

Experimental Study and Statistical Study on the Strength of Concrete with Cold Joints

Ehsan Karimi^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bandar Gaz Branch, Islamic Azad University, Bandar Gaz, Iran

Ehsan.Karimi@iaau.ac.ir

Received: 30 July 2025 Revised: 12 September 2025 Accepted: 25 October 2025

Research paper

Abstract

This study investigates the effects of cold joints on the compressive and shear strength of concrete through experimental and statistical analyses. A total of 212 concrete specimens were prepared, including cubic specimens (in four configurations: without joint, with horizontal, vertical, and diagonal joints) and S-shaped specimens (with and without joints). For specimens with joints, a 24-hour interval was considered between consecutive pours, and no surface preparation was applied at the joint interface. Compressive strength tests revealed that the presence of cold joints reduced strength and increased the coefficient of variation, with the diagonal joint showing the most severe reduction (~58%). In the shear (push-off) tests, cold joints resulted in a 68% strength loss. Statistical evaluations—including mean, standard deviation, coefficient of variation, probability density functions, and failure probabilities—indicated that increasing joint angle significantly elevates uncertainty and reduces structural reliability. Overall, the results emphasize that cold joints, especially those lacking proper surface treatment, can substantially compromise the strength and safety of concrete structures.

Keywords: Cold joint, Statistical analysis, Experimental, Uncertainty, Push-Off Test.

*Corresponding Author: Ehsan Karimi

Karimi E. Experimental Study and Statistical Study on the Strength of Concrete with Cold Joints. *J. Concr. Struct. Mater.*, 2024; 9(2): 153-169. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.537118.1394>

2538-5828/ © 2025 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مطالعه آزمایشگاهی و آماری مقاومت بتن دارای درز سرد

احسان کریمی*

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد بندرگز، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرگز، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Ehsan.Karimi@iaau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این تحقیق، تأثیر درز سرد بر مقاومت فشاری و برشی بتن به صورت آزمایشگاهی و آماری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، تعداد ۲۱۲ نمونه بتن در قالب آزمون‌های مکعبی (در چهار حالت: بدون درز، درز افقی، درز قائم و درز مورب) و آزمون‌های S-شکل (در دو حالت: بدون درز و با درز) ساخته و آزمایش شدند. در آزمون‌های دارای درز، فاصله زمانی بتن‌ریزی بین دو بخش ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و هیچ‌گونه آماده‌سازی سطحی در محل درز انجام نشد. نتایج آزمایش فشاری نشان داد که ایجاد درز سرد منجر به کاهش مقاومت فشاری و افزایش ضریب تغییرات می‌شود. بیشترین کاهش مقاومت مربوط به حالت درز مورب با کاهش حدود ۵۸٪ بود. همچنین در آزمایش‌های برشی (پوش آف)، ایجاد درز باعث کاهش ۶۸٪ مقاومت برشی شد. تحلیل‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، تابع چگالی احتمال و احتمال شکست نیز نشان داد که با افزایش زاویه درز سرد، عدم قطعیت افزایش یافته و به عبارتی قابلیت اعتماد کاهش می‌یابد. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که وجود درز سرد - به ویژه بدون آماده‌سازی سطح تماس - می‌تواند مقاومت و ایمنی سازه‌های بتنی را به طور جدی تحت تأثیر قرار دهد.

کلمات کلیدی: درز سرد، تحلیل آماری، آزمایشگاهی، عدم قطعیت، آزمایش پوش آف.

بتن به دلیل مقاومت زیاد، دوام طولانی، صرفه اقتصادی و توانایی محافظت از میلگردها در سازه‌های بتن مسلح، به عنوان پرکاربردترین ماده ساختمانی در جهان شناخته می‌شود. برای دستیابی به بتن با کیفیت مطلوب، لازم است تمام مراحل، از انتخاب مصالح اولیه تا دستیابی به مقاومت نهایی، با دقت و تحت نظارت دقیق انجام شود. گرچه ممکن است فرآیند تولید بتن ساده به نظر برسد، اما هرگونه انحراف از اصول صحیح در مراحل طراحی، اختلاط، حمل، ریختن و عمل‌آوری می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت و دوام آن بگذارد.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که اجرای نادرست یا ناقص هر یک از این مراحل می‌تواند عمر مفید بتن را کاهش داده و باعث بروز آسیب‌هایی در آن شود [۴-۱]. یکی از این آسیب‌ها که کیفیت بتن را به‌طور جدی تهدید می‌کند، پدیده‌ای به نام «درز سرد» است. برای جلوگیری از ایجاد درز بین لایه‌های بتن، فرآیند بتن‌ریزی باید به‌صورت پیوسته و بدون وقفه انجام شود. با این حال، عواملی مانند بزرگی پروژه، محدودیت قالب و قالب‌بندی، محدودیت در تأمین مقدار کافی بتن، یا پیش آمدن شرایط غیرمنتظره می‌توانند مانع از اجرای بتن‌ریزی یکپارچه شوند. همچنین گاهی به‌دلیل پیچیدگی طرح سازه یا کمبود نیروی کار، امکان انجام کل عملیات بتن‌ریزی در یک نوبت وجود ندارد. در چنین شرایطی، بتن در چند مرحله ریخته می‌شود و اگر لایه قبلی پیش از ریختن لایه جدید سفت شده باشد، ناپیوستگی یا ضعفی در محل تماس ایجاد می‌شود که به آن «درز اجرایی» یا «درز سرد» گفته می‌شود. از سوی دیگر، عواملی مانند گرمای زیاد، باد شدید یا استفاده از مواد تسریع‌کننده نامناسب نیز می‌توانند احتمال شکل‌گیری درز سرد را افزایش دهند. این نوع ناپیوستگی می‌تواند به‌طور مستقیم بر عملکرد و یکپارچگی سازه‌های بتنی اثر منفی بگذارد [۵].

تا کنون پژوهشگران مختلفی در خصوص درز سرد و اثرات آن بر خصوصیات بتن و سازه مطالعه کرده‌اند. خولیو و همکاران [۶]، [۷]، تاثیر نوع آماده‌سازی محل اتصال درز اجرایی از جمله، سابیدن با برس سیمی، ماسه‌پاشی، خراش دادن با چکش برقی سبک و باقی گذاشتن سطح به همان حالت اولیه حاصل از قالب فلزی مورد آزمایش و بررسی قرار دادند و دریافتند که استفاده از اپوکسی در مقایسه با روش‌های دیگر آماده‌سازی سطح، مقاومت چسبندگی را بهبود نمی‌بخشد و زبری عامل اصلی در بهبود مقاومت چسبندگی است. خولیو و همکاران نیز در تحقیق دیگر [۸]، دقت روابط آیین‌نامه‌ای در برآورد مقاومت برشی طولی لایه‌های تقویتی بتن رویه‌ای را با استفاده از آزمون‌های پوش-آف مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که مقادیر مقاومت برشی محاسبه شده توسط روابط مختلف آیین‌نامه‌ای، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر دارند به نحوی که در برخی موارد مقادیر پیش‌بینی شده توسط برخی از آیین‌نامه‌ها نایمن و در برخی موارد محافظه‌کارانه و غیر اقتصادی هستند. تاپکین و پارپهار [۹]، اثر تأخیر زمانی در بتن‌ریزی به میزان ۶۰ دقیقه، ۲۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش زمان تأخیر، مقاومت کاهش می‌یابد.

رائی و کولاسه [۱۰]، نیز اشاره کرده‌اند که کاهش مقاومت فشاری، خمشی و کششی شکافت در درزهای افقی کمتر از درزهای عمودی و مایل است. گرگس و همکاران [۱۱]، دریافتند که وجود درز سرد می‌تواند مقاومت کششی شکافتی بتن یکپارچه را تا حدود ۵۵٪ کاهش دهد. درز سرد نه تنها مقاومت بتن را کاهش می‌دهد، بلکه دوام آن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۱-۱۵]. چوی و همکاران [۱۶]، گزارش کرده‌اند که نفوذ یون‌های مضر از ناحیه درز سرد سریع‌تر از بتن سالم انجام می‌شود. لی و همکاران [۱۲]، دریافتند که درز سرد منجر به خوردگی میلگردها می‌شود و این امر دوام بتن را تضعیف می‌کند. شروع خوردگی فولاد ممکن است به مرور به کاهش ایمنی سازه منجر شود.

جعفری و همکاران [۱۷]، نشان دادند که زاویه درز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری دارد و بیشترین افت مقاومت در زاویه ۴۵ درجه رخ می‌دهد. همچنین کریمی و کلات‌جاری [۱۸، ۱۹]، مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی مودهای اول و دوم مکانیک شکست در بتن دارای اتصال سرد ارائه داده‌اند. صرافی و همکاران [۲۰]، به منظور کاهش آثار منفی درزهای ساخت (سرد و گرم) در بتن

غلطکی، به بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت پرداخته‌اند و مشاهده کردند که زئولیت توانسته است اثرات مخرب ناشی از درزهای سرد و گرم را تا حد چشمگیری کاهش دهد. همچنین آتشی و همکاران [۲۱]، تأثیر درز سرد و راهکارهای بهبود آن در قاب‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار داده‌اند و نشان دادند که استفاده از تقویت‌کننده‌هایی مانند قوطی، کلید برشی و میلگرد اضافی می‌تواند ظرفیت باربری کاهش‌یافته ناشی از درز سرد را جبران کند، به طوری که استفاده از قوطی بیشترین تأثیر را در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب داشت.

او و همکاران [۲۲]، اثر نسبت آب به سیمان بر مقاومت برشی درز سرد را با استفاده از آزمون برش مستقیم و انتشار امواج صوتی بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت برشی با افزایش W/C ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و مقدار بهینه را در حدود ۰/۶ به دست آوردند. علی و همکاران [۲۳]، اثر زوایای مختلف درز سرد بر مقاومت فشاری و کششی بتن مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در بیشتر زوایا، کاهش مقاومت فشاری چشمگیر نبود، اما زاویه ۶۵ درجه افت قابل توجهی در حدود ۳۲ تا ۴۸ درصد ایجاد کرد. همچنین با آزمایش کشش برزیلی نشان دادند که زاویه ۹۰ درجه نامطلوب‌ترین حالت بوده و سبب کاهش قابل ملاحظه مقاومت کششی می‌شود. آور و همکاران [۲۴]، در یک مطالعه جامع، اثرات مخرب درز سرد بر خواص مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته، چقرمگی و انرژی شکست را بررسی و نشان دادند که زاویه و موقعیت درز سرد نقش مهمی در رفتار شکست دارند به نحوی که برای ناحیه فشاری، قرارگیری درز سرد در زاویه ۹۰ درجه و موقعیت ۰/۵، و برای ناحیه خمشی در زاویه ۴۵ درجه و موقعیت ۰/۷۵ شرایط مناسب‌تری ایجاد می‌کند.

در اغلب استانداردها و آیین‌نامه‌های بتن و ساختمان [۲۵-۳۰]، توصیه‌ها و راهکارهایی برای آماده‌سازی سطوح درز سرد از قبیل تمیزکاری سطح، پرداخت مکانیکی، سابیدن و زبر کردن با برس سیمی، ماسه‌پاشی، آب‌پاشی پرفشار و غیره آمده است. اما متأسفانه با وجود چنین توصیه‌هایی، در بسیاری از موارد مشاهده می‌شود که بدون توجه به این توصیه‌ها و راهکارها، بتن‌ریزی در محل درز سرد انجام می‌شود. از این رو، در این تحقیق تعداد ۲۱۲ نمونه بتنی (به صورت مکعبی و Z-شکل) جهت بررسی اثر درز سرد بدون آماده‌سازی سطح درز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است.

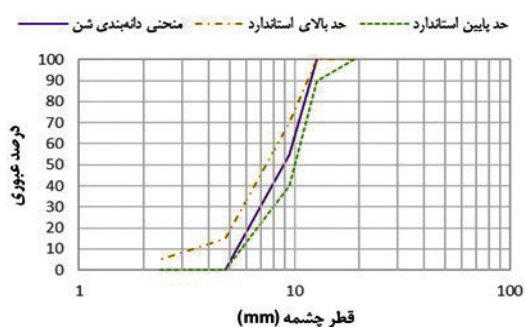
اگرچه مطالعات متعددی به بررسی کیفی اثر درز سرد بر مقاومت بتن پرداخته‌اند، در اغلب آن‌ها تحلیل آماری جامع داده‌ها و مقایسه احتمالات شکست مورد توجه قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری و برشی بتن در حضور درز سرد، با بهره‌گیری از روش‌های آماری شامل توزیع آماری، هیستوگرام، فاصله اطمینان و احتمال شکست، تصویری دقیق‌تر و کمی از رفتار بتن ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، نتایج حاصل نه تنها به شناخت کاهش مقاومت کمک می‌کند، بلکه میزان عدم قطعیت و قابلیت اعتماد در نمونه‌های مختلف را نیز آشکار می‌سازد.

۲- مصالح و نسبت اختلاط

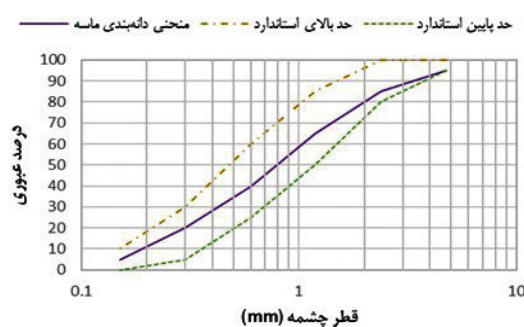
در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۲ بجنورد با مشخصات شیمیایی مطابق جدول ۱، ماسه شکسته به عنوان ریزدانه با مدول نرمی ۲/۹، چگالی ۲/۶۱ و جذب آب ۱/۸٪ و سنگ شکسته به عنوان درشت‌دانه با چگالی ۲/۷۳، جذب آب ۰/۹٪ و حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر تهیه شده از کارخانه سنگ‌شکن شهرستان نونکنده با منحنی دانه‌بندی مطابق شکل ۱ استفاده شده است. نسبت مخلوط بتن برای حجم یک متر مکعب در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ بجنورد

اکسید	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
مقدار (درصد)	۲۱/۴۲	۴/۲۲	۳/۰۸	۶۳/۷۵	۲/۰۳	۲/۴۵	۰/۳۳	۰/۶۹
نام	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$L.O.I$	قلیابیت معادل	سایر مشخصات	باقیمانده نامحلول
مقدار (درصد)	۵۶/۹۸	۱۸/۴۵	۵/۹۸	۲۱/۳۲	۲/۴۴	۰/۷۸	۰/۷۲	



ب) منحنی دانه‌بندی شن



الف) منحنی دانه‌بندی ماسه

شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی و مقایسه با مقادیر استاندارد ASTM C33

جدول ۲: نسبت مخلوط بتن

مصالح	آب	سیمان	ماسه	شن
مقدار (kg/m^3)	۱۹۹	۴۱۵	۱۰۰۱	۶۶۷

۳- آزمایش مقاومت فشاری

برای بررسی تأثیر درز سرد بر مقاومت فشاری بتن، از آزمون‌های مکعبی شکل با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر استفاده گردید. برای تهیه آزمون‌های مکعبی و نحوه ریختن و متراکم نمودن بتن در قالب‌ها و نیز آزمون‌های بتن سخت شده و تعیین مقاومت فشاری آزمون‌ها طبق استانداردهای EN 12390-1، EN 12390-2 و EN 12390-3 عمل شده است. آزمون‌ها در چهار حالت مختلف: بتن بدون درز، بتن دارای درز افقی، بتن دارای درز عمودی و بتن دارای درز مورب ساخته شدند. برای هر حالت، تعداد ۴۸ آزمون ساخته شد که در مجموع ۱۹۲ آزمون مکعبی را شامل می‌شود (شکل ۲).



ب) با درز افقی



الف) بدون درز



د) با درز مورب



ج) با درز قائم

شکل ۳: نحوه ساخت آزمون‌های مکعبی

پس از تکمیل آزمون‌ها، قالب‌برداری بعد از ۲۴ ساعت انجام و آزمون‌ها در حوضچه آب با دمای حدود ۲۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی دیجیتال تمام اتوماتیک انجام شد و محدوده نرخ بارگذاری طبق استاندارد EN 12390-3 بین ۰/۴ تا ۰/۸ مگاپاسکال در ثانیه به کار گرفته شده است (شکل ۴). نتایج آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌ها برای هر چهار حالت (بدون درز، با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب) در جدول ۳ ارائه شده است.



د) با درز مورب



ج) با درز قائم



ب) با درز افقی



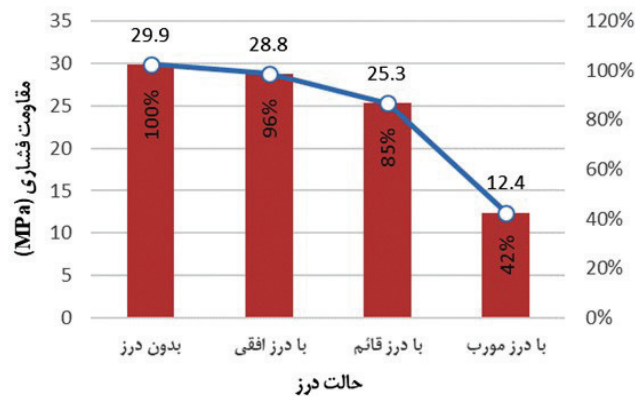
الف) بدون درز

شکل ۴: آزمایش آزمون‌های مکعبی

جدول ۳: داده‌های مقاومت فشاری (MPa)

شماره آزمونه	بدون درز	با درز افقی	با درز قائم	با درز مورب	شماره آزمونه	بدون درز	با درز افقی	با درز قائم	با درز مورب
۲۵	۲۸/۷	۳۰/۹	۲۳/۷	۹/۸	۱	۲۹/۲	۳۱/۱	۲۴/۱	۹/۳
۲۶	۲۸/۲	۲۸/۳	۲۶/۸	۱۴/۲	۲	۲۷/۹	۳۰/۵	۲۴/۷	۱۰/۱
۲۷	۲۹/۸	۲۶/۲	۲۴/۶	۱۷/۰	۳	۲۸/۰	۲۹/۶	۲۶/۷	۸/۱
۲۸	۲۷/۵	۳۱/۲	۲۴/۱	۱۰/۳	۴	۳۳/۲	۲۶/۰	۲۷/۵	۷/۷
۲۹	۲۹/۵	۳۱/۱	۲۴/۱	۹/۵	۵	۳۲/۰	۲۹/۱	۲۷/۹	۱۵/۶
۳۰	۳۰/۷	۲۹/۵	۲۴/۲	۱۲/۴	۶	۳۰/۶	۲۹/۳	۲۴/۸	۱۰/۷
۳۱	۲۹/۳	۳۰/۶	۲۳/۹	۹/۷	۷	۳۱/۵	۲۷/۶	۲۷/۹	۱۷/۷
۳۲	۳۰/۹	۲۹/۸	۲۴/۹	۱۱/۵	۸	۳۱/۷	۲۵/۷	۲۷/۴	۷/۸
۳۳	۲۹/۴	۲۷/۲	۲۳/۲	۱۷/۰	۹	۳۰/۶	۲۹/۲	۲۵/۰	۱۱/۵
۳۴	۳۱/۵	۲۸/۹	۲۷/۸	۱۵/۲	۱۰	۲۹/۹	۲۷/۸	۲۴/۱	۱۷/۵
۳۵	۳۱/۱	۲۸/۵	۲۶/۶	۱۴/۰	۱۱	۳۳/۸	۲۹/۳	۲۴/۷	۱۱/۰
۳۶	۳۰/۷	۲۸/۸	۲۴/۳	۹/۶	۱۲	۲۷/۹	۳۰/۰	۲۴/۴	۱۲/۸
۳۷	۲۸/۰	۳۱/۵	۲۳/۹	۱۰/۰	۱۳	۳۰/۷	۲۹/۲	۲۴/۵	۱۱/۸
۳۸	۲۸/۵	۲۸/۴	۲۷/۰	۱۴/۳	۱۴	۲۸/۳	۲۸/۱	۲۶/۴	۱۳/۱
۳۹	۲۹/۶	۲۹/۸	۲۳/۰	۱۲/۲	۱۵	۳۱/۰	۳۰/۴	۲۷/۱	۷/۹
۴۰	۲۹/۷	۲۶/۴	۲۴/۵	۱۷/۴	۱۶	۲۹/۷	۲۷/۰	۲۴/۷	۱۷/۷
۴۱	۲۸/۰	۲۷/۹	۲۶/۹	۱۷/۳	۱۷	۳۰/۱	۲۶/۹	۲۴/۸	۱۷/۵
۴۲	۳۱/۸	۲۵/۸	۲۷/۵	۷/۴	۱۸	۲۷/۹	۳۰/۱	۲۴/۶	۸/۳
۴۳	۲۸/۳	۳۰/۷	۲۳/۸	۹/۹	۱۹	۳۳/۳	۲۵/۸	۲۷/۶	۷/۵
۴۴	۲۸/۶	۳۰/۱	۲۷/۰	۸/۲	۲۰	۳۰/۰	۲۶/۷	۲۴/۶	۱۷/۶
۴۵	۲۹/۵	۲۷/۳	۲۴/۴	۱۷/۰	۲۱	۳۰/۵	۲۹/۰	۲۳/۴	۱۶/۲
۴۶	۲۸/۰	۲۸/۰	۲۶/۳	۱۳/۳	۲۲	۲۸/۵	۳۰/۲	۲۷/۳	۸/۱
۴۷	۳۴/۳	۲۹/۲	۲۴/۴	۱۱/۸	۲۳	۲۸/۸	۲۷/۱	۲۴/۶	۱۷/۰
۴۸	۳۱/۲	۲۸/۷	۲۶/۳	۱۵/۱	۲۴	۲۸/۸	۳۱/۴	۲۳/۹	۹/۲

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های بدون درز، با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب به ترتیب ۲۹/۹، ۲۸/۸، ۲۵/۳ و ۱۲/۴ مگاپاسکال بدست آمده است. نمودار مقایسه مقاومت فشاری شکل ۵ نشان می‌دهد با ایجاد درز سرد مقاومت فشاری آزمون‌ها کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش مقاومت مربوط به حالت درز مورب است. مطابق نتایج بدست آمده، میانگین مقاومت فشاری آزمون‌های با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب نسبت به آزمون‌های بدون درز، به ترتیب ۳/۷، ۱۵/۳ و ۵۸/۵ درصد کاهش یافته است.



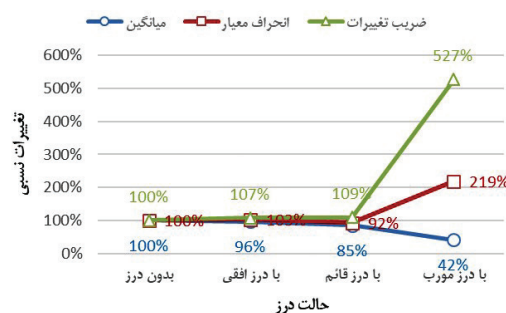
شکل ۵: نمودار مقایسه متوسط مقاومت‌های فشاری

خلاصه محاسبات آماری مقاومت فشاری در جدول ۴ قابل مشاهده است. انحراف معیار آزمون با درز افقی و درز مورب به ترتیب با ۳/۳ و ۱۱۸/۸ درصد افزایش و برای آزمون با درز قائم با ۷/۹ درصد کاهش نسبت به آزمون بدون درز بدست آمده است. همچنین ضریب تغییرات آزمون با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب به ترتیب با ۷/۳، ۸/۷، ۴۲۶/۸ درصد افزایش نسبت به آزمون بدون درز بدست آمده است.

جدول ۴: خلاصه محاسبات آماری مقاومت فشاری

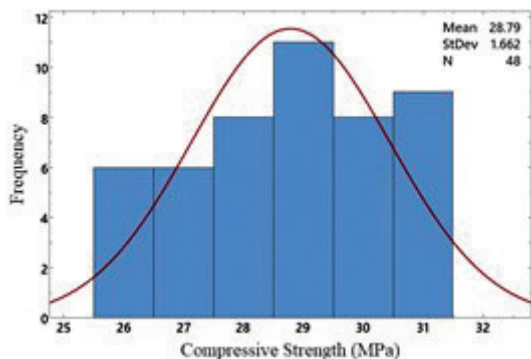
متغیر	بدون درز	با درز افقی	با درز قائم	با درز مورب
میانگین (MPa)	۲۹/۸۸	۲۸/۷۹	۲۵/۳۲	۱۲/۴۱
انحراف معیار (MPa)	۱/۶۱	۱/۶۶	۱/۴۸	۳/۵۲
ضریب تغییرات (%)	۵/۴	۵/۸	۵/۹	۲۸/۴

برای مقایسه راحت‌تر تغییرات نسبی مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌های با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب نسبت به بدون درز نمودار شکل ۶ ارائه شده است. به طور کلی مشاهده می‌شود که با ایجاد درز سرد در بتن، مقاومت فشاری کاهش یافته و ضریب تغییرات افزایش می‌یابد. همچنین حالت و زاویه درز سرد می‌تواند تأثیرات قابل توجهی در مقادیر مقاومت فشاری بتن ایجاد کند، به نحوی که در حالت درز مورب، بیشترین کاهش مقاومت و نیز بیشترین افزایش ضریب تغییرات مشاهده می‌شود و می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که ضمن کاهش قابل توجه مقاومت فشاری، عدم قطعیت افزایش و قابلیت اعتماد به این چنین آزمون‌ها نیز کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

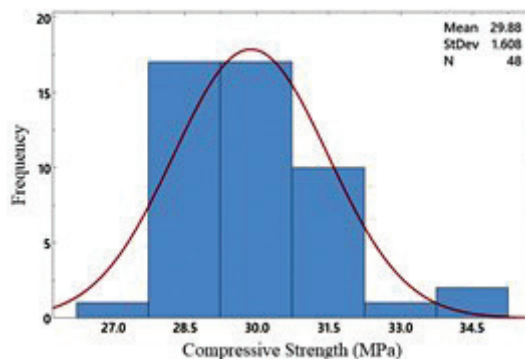


شکل ۶: نمودار تغییرات نسبی مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات

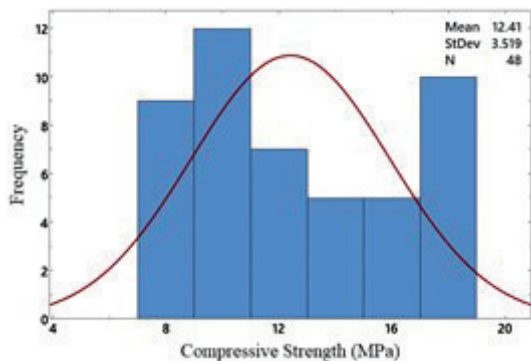
با استفاده از نمودار هیستوگرام می‌توان یک نگاه کلی به وضعیت فراوانی داده‌ها به صورت گروه‌بندی شده داشت. نمودار هیستوگرام آزمونه‌های فشاری بدون درز، با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب به همراه منحنی توزیع نرمال برازش شده هر حالت در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، تابع چگالی احتمال برای هر چهار حالت در شکل ۸ در یک نمودار ترسیم شده است. در نمودار تابع چگالی احتمال، محل قله نمودار معمولاً نمایانگر میانگین یا نقطه تجمع داده‌هاست و پراکندگی داده‌ها و انحراف معیار متناسب به پهنای منحنی است به نحوی که نمودار باریک و بلند نشان دهنده پراکندگی کم (انحراف معیار کم) و نمودار پهن و کوتاه نمایانگر پراکندگی زیاد (انحراف معیار زیاد) است که این توضیحات به طور کامل روی نمودار شکل ۸ قابل مشاهده است.



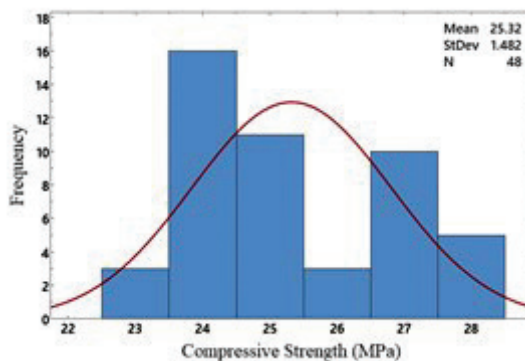
ب) با درز افقی



الف) بدون درز

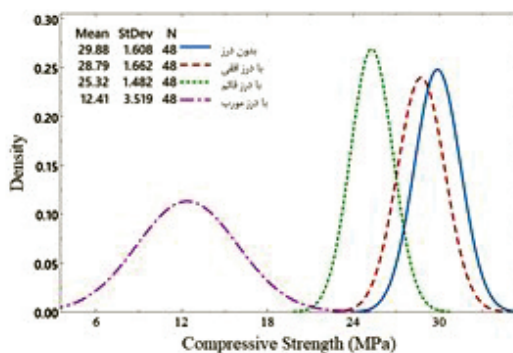


د) با درز مورب



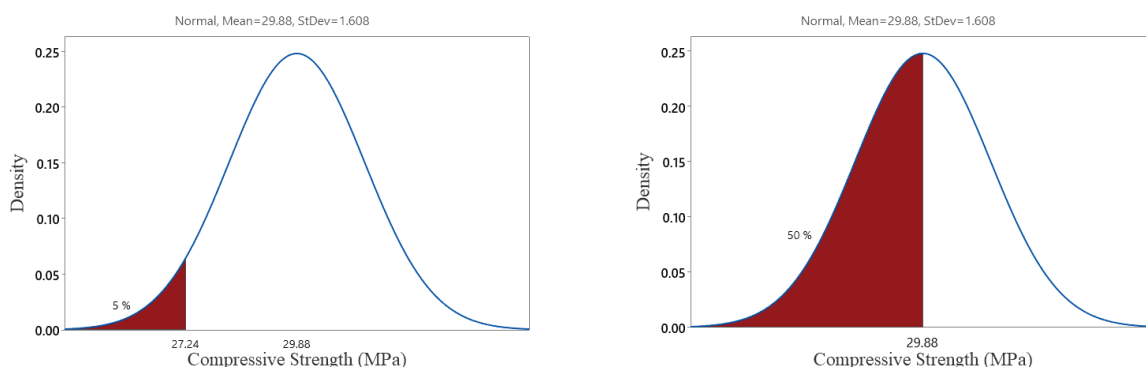
ج) با درز قائم

شکل ۷: هیستوگرام داده‌های مقاومت فشاری



شکل ۸: نمودار تابع چگالی احتمال برای آزمونه‌های فشاری

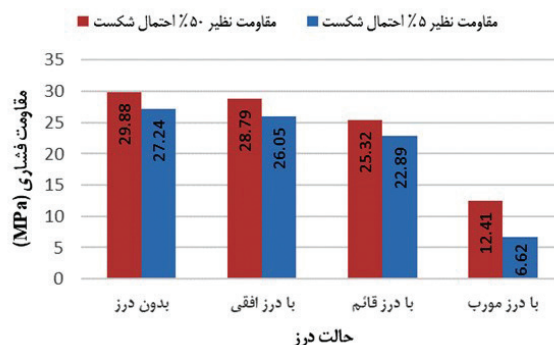
از آنجا که مقادیر میانگین مقاومتی که از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آیند از قطعیت بالایی برخوردار نیستند، معمولاً بطور مستقیم در کارهای طراحی قابل استفاده نیستند. در حقیقت با فرض نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها، مقدار میانگین قطعیتی معادل ۵۰٪ (احتمال شکست ۵۰٪) دارد که این میزان قطعیت (یا احتمال شکست) نمی‌تواند مناسبت در امر طراحی باشد. در حالی که در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی [۲۵-۲۷]، از مقاومت فشاری که ۹۵٪ از آزمون‌ها باید بیشتر یا برابر آن باشند (یا به عبارت دیگر، مقداری که فقط ۵٪ احتمال دارد آزمون‌های مقاومتی کمتر از آن داشته باشد) تحت عنوان مقاومت مشخصه استفاده می‌شود. در نمودار شکل ۹ مقادیر مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد به عنوان آزمون‌ها نشان داده شده است. همچنین در جدول ۵ و شکل ۱۰، مقادیر مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد برای حالت با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب در مقایسه با حالت بدون درز ارائه شده است. همان‌طور که از ویژگی‌های توزیع آماری قابل پیش‌بینی بود، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نظیر احتمال شکست ۵٪ نسبت به مقاومت فشاری میانگین برای حالت‌های بدون درز، با درز افقی، با درز قائم و با درز مورب به ترتیب ۸/۹، ۹/۵، ۹/۶ و ۴۶/۶ درصد کمتر بدست آمده است.



الف) احتمال شکست ۵۰٪
ب) احتمال شکست ۵٪
شکل ۹: مقادیر مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد برای آزمون بدون درز

جدول ۵: مقادیر مقاومت فشاری نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد

متغیر	بدون درز	با درز افقی	با درز قائم	با درز مورب
مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰٪ (MPa)	۲۹/۸۸	۲۸/۷۹	۲۵/۳۲	۱۲/۴۱
میزان کاهش نسبت به بدون درز (%)	-	۳/۷	۱۵/۳	۵۸/۵
مقاومت نظیر احتمال شکست ۵٪ (MPa)	۲۷/۲۴	۲۶/۰۵	۲۲/۸۹	۶/۶۲
میزان کاهش نسبت به بدون درز (%)	-	۴/۴	۱۶/۰	۷۵/۷



شکل ۱۰: مقادیر مقاومت فشاری نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد



ج) اعمال بارگذاری



ب) بتن‌ریزی نیمه L شکل



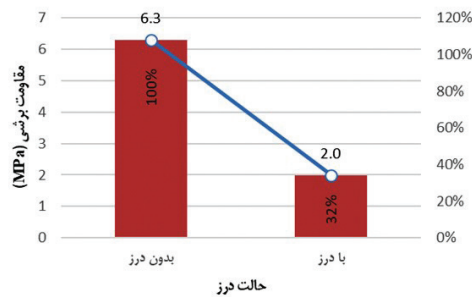
الف) آماده‌سازی قالب و میلگردها

شکل ۱۲: مراحل ساخت و آزمایش آزمون‌های Z-شکل

جدول ۶: داده‌های مقاومت برشی (MPa)

شماره آزمون	بدون درز	با درز
۱	۷/۸۵	۲/۲۱
۲	۵/۱۵	۰/۹۰
۳	۶/۱۳	۱/۳۱
۴	۶/۰۵	۲/۱۳
۵	۴/۵۸	۱/۰۶
۶	۷/۶۸	۰/۹۴
۷	۷/۹۳	۳/۱۱
۸	۷/۷۷	۳/۷۶
۹	۴/۶۲	۱/۳۵
۱۰	۵/۲۷	۳/۱۱

میانگین مقاومت برشی ۲۸ روزه آزمون‌های بدون درز و با درز به ترتیب ۶/۳۰ و ۱/۹۹ مگاپاسکال بدست آمده است. نمودار مقایسه مقاومت برشی شکل ۱۳ نشان می‌دهد با ایجاد درز سرد مقاومت برشی آزمون‌ها ۶۸/۵ درصد کاهش یافته است. این وضعیت را می‌توان تا حدودی با وضعیت آزمون‌های مکعبی با درز مورب که با کاهش حدود ۵۸/۵ درصدی مقاومت فشاری نسبت به آزمون‌های بدون درز بدست آمده بود مقایسه نمود. در این مقایسه باید به این نکته توجه داشت که در آزمون پوش آف، آزمون تحت برش خالص قرار می‌گیرد، اما در آزمون مکعبی با درز مورب، طبق قوانین مقاومت مصالح، با تبدیل تنش بر روی سطح واریز مورب (با زاویه ۴۵ درجه)، علاوه بر مؤلفه مماس بر سطح (تنش برشی)، مؤلفه عمود بر سطح (تنش نرمال فشاری) نیز وجود دارد.



شکل ۱۳: نمودار مقایسه متوسط مقاومت‌های برشی

خلاصه محاسبات آماری مقاومت برشی در جدول ۷ ارائه شده است. انحراف معیار و ضریب تغییرات آزمون‌های با درز به ترتیب با ۲۵/۲ درصد کاهش و ۱۳۷/۳ درصد افزایش نسبت به آزمون بدون درز بدست آمده است. به طور کلی مشاهده می‌شود که با ایجاد درز سرد در بتن، مقاومت برشی کاهش و ضریب تغییرات افزایش می‌یابد.

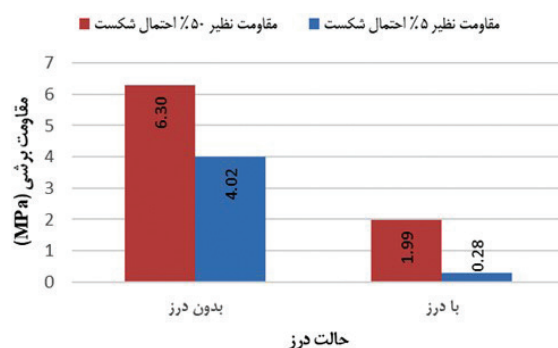
جدول ۷: خلاصه محاسبات آماری مقاومت برشی

متغیر	بدون درز	با درز
میانگین (MPa)	۶/۳۰	۱/۹۹
انحراف معیار (MPa)	۱/۳۹	۱/۰۴
ضریب تغییرات (%)	۲۲/۰	۵۲/۳

حال با فرض توزیع نرمال مقاومت برشی برای آزمون‌های Z-شکل، مقادیر مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد در جدول ۸ و نمودار شکل ۱۴ برای حالت با درز در مقایسه با حالت بدون درز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت برشی نظیر احتمال شکست ۵٪ نسبت به مقاومت برشی میانگین برای حالت‌های بدون درز و با درز به ترتیب ۳۶/۳ و ۸۶/۱ درصد کمتر بدست آمده است.

جدول ۸: مقادیر مقاومت برشی نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد

متغیر	بدون درز	با درز
مقاومت نظیر احتمال شکست ۵٪ (MPa)	۶/۰۳	۱/۹۹
میزان کاهش نسبت به بدون درز (%)	-	۸۶/۵
مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰٪ (MPa)	۴/۲۰	۰/۸۲
میزان کاهش نسبت به بدون درز (%)	-	۳۹/۱



شکل ۱۴: مقادیر مقاومت برشی نظیر احتمال شکست ۵۰ و ۵ درصد

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر درز سرد بر مقاومت مکانیکی بتن از طریق آزمایش‌های فشاری و برشی و تحلیل‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مکعبی بتن در چهار حالت مختلف شامل بدون درز، درز افقی، درز قائم و درز مورب و نمونه‌های Z-شکل در دو حالت با درز و بدون درز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

- ۱- ایجاد درز سرد منجر به کاهش محسوس مقاومت فشاری و برشی بتن می‌شود. بیشترین افت مقاومت فشاری در نمونه دارای درز مورب با کاهش حدود ۵۸/۵ درصد و بیشترین کاهش مقاومت برشی نیز در نمونه‌های Z-شکل دارای درز با کاهش حدود ۶۸/۵ درصد مشاهده شد.
 - ۲- با افزایش زاویه درز سرد نسبت به راستای تنش فشاری یا برشی، نه تنها مقاومت کاهش می‌یابد بلکه پراکندگی داده‌ها و ضریب تغییرات نیز افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده افزایش عدم قطعیت و کاهش قابلیت اعتماد آماری در نمونه‌های دارای درز است.
 - ۳- نتایج تحلیل آماری نشان داد که مقاومت نظیر احتمال شکست ۵ درصد (مبنای تعیین مقاومت مشخصه در آیین‌نامه‌ها) برای نمونه‌های دارای درز، به طور چشمگیری کمتر از نمونه‌های بدون درز نسبت به مقاومت نظیر احتمال شکست ۵۰ درصد (مقاومت میانگین) است. این افت برای نمونه دارای درز مورب به حدود ۴۷ درصد رسید.
 - ۴- در آزمایش پوش‌آف نیز مشاهده شد که درز سرد بدون آماده‌سازی سطح، تأثیر منفی شدیدی بر عملکرد اتصال دارد. افزایش ضریب تغییرات در نمونه دارای درز در مقایسه با بدون درز مؤید افزایش ناپایداری رفتاری در چنین شرایطی است.
 - ۵- با توجه به اینکه درز سرد غالباً در مرحله اجرا ایجاد می‌شود ولی در طراحی لحاظ نمی‌شود، بی‌توجهی به این پدیده می‌تواند منجر به تخمین‌های خوش‌بینانه و خطرناک در ظرفیت واقعی سازه شود. بنابراین، لازم است این پدیده به صورت جدی در طراحی، کنترل کیفی و اجرای سازه‌های بتنی مدنظر قرار گیرد.
- به طور کلی، این تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌های آماری می‌تواند تصویر کامل‌تری از رفتار بتن در حضور درز سرد ارائه دهد. تحلیل‌های آماری نشان دادند که با افزایش زاویه درز، علاوه بر کاهش مقاومت، پراکندگی داده‌ها و احتمال شکست نیز افزایش می‌یابد. این یافته، وجه تمایز تحقیق حاضر با مطالعات پیشین است که عمدتاً به مقایسه میانگین مقاومت بسنده کرده‌اند. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه مدل‌های قابلیت اعتماد و بازنگری در دستورالعمل‌های طراحی باشد.
- با توجه به یافته‌های این تحقیق، مواردی چون مطالعه ترکیبی اثر درز سرد و عوامل محیطی (مانند چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب یا حمله سولفات‌ها) و یا استفاده از افزودنی‌های بهبود دهنده چسبندگی (مانند پلیمرها یا نانو مواد) برای کاهش اثرات درز سرد به عنوان موضوعاتی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

۶- تشکر و قدردانی

کلیه مراحل پژوهش حاضر در آزمایشگاه بتن و مصالح دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرگز صورت گرفته است. بدین وسیله از همکاری و حمایت آن مجموعه محترم کمال تشکر و قدردانی را دارم.

۷- منابع

- [1] Hobbs, D., *Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk. International Materials Reviews*, 46(3), p. 117-144, 2001.
- [2] Gardner, D., et al., *A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. Case studies in construction materials*, 8, p. 238-247, 2018.
- [3] Juliafad, E., et al., *Concreting workmanship in Indonesia study case: Padang City, West Sumatra, Indonesia. International Journal on Advanced Science ,Engineering and Information Technology*, 9(1), p. 300-306, 2019.
- [4] Taheri, S., *A review on five key sensors for monitoring of concrete structures. Construction and Building Materials*, 204, p. 492-509, 2019.
- [5] Bekem Kara, İ., *Experimental investigation of the effect of cold joint on strength and durability of concrete. Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11), p. 10397-10408, 2021.
- [6] Júlio, E., F. Branco, and V. Silva, *Concrete-to-concrete bond strength: influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface. Magazine of concrete research*, 57(8), p. 463-468, 2005.
- [7] Julio, E.N., F.A. Branco, and V.t.D. Silva, *Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. Construction and building materials*, 18(9), p. 675-681, 2004.
- [8] Júlio, E., et al., *Accuracy of design code expressions for estimating longitudinal shear strength of strengthening concrete overlays. Engineering Structures*, 32(8), p. 2387-2393, 2010.
- [9] Tapkire, G. and S. Parihar, *Time laps and different joint affects quality of regular concrete. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 3(3), 2014.
- [10] Rath, V. and P. Kolase, *Effect of cold joint on strength of concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(9), p. 4671-4679, 2013.
- [11] Gerges, N.N., C.A. Issa, and S. Fawaz, *Effect of construction joints on the splitting tensile strength of concrete. Case Studies in Construction Materials*, 3, p. 83-91, 2015.
- [12] Lee, H.-S., H.-O. Jang, and K.-H. Cho, *Evaluation of bonding shear performance of ultra-high-performance concrete with increase in delay in formation of cold joints. Materials*, 9(5), p. 362, 2016.
- [13] Ohdaira, E. and N. Masuzawa. *Presuming the strength of concrete cold joint by ultrasound. in 2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 01CH37263). 2001. IEEE.*
- [14] Li, G., H. Xie, and G. Xiong, *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), p. 381-387, 2001.
- [15] Yoo, S.-W. and S.-J. Kwon, *Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffu-*

sion in concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 115, p. 247-255, 2016.

[16] Choi, S.-J., et al., *Analysis technique on water permeability in concrete with cold joint considering micro pore structure and mineral admixture. Advances in Materials Science and Engineering*, 2015(1), p. 610428, 2015.

[۱۷] جعفری، محمدحسین و همکاران، تأثیر وضعیت درز سرد بر مقاومت بتن. تحقیقات بتن، ۱۰(۴)، ۶۹-۶۱، ۲۰۱۸.

[۱۸] کریمی، احسان و کلات جاری، وحیدرضا، ارائه ی مدل عددی پیشنهادی برای شبیه‌سازی مود بازشدگی مکانیک شکست اتصال سرد بتنی. مجله ی مهندسی عمران شریف، ۳۶، ۲(۲۱)، ۷۰-۶۱، ۲۰۲۰.

[۱۹] کریمی، احسان و کلات جاری، وحیدرضا، شبیه‌سازی مود برشی مکانیک شکست در اتصال سرد بتنی. مصالح و سازه های بتنی، ۶(۱)، ۱۹-۵، ۲۰۲۱.

[۲۰] صرافی، علی و همکاران، کاهش آثار منفی درزهای ساخت در سازه‌های بتن غلتکی حجیم با استفاده از زئولیت. مجله ی مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، ۹۱-۸۱، ۲۰۲۳.

[۲۱] آتشی، امیر و همکاران، بررسی استفاده از راهکارهای بهبود دهنده رفتار لرزه‌ای قاب های بتنی دارای درز سرد. مهندسی سازه و ساخت، ۱۲(۰۳)، ۲۵، ۲۰۲۵.

[22] Ou, X., et al., *Effect of water-cement ratio on the bond strength of cold joint foam concrete and crack evolution characteristics. Journal of Building Engineering*, 95, p. 110267, 2024.

[23] Ali, Q.Q., B. Erdil, and T.M. Jassam, *Critical cold joint angle in concrete. Construction and Building Materials*, 409, p. 133881, 2023.

[24] Over, D., et al., *An experimental and numerical study on the effects of cold joint location and angle in concrete. Journal of Building Engineering*, 99, p. 111529, 2025.

[25] Institute, A.C., *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 2019.

[26] Standardization, E.C.f., *EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, 2004.

[27] Institution, B.S., *BS 8110-1:1997: Structural Use of Concrete - Part 1: Code of Practice for Design and Construction*, British Standards Institution, 1997.

[28] Association, C.S., *CSA A23.1-19: Concrete Materials and Methods of Concrete Construction*, Canadian Standards Association, 2019.

[29] Institute, A.C., *ACI 503R-93 (Reapproved 2016): Guide for the Selection of Polymer Adhesives with Concrete*, American Concrete Institute, 2016.

[30] Institution, B.S., *BS 6319-2:1983: Testing of Resin Compositions for Use in Construction - Part 2: Methods for Measurement of Mechanical Properties*, British Standards Institution, 1983.