Beaver, W. (2004) Liquid Nitrogen for Concrete Cooling. *Concrete International*, 26 (9), 93-95.
[4] Abdel-Raheem, M., Quintana, O., Morales, M., Marroquin-Villa, Y., Ramos, D., & Hernandez, S. (2018) Construction Methods Used for Controling Temperature in Mass Concrete Structures. In *Creative Construction Conference 2018* (pp. 139-146). Budapest University of Technology and Economics.
[5] Nakane, S., Saito, H., and Ohike, T. (1992) Strength Development and Microstructure of Cement and Concrete Precooled with Liquid Nitrogen. *Concrete in Hot Climates*, E&FN Spon, London, UK, pp. 89-99.
[6] Hema, J. (2007) The Effects of Liquid Nitrogen on Concrete Hydration, Microstructure, and Properties, dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, TX.
[7] Juenger, M. C., et al. (2010) Effects of liquid nitrogen cooling on fresh concrete properties. *ACI Materials Journal*, 107(2), 123.
[8] ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, 2003.
[9] ASTM C191, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, 2008.
[10] BS 12390, Testing hardened concrete- Part 3: Compressive strength of test specimens, 2001.
[11] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2004.
[12] ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point).
[13] Zeyad, A. M. (2019). Effect of curing methods in hot weather on the properties of high-strength concretes. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, *31*(3), 218-223.
[14] Almakhadmeh, M., & Soliman, A. M. (2021). Effects of mixing water temperatures on properties of one-part alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*, *266*, 121030.
[15] Rizzuto, J. P., Kamal, M., Elsayad, H., Bashandy, A., Etman, Z., Roos, M. N. A., & Shaaban, I. G. (2020). Effect of self-curing admixture on concrete properties in hot climate conditions. *Construction and Building Materials*, *261*, 119933.