



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Experimental Investigation of the Effect of Cold Joints on the Compressive and Tensile Strength of Concrete

Amir Atashi

Instructor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

Cold joint is one of the common construction challenges in concrete structures that can significantly reduce the mechanical strength of concrete, particularly under compressive and tensile stresses. The aim of this study is to investigate the effect of cold joints and to evaluate the performance of strengthening techniques, including shear keys and surface grooves, in improving the strength of specimens containing cold joints. In this study, a series of cubic specimens for compressive tests and cylindrical specimens for tensile tests were cast under controlled laboratory conditions. The specimens were categorized into four groups: monolithic concrete (without cold joint), concrete with a cold joint, and concrete with a cold joint strengthened by shear keys and surface grooves. The results of the tensile tests showed that the presence of a cold joint led to a 25% reduction in tensile strength compared with the control specimens. The use of shear keys reduced this loss to 10%, while surface grooves limited it to 17%. In the compressive tests, the specimens with a cold joint exhibited a 12% reduction in compressive strength compared to the monolithic specimens, whereas this reduction for the specimens with shear keys and surface grooves was 7% and 10%, respectively. Based on the obtained results, both strengthening methods demonstrated a significant improvement in mitigating the adverse effects of cold joints. Furthermore, comparison of the results indicates that cold joints have a smaller influence on compressive strength than on tensile strength, which highlights the greater sensitivity of the joint region to tensile stresses and underscores the need for more detailed investigation.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2026

Revise Date: 12 July 2026

Accept Date: 17 July 2026

Keywords:

*Cold Joint
Compressive Strength
Tensile Strength
Shear Key
Surface Groove*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.580401.3967>

*Corresponding author: amir atashi
Email address: aatashi@tvu.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر درز سرد بر مقاومت فشاری و کششی بتن

امیر آتشی

مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

درز سرد یکی از چالش‌های اجرایی رایج در سازه‌های بتنی است که می‌تواند تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت مکانیکی بتن، به‌ویژه در برابر نیروهای فشاری و کششی، داشته باشد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر درز سرد و ارزیابی عملکرد راهکارهای تقویتی شامل کلید برشی و شیار سطحی در بهبود مقاومت نمونه‌های دارای درز سرد است. برای این منظور، مجموعه‌ای از نمونه‌های مکعبی برای آزمون فشار و استوانه‌ای برای آزمون کشش در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی ساخته شد. نمونه‌ها در چهارگروه شامل بتن یکپارچه (بدون درز سرد)، بتن دارای درز سرد، و بتن دارای درز سرد تقویت‌شده با کلید برشی و شیار سطحی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های کششی نشان داد که وجود درز سرد موجب کاهش ۲۵ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است. استفاده از کلید برشی این کاهش را به ۱۰ درصد و شیار سطحی به ۱۷ درصد کاهش رساند. همچنین در آزمون فشاری، نمونه دارای درز سرد ۱۲ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه یکپارچه داشت، در حالی که این مقدار برای نمونه‌های دارای کلید برشی و شیار سطحی به ترتیب ۷ و ۱۰ درصد بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، هر دو روش تقویتی عملکرد قابل توجهی در بهبود اثرات منفی درز سرد نشان دادند. همچنین، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که درز سرد تأثیر کمتری بر مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی داشته است، که این موضوع بیانگر حساسیت بیشتر ناحیه درز سرد به تنش‌های کششی است.

کلمات کلیدی: درز سرد، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، کلیدبرشی، شیار سطحی

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۵/۰۲/۲۰	۱۴۰۵/۰۴/۲۱	۱۴۰۵/۰۴/۲۶	۱۴۰۵/۰۴/۲۶	۱۴۰۵/۰۷/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2026.580401.3967
نویسنده مسئول:		امیر آتشی			
پست الکترونیکی:		aatashi@tvu.ac.ir			

۱- مقدمه

درز سرد^۱ یکی از مسائل رایج و مهم در اجرای سازه‌های بتنی است که معمولاً در اثر توقف‌های ناخواسته یا برنامه‌ریزی‌شده در فرآیند بتن‌ریزی ایجاد می‌شود. هنگامی که لایه‌ای از بتن پیش از گیرش نهایی به‌طور کامل سخت شده و لایه‌ی جدیدی از بتن بر روی آن ریخته می‌شود، سطح تماس بین دو لایه به‌صورت ناپیوسته باقی می‌ماند. این ناپیوستگی به‌ویژه در ناحیه تماس دو لایه، می‌تواند موجب کاهش درگیری مکانیکی، پیوند شیمیایی ناکافی، و تمرکز تنش در مرز مشترک شود. در نتیجه، مقاومت نهایی بتن، به‌ویژه در برابر تنش‌های کششی و برشی، تحت تأثیر قرار گرفته و عملکرد کلی سازه ممکن است دچار افت قابل توجهی شود. این موضوع در سازه‌هایی که تحت بارهای متناوب، ضربه‌ای یا کششی قرار دارند اهمیت بیشتری می‌یابد و لزوم بررسی دقیق‌تر آن را دوچندان می‌کند [۶-۱].

از آنجا که بتن در سازه‌های واقعی معمولاً تحت ترکیبی از نیروهای فشاری، کششی و برشی قرار دارد، شناخت دقیق رفتار آن در حضور درز سرد، آن هم به تفکیک نوع مقاومت، ضرورتی فنی و علمی به شمار می‌رود. هدف از این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی تأثیر درز سرد بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی و ارزیابی عملکرد دو راهکار مکانیکی (کلید برشی و شیار سطحی) در کاهش این اثرات است. تمرکز اصلی بر این است که مشخص شود هر یک از این روش‌ها تا چه حد در بهبود رفتار نمونه‌های دارای درز سرد مؤثر بوده و آیا درز سرد اثر یکسانی بر مقاومت‌های مختلف بتن دارد یا خیر. در ادامه، با معرفی روش تحقیق، بررسی نتایج و تحلیل داده‌ها، تلاش شده است تا بر اساس نتایج تجربی، به درکی دقیق‌تر از رفتار بتن در شرایط ناپیوسته و امکان انتخاب بهینه راهکارهای اجرایی دست یابیم.

در سال‌های اخیر، راهکارهای مختلفی به‌منظور کاهش اثرات منفی ناشی از درز سرد مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به زبرسازی سطحی، استفاده از چسب‌های پلیمری، و به‌ویژه راهکارهای مکانیکی نظیر ایجاد کلید برشی یا شیار سطحی در لایه بتن سخت‌شده اشاره کرد. در مطالعه‌ای، اثرات ناپیوستگی ناشی از درزهای سرد بر عملکرد سازه‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق بر ارزیابی افت مقاومت فشاری و کششی بتن در شرایط وجود درز تمرکز دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که حضور درز سرد می‌تواند به‌طور محسوسی مقاومت و دوام سازه را تحت تأثیر منفی قرار دهد. بر این اساس، به‌کارگیری روش‌های اجرایی دقیق‌تر و بهره‌گیری از مواد اصلاح‌کننده به‌عنوان راهکارهایی برای کاهش این ضعف پیشنهاد شده است [۷].

خولیو^۲ و همکارانش به بررسی تأثیر روش‌های مختلف زبرسازی بر میزان چسبندگی بین دو لایه بتن پرداختند. در این مطالعه، نمونه‌هایی که سطح بتن زیرین آن‌ها با روش‌های متفاوتی زبر شده بود، تحت آزمون‌های کشش و برش شیب‌دار قرار گرفتند. پنج روش متفاوت برای ایجاد زبری در سطح بتن پایه مورد ارزیابی قرار گرفت که شامل: سطح بدون زبرسازی، زبرسازی با سنگ‌فرز و فرچه سیمی، ایجاد شیار و حفره با دستگاه تخریب سبک، ایجاد شیار و حفره به همراه اشباع سطح بتن پایه با آب به مدت ۲۴ ساعت پیش از بتن‌ریزی لایه دوم، و زبرسازی به وسیله ماسه‌پاشی بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد بیشترین میزان مقاومت چسبندگی در کشش و برش مربوط به نمونه‌هایی است که با روش ماسه‌پاشی زبر شده‌اند، در حالی که اشباع سطح بتن پایه تأثیر قابل توجهی بر مقاومت چسبندگی نداشته است [۸].

روی و لاسکار^۳ [۹] به تحلیل رفتار لرزه‌ای اتصال تیر به ستون با و بدون وجود درز سرد پرداختند. در این مطالعه، نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف مقاومت خمشی شامل ۲/۱، ۴/۱، ۷/۱ و ۲ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای درز سرد، ظرفیت اتلاف انرژی خود را بین ۲۴ تا ۴۹ درصد کمتر از نمونه‌های بدون درز سرد با نسبت‌های مشابه از دست می‌دهند. همچنین، کاهش شکل‌پذیری در این نمونه‌ها بین ۲۲ تا ۳۶ درصد نسبت به نمونه‌های بدون درز سرد مشاهده شد. کاهش سختی اولیه در نمونه‌های دارای درز سرد نیز قابل توجه بود، اما تفاوت معناداری در مقدار پیک بار بین نمونه‌های دارای و فاقد درز سرد به دست نیامد. علاوه بر این، چهار نمونه تیر با درصدهای مختلف آرماتور کششی تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند که در آن‌ها نیز کاهش پیک بار در نمونه‌های دارای درز سرد نسبت به نمونه‌های بدون درز سرد بسیار کم بود. در زمینه شبیه‌سازی عددی، مدل چسبناک برای نمایش درز سرد به‌ویژه در نرم‌افزار آباکوس کاربرد

¹ Cold Joint² Eduardo N.B.S. Julio³ Biswajit Roy, B. Roy, Aminul Islam Laskar

دارد. اصول پایه مدل چسبناک و مفهوم ناحیه چسبناک^۴ (CZM) توسط پژوهشگرانی مانند دوگدال^۵ [۱۰] و بارنبلات^۶ [۱۱] معرفی شده است. همچنین، پارک و همکاران [۱۲] تعدادی از روابط کشش-جدایش مورد استفاده در این مدل‌ها را در آباکوس معرفی و مقایسه کرده‌اند. برخی چالش‌ها و مسائل مرتبط با مدل‌های ناحیه چسبناک نیز توسط سلیوانف و چرنویوان^۷ [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی برای آنها ارائه شده است. همچنین، خصوصیات مکانیک شکست در ناحیه درز سرد توسط محققان متعددی از طریق آزمایشات سه‌نقطه‌ای خمشی روی تیرهای بتنی مطالعه شده است [۲۰-۱۴].

در تحقیق دیگری توسط آتشی و همکاران مدل آزمایشگاهی و عددی مدل سازی درز سرد و کاهش اثر درز سرد در قاب بتنی با استفاده از کلید برشی را پیشنهاد داده بود که این راهکار استفاده از کلید برشی، باعث افزایش ۲۴ درصدی شکل پذیری و ۳۳ درصدی انرژی اتلاف شده در قاب بتنی شده است [۲۱]. در پژوهشی مشابه دیگری به بررسی تأثیر استفاده از کلید برشی در اتصالات بتن دارای درز سرد پرداخته شد، نتایج این تحقیق نشان داد که به‌کارگیری کلید برشی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار اتصال و انتقال تنش میان دو لایه بتن ایفا کند. وجود کلید برشی با ایجاد درگیری مکانیکی بین لایه‌های بتن، موجب افزایش پیوستگی در محل اتصال شده و در نتیجه اثرات نامطلوب ناشی از درز سرد را کاهش می‌دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از کلید برشی به عنوان یک روش تقویتی می‌تواند عملکرد مکانیکی بتن در ناحیه درز سرد را بهبود داده و بخشی از افت مقاومت ناشی از این پدیده را جبران کند [۲۲].

با وجود آن‌که مطالعات پیشین به‌خوبی نشان داده‌اند که درز سرد موجب کاهش پیوستگی بین لایه‌های بتن و افت عملکرد مکانیکی می‌شود، خلأ اصلی در این حوزه آن است که بیشتر این پژوهش‌ها یا صرفاً بر شناسایی اثر منفی درز سرد تمرکز داشته‌اند، یا روش‌های بهسازی را به‌صورت جداگانه و بدون مقایسه مستقیم، تحت شرایط یکسان آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند؛ از این‌رو هنوز ارزیابی روشنی از میزان اثربخشی نسبی راهکارهای اجرایی ساده در اصلاح این ضعف وجود ندارد. تفاوت تحقیق حاضر با مطالعات قبلی در این است که علاوه بر بررسی خود ضعف ناشی از درز سرد، دو روش اصلاحی کاربردی شامل کلید برشی و شیار سطحی را به‌صورت مقایسه‌ای، در یک بستر آزمایشی یکسان و با تحلیل هم‌زمان مقاومت، الگوی شکست و پراکندگی آماری نتایج، ارزیابی می‌کند. اهمیت مقایسه کلید برشی و شیار سطحی نیز از آنجا ناشی می‌شود که این دو روش، با وجود سادگی و قابلیت اجرایی بالا، مبتنی بر دو سازوکار متفاوت در بهبود عملکرد در ناحیه درز هستند؛ به‌طوری‌که کلید برشی بیشتر از طریق درگیری مکانیکی و انتقال برش عمل می‌کند، در حالی که شیار سطحی با افزایش زبری و بهبود قفل‌وبست سطحی بر پیوستگی اثر می‌گذارد. بنابراین، مقایسه مستقیم این دو روش می‌تواند مشخص کند کدام راهکار در بازیابی مقاومت و کنترل مکانیزم شکست کارآمدتر است و در نتیجه مبنای مناسب‌تری برای تصمیم‌گیری‌های اجرایی و ترمیمی در اعضای بتنی فراهم آورد.

۲- مصالح

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است که از سیمان، سنگدانه، آب و در برخی موارد افزودنی‌ها تشکیل می‌شود و به دلیل مقاومت و دوام مناسب، نقش مهمی در صنعت ساخت‌وساز دارد. کیفیت و عملکرد بتن به نوع مصالح، طرح اختلاط و شرایط اجرا وابسته است. از آنجا که این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده، تمامی مصالح مصرفی پیش از استفاده تحت آزمایش‌های استاندارد قرار گرفتند تا مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها تعیین و انطباق آن‌ها با الزامات آیین‌نامه‌ای بررسی شود. در ادامه، مشخصات مصالح و نتایج آزمایش‌های مربوطه ارائه خواهد شد.

⁴ Cohesive Zone Model

⁵ Dugdale

⁶ Barenblat

⁷ Selivanov, Chornoivan

۱-۲ سیمان

سیمان یکی از اصلی ترین مواد تشکیل دهنده بتن است که به عنوان ماده چسباننده عمل می کند. مهم ترین نوع سیمان مورد استفاده در ساختمان سازی، سیمان پرتلند تیپ ۲ است که از پختن ترکیبی از کلسیم، سیلیکات، آلومینات و اکسیدهای دیگر در دمای بالا تولید می شود. هنگام مخلوط شدن با آب، سیمان واکنش هیدراتاسیون انجام می دهد که باعث سخت شدن و تشکیل ساختار جامد در بتن می شود. خواص سیمان نظیر زمان گیرش، مقاومت نهایی و میزان حرارت هیدراتاسیون، نقش تعیین کننده ای در کیفیت و عملکرد بتن دارند. در این پژوهش از سیمان با مشخصات فنی جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی سیمان پرتلند تیپ ۲.

نوع ماده	تیپ	وزن مخصوص	مدول نرمی	درصد مشخصات شیمیایی											
				CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
		$\frac{gr}{cm^3}$	$\frac{gr}{cm^3}$												
سیمان	۲	۳/۱۵۰	۳/۱۴	۶۳/۴	۲۰/۵	۴/۶	۲/۴	۱/۳	۰/۷	۴/۱	۰/۳۴	۵۹	۱۵	۵	۱۲

۲-۲ سنگدانه

سنگدانه ها در بتن یکی از مؤلفه های اساسی هستند که بیشترین حجم بتن را تشکیل داده و تأثیر مستقیمی بر مقاومت، دوام، کارایی و خواص مکانیکی آن دارند. سنگدانه ها به دو دسته درشت دانه و ریزدانه تقسیم می شوند در پدیده «قفل شدگی سنگدانه ها»، برجستگی ها و زبری های سطحی سنگدانه های دو بخش بتن در تماس در هم درگیر شده و در برابر لغزش مقاومت ایجاد می کنند. میزان این قفل شدگی به نسبت درشت دانه به ریزدانه، دانه بندی مصالح، میزان شن مصرفی و شکل سنگدانه ها وابسته است؛ به طوری که افزایش سهم سنگدانه های درشت و استفاده از سنگدانه های شکسته با بافت زبر، درگیری مکانیکی بیشتری ایجاد کرده و انتقال تنش برشی در برش سرد را تقویت می کند. بنابراین طرح اختلاط بتن نقش مستقیم در کیفیت این مکانیزم دارد و انتخاب طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش نیز با توجه به دستیابی به دانه بندی مناسب و ایجاد اسکلت سنگدانه ای پایدارتر برای تقویت قفل شدگی و بهبود مقاومت برشی انجام شده است. طبق استاندارد ASTM C33 درشت دانه ها شامل شن و سنگ های شکسته با اندازه ای بین ۴/۷۵ میلی متر (مانده روی الک نمره ۴) تا ۳۷/۵ میلی متر هستند که وظیفه افزایش مقاومت فشاری و کاهش تغییر شکل های بتن را بر عهده دارند. جدول ۲ دانه بندی درشت دانه استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است [۲۳].

ریزدانه ها معمولاً ماسه طبیعی یا ماسه شکسته با اندازه ای کمتر از ۴/۷۵ میلی متر (عبوری از الک نمره ۴) هستند که باعث افزایش تراکم، بهبود چسبندگی خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری بتن می شوند. جدول ۳ دانه بندی ریزدانه استفاده شده در این پژوهش را ارائه می کند.

جدول ۲: دانه بندی درشت دانه.

اندازه الک (میلی متر)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	درصد عبوری
۱۲/۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵	۱۲	۱۲	۸۸	۸۵-۱۰۰
۴/۷۵	۵۵	۶۷	۳۳	۱۰-۳۰
۲/۳۶	۲۲	۸۹	۱۱	۰-۱۰
۱/۱۸	۱۱	۱۰۰	۰	۰-۵

جدول ۳: دانه بندی ریزدانه.

اندازه الک (میلی متر)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	درصد عبوری (ASTM C33)
۹/۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۴/۷۵	۶	۶	۹۴	۹۵-۱۰۰
۲/۳۶	۶	۱۲	۸۸	۸۰-۱۰۰
۱/۱۸	۱۵	۲۷	۷۳	۵۰-۸۵
۰/۶	۱۸	۴۵	۵۵	۲۵-۶۰
۰/۳	۳۱	۷۶	۲۴	۵-۳۰
۰/۱۵	۲۴	۱۰۰	۰	۰-۱۰

۲-۳ آب

در این پژوهش، آب مورد استفاده، آب شرب شهر مشهد بوده است. آب شرب معمولاً از نظر پارامترهای شیمیایی نظیر سختی کل، قلیائیت، مقدار یون‌های کلرید، سولفات، نیتрат و مواد جامد محلول در محدوده قابل قبول برای تولید بتن قرار دارد. مقادیر این یون‌ها در آب شرب به‌طور معمول کمتر از حدود مجاز توصیه‌شده در استانداردهایی مانند ASTM C1602 و ASTM C94 است و بنابراین احتمال ایجاد واکنش‌های مخرب نظیر خوردگی آرماتور یا اختلال در فرآیند هیدراتاسیون سیمان را به حداقل می‌رساند. [۲۴-۲۵].

۳- بتن

طرح اختلاط بتن مورد استفاده در این پژوهش شامل ترکیب کنترل‌شده‌ای از سیمان، سنگدانه‌های ریز و درشت، آب است که با هدف دستیابی به کارایی مناسب، مقاومت مکانیکی مطلوب و یکنواختی در خواص بتن طراحی شده است. تعیین نسبت اجزای مخلوط بر اساس روش ارائه‌شده در آیین‌نامه ACI 211 و با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری هدف، اسلامپ مورد نیاز و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه انجام گرفته است. انتخاب این طرح اختلاط به‌گونه‌ای انجام شده است که بتن مرجع از خواص مکانیکی پایدار و قابل تکرار برخوردار باشد؛ به‌طوری‌که در ارزیابی رفتار نمونه‌ها، اثر متغیر مورد مطالعه یعنی وجود درز سرد به‌طور دقیق در نتایج آزمون‌های فشاری و کششی قابل بررسی و تحلیل باشد. جزئیات مربوط به مقادیر اجزای طرح اختلاط بتن در جدول ۴ ارائه شده است. [۲۶].

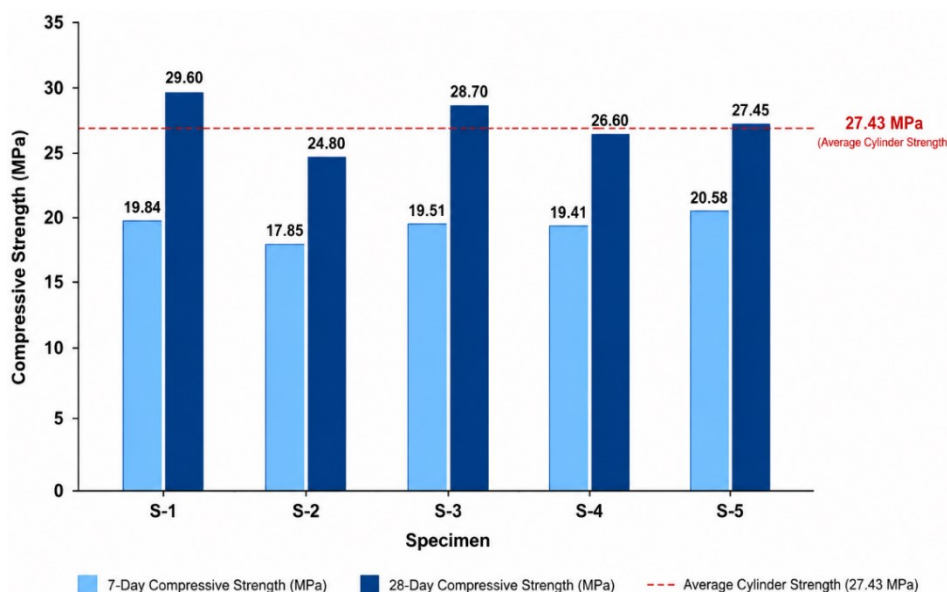
جدول ۴: طرح اختلاط بتن.

نسبت	آب	سیمان	ماسه (0-4 mm)	شن (4-20 mm)	اسلامپ (mm)
سیمان / آب	(لیتر)	نوع سیمان	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
۰/۴	۱۶۰	پرتلند تیپ ۲	۴۰۰	۷۹۵	۱۱۷۴
					۶۱

نمونه‌های بتن در سن ۷ روز برای بررسی مقاومت اولیه مورد آزمایش قرار گرفتند که این مقاومت حدوداً بین ۶۵ تا ۷۵ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه می باشد. علاوه بر این نمونه‌ها در سن ۲۸ روز آزمایش شدند که این بازه زمانی به عنوان دوره مرجع برای تعیین مقاومت نهایی بتن در نظر گرفته می شود. این آزمایش‌ها به منظور ارزیابی کامل توسعه خواص مکانیکی بتن و تعیین مقاومت نهایی آن در سازه‌ها اهمیت زیادی دارند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه شاهد (بدون درز سرد).

شماره نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری متوسط (تبدیل شده به نمونه استوانه ای)
S-1	۱۹/۸۴	۲۹/۶	۲۷/۴۳ (MPa)
S-2	۱۷/۸۵	۲۴/۸	
S-3	۱۹/۵۱	۲۸/۷	
S-4	۱۹/۴۱	۲۶/۶	
S-5	۲۰/۵۸	۲۷/۴۵	



شکل ۱: مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها.

افزایش پراکندگی نتایج در سن ۲۸ روز نسبت به ۷ روز را می‌توان به حساسیت بیشتر بتن بالغ به شرایط عمل‌آوری و تفاوت‌های جزئی در تراکم و رطوبت نمونه‌ها نسبت داد. در سنین اولیه، مقاومت عمدتاً تحت‌تأثیر واکنش‌های سریع فازهای اولیه سیمان است و بنابراین تغییرات کوچک محیطی اثر محدودی بر نتایج دارد؛ اما در ۲۸ روز ادامه هیدراتاسیون و تکامل ریزساختار بتن نسبت به یکنواختی رطوبت، ثبات دمایی و کیفیت نگهداری نمونه‌ها بسیار حساس‌تر است. به همین دلیل حتی اختلافات بسیار کوچک در رطوبت یا میزان اشباع نمونه‌ها می‌تواند منجر به افزایش انحراف معیار شود. با توجه به اینکه روند رشد مقاومت طبیعی بوده و مقادیر به‌دست‌آمده همچنان در محدوده قابل‌قبول قرار دارند، این پراکندگی ناشی از تفاوت‌های جزئی در شرایط عمل‌آوری و ساخت نمونه‌ها ارزیابی شده و بیانگر خطا در آزمایش یا ضعف طرح اختلاط نیست.

نمونه‌های مکعبی بتن پس از عمل‌آوری، به‌منظور تعیین مقاومت فشاری تحت آزمایش قرار گرفتند. آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی انجام شد که قابلیت اعمال بار فشاری یکنواخت و پیوسته تا مرحله گسیختگی نمونه را دارا می‌باشد. تصویری از نمونه‌های مکعبی و دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۲ ارائه شده است. تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در ارزیابی خواص مکانیکی و کنترل کیفیت بتن در سازه‌های بتنی به شمار می‌رود.



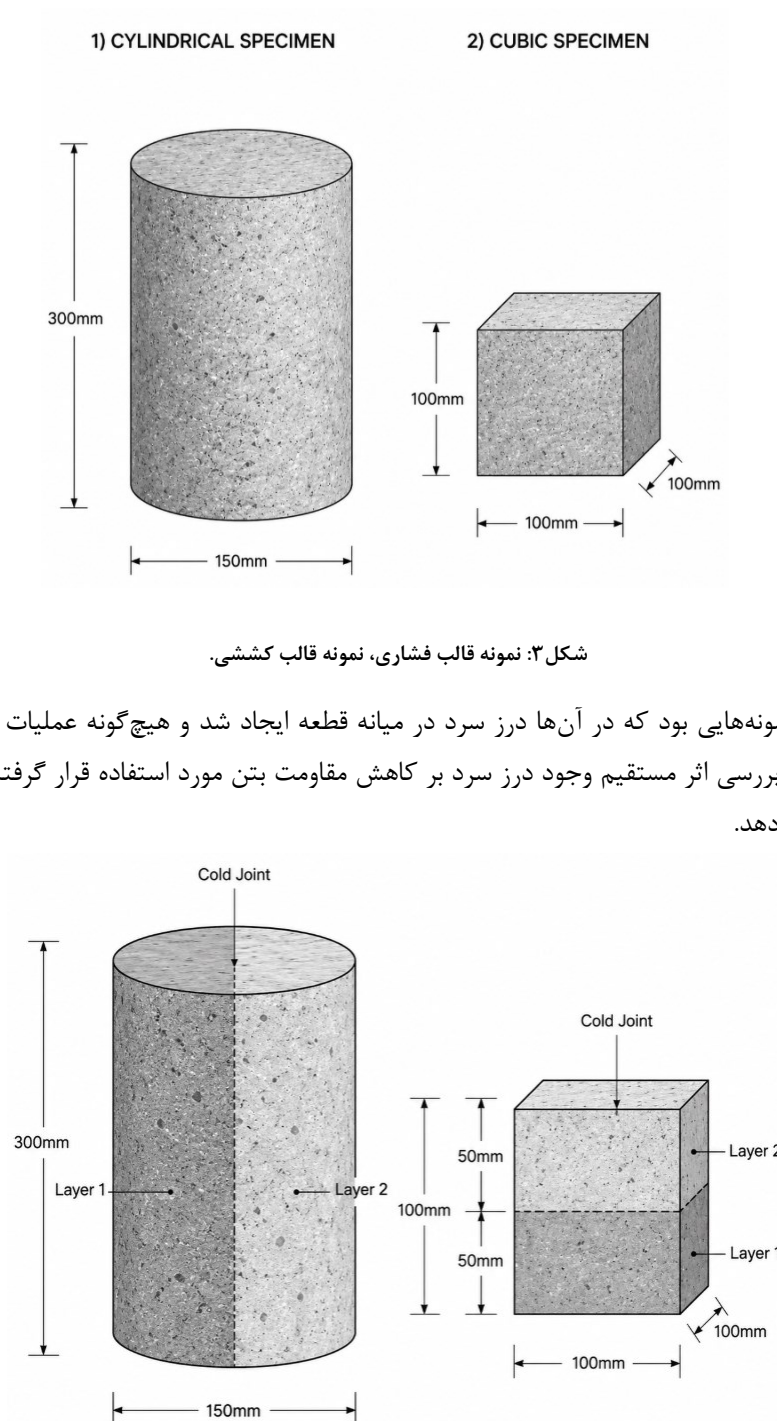
شکل ۲: آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها.

۴- نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر درز سرد بر رفتار مکانیکی بتن و ارزیابی کارایی روش‌های اصلاحی، نمونه‌ها در چهار گروه شامل نمونه شاهد (بدون درز سرد)، نمونه دارای درز سرد، نمونه دارای درز سرد با کلید برشی و نمونه دارای درز سرد با شیار سطحی ساخته شدند. از هر گروه و برای هر سن آزمایش، ۵ نمونه تهیه گردید تا امکان تحلیل آماری نتایج فراهم شود. برای تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر و برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 200×100 میلی‌متر استفاده شد [۲۷-۲۸].

به منظور ایجاد درز سرد، بتن‌ریزی در دو مرحله انجام گرفت؛ بدین ترتیب که ابتدا نیمی از قالب با بتن تازه پر شد و پس از گذشت ۴۸ ساعت، بتن‌ریزی لایه دوم انجام گردید تا شرایط تشکیل یک درز سرد واقعی شبیه‌سازی شود. در نمونه‌های دارای درز سرد ساده، هیچ‌گونه آماده‌سازی سطحی (نظیر زبرسازی، تمیزکاری یا اشباع سطحی) پیش از بتن‌ریزی مرحله دوم انجام نشد تا شرایط اجرا تا حد امکان با وضعیت‌های متداول کارگاهی که در آن وقفه بتن‌ریزی بدون تمهیدات خاص رخ می‌دهد، یکسان باشد.

-گروه اول شامل نمونه‌های شاهد بود که بدون هیچ‌گونه وقفه در فرآیند بتن‌ریزی ساخته شدند و فاقد درز سرد بودند؛ این نمونه‌ها به عنوان مبنای مقایسه برای سایر نمونه‌ها در نظر گرفته شدند. در شکل ۳، نمونه‌های شاهد مربوط به آزمون‌های مقاومت فشاری و کششی ارائه شده‌اند.

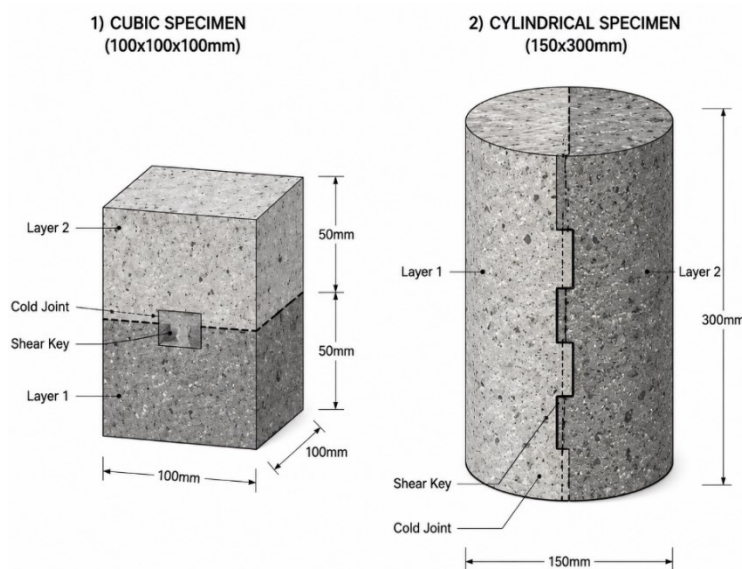


شکل ۳: نمونه قالب فشاری، نمونه قالب کششی.

-گروه دوم شامل نمونه‌هایی بود که در آن‌ها درز سرد در میانه قطعه ایجاد شد و هیچ‌گونه عملیات اصلاحی بر سطح درز انجام نگرفت؛ این نمونه‌ها به منظور بررسی اثر مستقیم وجود درز سرد بر کاهش مقاومت بتن مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۴ نمونه‌های دارای درز سرد در وسط را نشان می‌دهد.

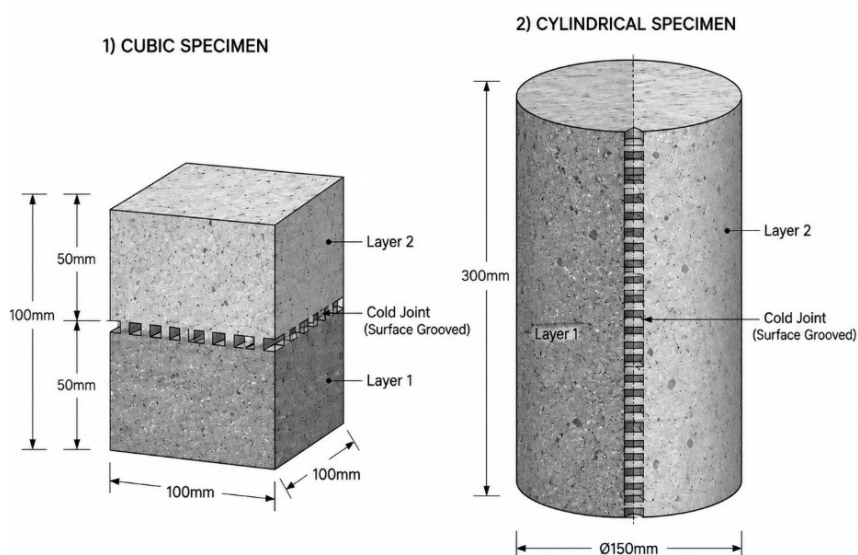
شکل ۴: نمونه قالب فشاری دارای درز سرد در وسط، نمونه قالب کششی دارای درز سرد در وسط.

-در گروه سوم، پس از ایجاد درز سرد، از کلید برشی در محل اتصال دو لایه بتن استفاده شد تا از طریق ایجاد درگیری مکانیکی و افزایش سطح تماس مؤثر، انتقال تنش در ناحیه درز بهبود یابد و اثرات منفی درز سرد کاهش پیدا کند. شکل ۵ نمونه های کششی و فشاری که دارای درز سرد هستند و برای اصلاح اثر از کلیدبرشی استفاده شده است ابعاد در نظر گرفته شده برای این نمونه یک مکعب ۳۰ در ۳۰ میلیمتر می باشد.



شکل ۵: نمونه قالب فشاری دارای درز سرد و کلید برشی، نمونه قالب کششی دارای درز سرد و کلید برشی.

-در گروه چهارم نیز با ایجاد شیارهای سطحی در محل درز، تلاش شد تا با افزایش زبری سطح و بهبود پیوستگی مکانیکی بین لایه های بتن، عملکرد اتصال تقویت شود. عمق شیار حدوداً ۱۰ میلیمتری در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نمونه های فشاری و کششی که دارای درز سرد هستند و با استفاده از شیار سطحی سعی بر بهبود اثر درز سرد بوده است را نشان می دهد.



شکل ۶: نمونه قالب فشاری دارای درز سرد و شیار سطحی، نمونه قالب کششی دارای درز سرد و شیار سطحی.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در چهار حالت مختلف، امکان ارزیابی میزان تأثیر درزسرد و همچنین بررسی کارایی روش‌های اصلاحی پیشنهادی را فراهم می‌کند. برای دستیابی به این هدف، فرآیند ساخت نمونه‌ها در هر گروه به صورت متفاوت و کنترل شده انجام شده است تا شرایط مورد نظر به طور دقیق شبیه سازی شود. به عنوان نمونه، در ساخت نمونه‌های دارای درزسرد در میانه قطعه، ابتدا لایه نخست بتن در قالب ریخته شد و به منظور جلوگیری از انتقال بتن به بخش دوم قالب، یک صفحه جداکننده (یونولیت) در محل مورد نظر قرار داده شد. پس از گذشت سه روز و حصول سخت‌شدگی اولیه لایه اول، صفحه جداکننده برداشته شده و لایه دوم بتن‌ریزی انجام شد. این روش باعث ایجاد یک سطح تماس واقعی بین دو بتن با فاصله زمانی قابل توجه شده و شرایط تشکیل درزسرد را به طور کامل در نمونه شبیه سازی می‌کند. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، این فرآیند به گونه ای طراحی شده است که اثر درزسرد بر رفتار مکانیکی بتن در آزمایش‌ها به طور دقیق قابل بررسی باشد.



شکل ۷: مراحل ساخت نمونه‌ها.

۵- بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش، به منظور افزایش دقت و قابلیت اعتماد نتایج، برای هر یک از چهار گروه نمونه‌ی بتنی (بتن یکپارچه، بتن دارای درزسرد، بتن دارای درزسرد تقویت شده با کلید برشی و بتن دارای درزسرد دارای شیار سطحی)، تعداد ۵ نمونه ساخته و آزمایش شده است. مقادیر گزارش شده برای مقاومت‌های فشاری و کششی، میانگین نتایج شکست این پنج نمونه در هر گروه می‌باشند. استفاده از میانگین پنج نمونه، موجب کاهش تأثیر خطاهای تصادفی، یکنواخت سازی نتایج و افزایش قابلیت اعتماد تحلیل‌های آماری می‌شود. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچه آب با دمای (23 ± 2) سانتی گراد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا شرایط عمل‌آوری استاندارد و رسیدن بتن به

مقاومت مرجع ۲۸ روزه که به عنوان سن معیار مقاومت فشاری تعریف می شود، تأمین گردد. رعایت این دوره ی عمل آوری و نگهداری در محیط اشباع، از نظر آیین نامه ای برای مقایسه ی صحیح نتایج و جلوگیری از تأثیر عوامل محیطی (همچون خشک شدن زود هنگام یا تغییرات دما و رطوبت) بر مقاومت نهایی بتن، امری ضروری است. بر این اساس، نتایج ارائه شده را می توان به عنوان مقاومت های ۲۸ روزه ی استاندارد، با سطح دقت مناسب و منطبق بر الزامات متعارف آزمایشگاهی و آیین نامه ای تلقی کرد. در ادامه، این نتایج میانگین برای گروه های مختلف نمونه ها به صورت کمی و تحلیلی مورد مقایسه قرار می گیرند.

۵-۱ نتایج آزمون فشاری

مقاومت فشاری به عنوان کلیدی ترین پارامتر در تعیین کیفیت و عملکرد سازه ای بتن، به شدت تحت تأثیر یکپارچگی ساختار داخلی آن قرار دارد. وجود درز سرد به دلیل ایجاد یک فصل مشترک ضعیف در بدنه بتن، می تواند باعث اختلال در انتقال یکنواخت بار و تغییر در الگوی شکست نمونه ها شود. در این بخش، تأثیر درز سرد و عملکرد راهکارهای تقویتی شامل کلید برشی و شیار سطحی بر ظرفیت باربری فشاری نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با استانداردهای آزمایشگاهی، برای دستیابی به نتایج دقیق و کاهش خطاهای احتمالی، از هر گروه ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمون ها به همراه میانگین مقاومت فشاری هر گروه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: نتایج مقاومت فشاری نمونه ها.

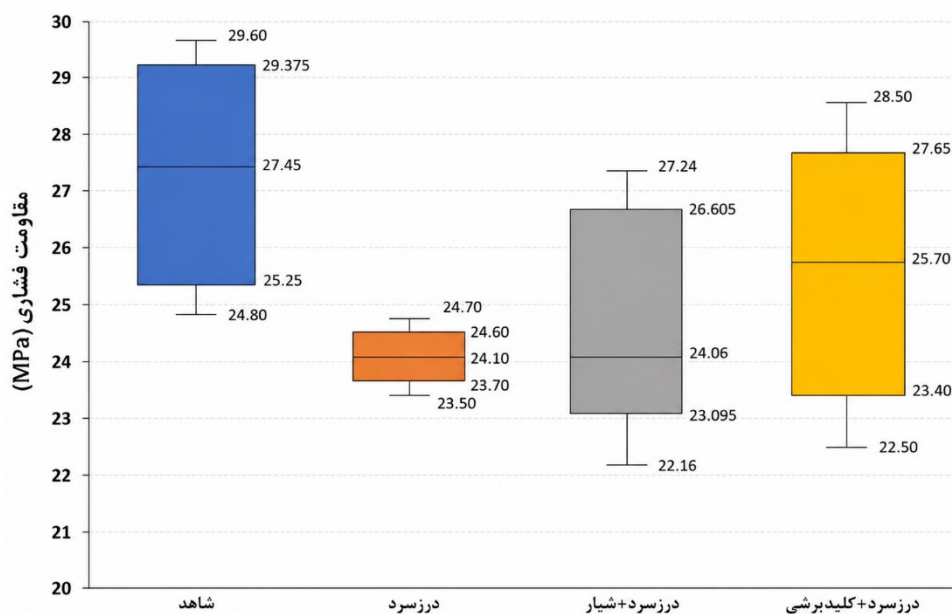
درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد	ضریب تغییر COV%	انحراف معیار SD	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	نمونه ۵ (MPa)	نمونه ۴ (MPa)	نمونه ۳ (MPa)	نمونه ۲ (MPa)	نمونه ۱ (MPa)	نوع نمونه
---	۶/۸۰	۱/۸۷	۲۷/۴۳	۲۴/۸	۲۶/۶	۲۷/۴۵	۲۸/۷	۲۹/۶	بتن یکپارچه (شاهد)
۱۲٪	۱/۹۱	۰/۴۶	۲۴/۱۴	۲۳/۵۰	۲۳/۹۰	۲۴/۱۰	۲۴/۵۰	۲۴/۷۰	دارای درز سرد
۷٪	۸/۷۱	۲/۲۲	۲۵/۵۱	۲۲/۵۰	۲۴/۳۰	۲۵/۷۰	۲۶/۸۰	۲۸/۲۵	درز سرد + کلید برشی
۱۰٪	۷/۹۴	۱/۶۶	۲۴/۶۹	۲۲/۱۶	۲۴/۰۳	۲۴/۰۶	۲۵/۹۷	۲۷/۲۴	درز سرد + شیار سطحی

$$\text{Mean } \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad \text{standard deviation } S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad \text{coefficient of variation } V = \left(\frac{S}{\bar{x}}\right) \times 100$$

نتایج آزمون مقاومت فشاری نشان داد که نمونه شاهد (بتن یکپارچه) با مقاومت ۲۷/۴۳ مگاپاسکال بیشترین ظرفیت باربری را دارد که ناشی از پیوستگی کامل ماتریس بتن است. ایجاد درز سرد باعث کاهش مقاومت فشاری به ۲۴/۱۴ مگاپاسکال شد که معادل ۱۲ درصد افت مقاومت نسبت به نمونه شاهد است و بیانگر نقش درز سرد به عنوان یک ناحیه ضعف در بتن و محل تمرکز تنش می باشد. در نمونه های تقویت شده با کلید برشی، مقاومت فشاری به ۲۵/۵۱ مگاپاسکال رسید که تنها ۷ درصد کاهش نسبت به بتن یکپارچه نشان می دهد و بیانگر بهبود انتقال تنش به دلیل درگیری مکانیکی بین لایه ها است. همچنین در نمونه های دارای شیار سطحی مقاومت فشاری ۲۴/۶۹ مگاپاسکال به دست آمد که نشان دهنده ۱۰ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد است. هرچند افزایش زبری سطح موجب بهبود نسبی چسبندگی شده، اما به دلیل نبود قفل شدگی مکانیکی عمیق، عملکرد آن نسبت به کلید برشی محدودتر بوده است. نتایج آماری نشان داد که میانگین مقاومت فشاری از نظر پراکندگی، نمونه شاهد دارای SD برابر ۱/۸۷ و COV برابر ۶/۸۰٪ بود، در حالی که نمونه دارای درز سرد کمترین پراکندگی

را با SD برابر ۰/۴۶ و COV برابر ۱/۹۱٪ نشان داد. این کاهش پراکندگی را می‌توان ناشی از ایجاد یک سطح ضعف مشخص و هدایت مسیر شکست به ناحیه درز سرد دانست. در مقابل، استفاده از کلید برشی و شیار سطحی موجب افزایش دوباره پراکندگی شد که می‌تواند به پیچیدگی رفتار شکست، تفاوت در تمرکز تنش و حساسیت بیشتر نمونه‌ها به جزئیات اجرایی نسبت داده شود.

شکل ۸ نتایج آزمون فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۸: مقایسه مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ها.

۵-۲ الگوی شکست در آزمایش مقاومت فشاری

بررسی الگوهای شکست در آزمون مقاومت فشاری نشان داد که وجود درز سرد و روش تقویت آن تأثیر زیادی بر نوع گسیختگی دارد. در نمونه شاهد، شکست به صورت معمول بتن تحت فشار و با ترک‌های مورب در توده بتن رخ داد که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت تنش است. در نمونه‌های دارای درز سرد، شکست عمدتاً از محل درز آغاز شده و در امتداد آن گسترش یافت که بیانگر تمرکز تنش و ضعف چسبندگی بین لایه‌هاست و رفتار تردتری ایجاد می‌کند. استفاده از کلید برشی باعث تغییر الگوی شکست به حالت ترکیبی در درز و توده بتن و بهبود انتقال تنش شد. در نمونه‌های دارای شیار سطحی نیز تمرکز ترک‌ها در ناحیه درز باقی ماند، اما شدت و سرعت گسیختگی کاهش یافت. در مجموع، روش‌های تقویتی می‌توانند با کاهش تمرکز تنش در درز سرد، رفتار شکست را به بتن یکپارچه نزدیک‌تر کنند. شکل ۹ و ۱۰ الگوی شکست آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۹: الگوی شکست فشاری نمونه شاهد.



شکل ۱۰: الگوی شکست فشاری نمونه دارای درز سرد.

۳-۵ نتایج آزمون کششی

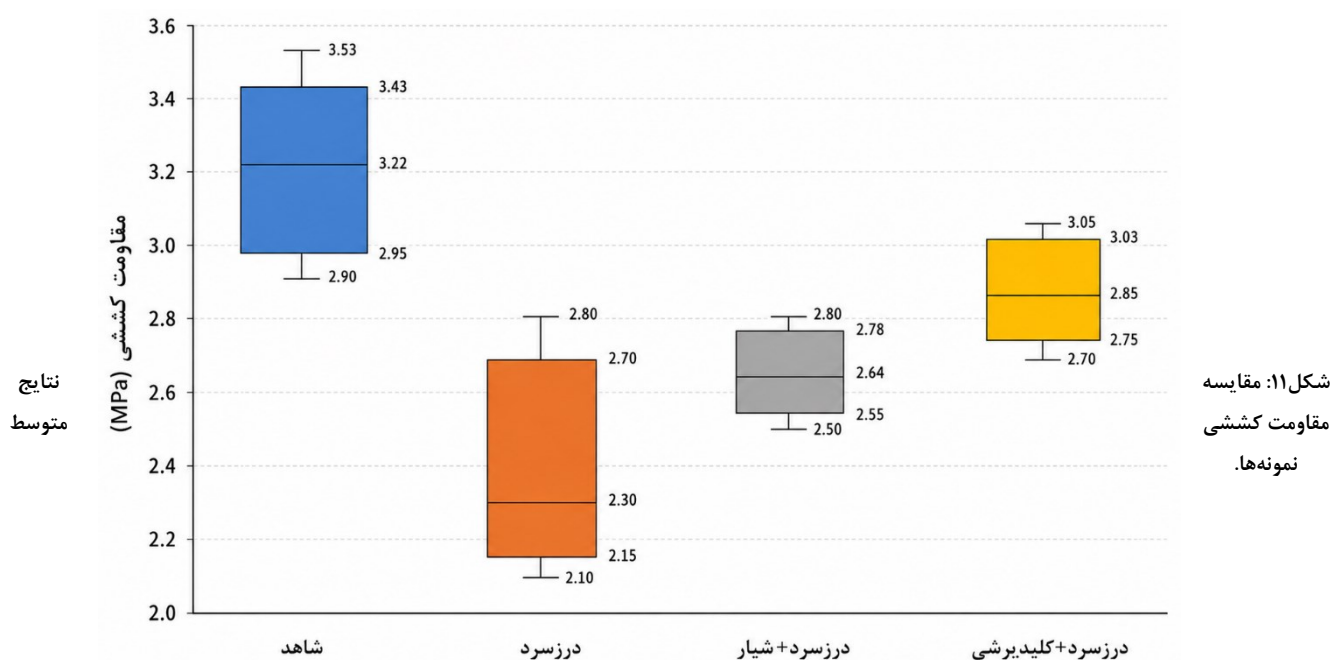
نتایج آزمون مقاومت کششی نشان داد که نمونه شاهد دارای مقاومت کششی برابر با $3/2$ مگاپاسکال بوده است. ایجاد درز سرد موجب کاهش این مقدار به $2/4$ مگاپاسکال گردید که بیانگر ۲۵ درصد افت مقاومت کششی نسبت به بتن یکپارچه است. این کاهش قابل توجه نشان می‌دهد که درز سرد به عنوان یک ناحیه ناپیوستگی، پیوستگی بین لایه‌های بتن را مختل کرده و باعث تمرکز تنش و آغاز شکست در محل اتصال می‌شود. در نمونه‌های تقویت شده با کلید برشی، مقاومت کششی به $2/88$ مگاپاسکال افزایش یافت که تنها ۱۰ درصد کمتر از نمونه شاهد است. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از کلید برشی توانسته است بخش عمده‌ای از افت مقاومت ناشی از درز سرد را جبران کند و با ایجاد درگیری مکانیکی مناسب، انتقال تنش کششی در محل درز را بهبود بخشد. در نمونه‌های دارای شیار سطحی، مقاومت کششی

برابر با ۲/۶۶ مگاپاسکال اندازه گیری شد که نشان دهنده ۱۷ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد است. اگرچه ایجاد زبری سطحی باعث بهبود عملکرد نسبت به نمونه دارای درز سرد بدون تقویت شده است، اما میزان تأثیر آن در مقایسه با کلید برشی کمتر بوده و نمی تواند به طور کامل

نوع نمونه	نمونه ۱ (MPa)	نمونه ۲ (MPa)	نمونه ۳ (MPa)	نمونه ۴ (MPa)	نمونه ۵ (MPa)	انحراف معیار SD	ضریب تغییر COV%	میانگین مقاومت کششی (MPa)	درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد
بتن یکپارچه (شاهد)	۲/۹	۳/۰	۳/۳۳	۳/۲۲	۳/۵۳	۰/۲۴	۷/۴	۳/۲	---
دارای درز سرد	۲/۸	۲/۶	۲/۳	۲/۲	۲/۱	۰/۲۵	۱۰/۶	۲/۴	۲۵٪
درز سرد + کلید برشی	۳/۰۵	۳	۲/۸۵	۲/۸	۲/۷	۰/۱۳	۴/۴	۲/۸۸	۱۰٪
درز سرد + شیار سطحی	۲/۸	۲/۷۶	۲/۶۴	۲/۶	۲/۵	۰/۱۰	۳/۷	۲/۶۶	۱۷٪

تمرکز تنش در محل درز را کنترل کند. جدول ۷ مقادیر مقاومت کششی و شکل ۱۱ مقایسه متوسط مقاومت های کششی را نشان می دهد.

جدول ۷: نتایج مقاومت کششی نمونه ها.



۵-۴ الگوی شکست در آزمایش مقاومت کششی

در بررسی الگوی شکست نمونه‌ها در آزمون مقاومت کششی مشاهده شد که محل و نحوه گسیختگی به‌طور مستقیم تحت تأثیر وجود درز سرد و نوع تقویت آن قرار دارد. در نمونه‌های شاهد (شکل ۱۲)، شکست معمولاً در ناحیه میانی نمونه و در داخل توده بتن رخ داد و ترک اصلی به‌صورت نسبتاً یکنواخت و عمود بر راستای تنش کششی گسترش یافت. این نوع شکست نشان‌دهنده پیوستگی مناسب اجزای بتن و توزیع یکنواخت تنش در کل مقطع است. در مقابل، در نمونه‌های دارای درز سرد، گسیختگی عمدتاً از محل درز سرد آغاز شده و ترک در امتداد این سطح گسترش یافت. این رفتار نشان می‌دهد که درز سرد به‌عنوان یک سطح ضعیف عمل کرده و به دلیل کاهش چسبندگی بین لایه‌های بتن، تمرکز تنش در این ناحیه افزایش یافته است؛ بنابراین شکست در بیشتر موارد به‌صورت جدایش در امتداد صفحه درز اتفاق افتاد. در نمونه‌های تقویت‌شده با کلید برشی، الگوی شکست تا حدی تغییر کرد (شکل ۱۳-۱۴)؛ به‌گونه‌ای که ترک‌ها تنها در امتداد درز متمرکز نبودند و بخشی از گسیختگی در داخل توده بتن نیز مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که کلید برشی با ایجاد درگیری مکانیکی بین لایه‌ها توانسته است انتقال تنش را بهبود داده و از تمرکز کامل تنش در محل درز جلوگیری کند. در نمونه‌های دارای شیار سطحی نیز اگرچه چسبندگی بین لایه‌ها نسبت به حالت بدون تقویت افزایش یافت، اما ترک‌ها همچنان تمایل به گسترش در امتداد درز داشتند و در بسیاری از موارد شکست از همان ناحیه آغاز شد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که وجود درز سرد موجب تغییر الگوی شکست از گسیختگی در توده بتن به گسیختگی در سطح اتصال می‌شود، در حالی که استفاده از روش‌های تقویتی، به‌ویژه کلید برشی، می‌تواند این تمرکز تنش را کاهش داده و رفتار شکست را به حالت نزدیک‌تر به بتن یکپارچه هدایت کند.



شکل ۱۲: الگوی شکست کششی نمونه شاهد.



شکل ۱۳: الگوی شکست نمونه دارای کلیدبرشی.



شکل ۱۴: الگوی شکست نمونه دارای درز سرد.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر درز سرد بر رفتار مکانیکی بتن و ارزیابی کارایی برخی روش‌های بهبود اتصال بین لایه‌های بتن، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شد. بدین منظور چهار گروه نمونه شامل بتن یکپارچه به عنوان نمونه شاهد، بتن دارای درز سرد، بتن دارای درز سرد تقویت شده با کلید برشی و بتن دارای درز سرد با شیار سطحی ساخته شد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایش‌های

مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفت و علاوه بر مقادیر مقاومت، الگوی شکست نمونه‌ها نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت تا تأثیر درز سرد و روش‌های تقویتی بر عملکرد مکانیکی بتن به‌طور دقیق ارزیابی شود.

۱- مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درز سرد نسبت به شاهد کاهش یافت، اما به‌کارگیری روش‌های تقویتی، شدت این کاهش را کم کرد. استفاده از کلید برشی، کاهش مقاومت فشاری را از ۱۲٪ به حدود ۷٪ و شیار سطحی این کاهش را به حدود ۱۰٪ رساند؛ بنابراین هر دو روش باعث بهبود نسبی مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درز سرد شده‌اند، هرچند کلید برشی اثر کاهنده‌تری بر افت مقاومت دارد.

۲- الگوی شکست نشان داد که در نمونه شاهد، ترک‌ها به‌صورت مورب و در داخل توده بتن و دور از هر سطح ضعف ایجاد می‌شوند. با ایجاد درز سرد، مسیر شکست به سمت سطح درز منتقل شده و گسیختگی عمدتاً در امتداد آن رخ می‌دهد. به‌کارگیری کلید برشی و شیار سطحی این الگو را تغییر داده و با بهبود درگیری مکانیکی و چسبندگی در سطح اتصال، بخشی از شکست از ناحیه درز به داخل توده بتن منتقل شده است که بیانگر بهبود نسبی انتقال تنش در نمونه‌های اصلاح‌شده است.

۳- اثر درز سرد بر مقاومت کششی شدیدتر از مقاومت فشاری است، زیرا این ناحیه به‌عنوان یک سطح ضعف عمل کرده و ترک‌های کششی به‌راحتی در امتداد آن گسترش می‌یابند، در حالی‌که در بارگذاری فشاری بخشی از تنش از طریق تماس فشاری و قفل‌وبست سنگدانه‌ها منتقل می‌شود. مقاومت کششی نمونه شاهد ۲/۳ مگاپاسکال به‌دست آمد. ایجاد درز سرد این مقدار را به ۴/۲ مگاپاسکال (کاهش حدود ۲۵٪) رساند. استفاده از کلید برشی، مقاومت را به ۲/۸۸ مگاپاسکال (کاهش حدود ۱۰٪) و شیار سطحی به ۲/۶۶ مگاپاسکال (کاهش حدود ۱۷٪) افزایش داد. بنابراین هر دو روش، افت مقاومت کششی ناشی از درز سرد را کاهش داده‌اند، با این تفاوت که کلید برشی در بازیابی مقاومت کششی مؤثرتر از شیار سطحی است.

۴- الگوی شکست در آزمون کششی نشان داد که در نمونه شاهد، ترک اصلی از ناحیه میانی آغاز شده و به‌صورت نسبتاً یکنواخت در امتداد قطر نمونه گسترش می‌یابد. با ایجاد درز سرد، شروع و گسترش ترک عمدتاً به محل اتصال دو لایه محدود شد که بیانگر تمرکز تنش و ضعف چسبندگی در ناحیه درز است. در نمونه‌های تقویت‌شده با کلید برشی، بخشی از ترک‌ها به داخل توده بتن منتقل شد و نشان‌دهنده بهبود انتقال تنش بود، در حالی‌که در نمونه‌های دارای شیار سطحی، مسیر شکست هنوز تا حد زیادی در امتداد درز باقی ماند.

۵- تحلیل آماری نتایج نشان داد که وجود درز سرد به دلیل ایجاد یک سطح ضعف ساختاری مطلق، مسیر شکست را کاملاً به خود تحمیل کرده و موجب کاهش کاذب انحراف معیار می‌شود. در آزمایش فشاری، استفاده از کلید برشی و شیار سطحی با شکستن این سطح ضعیف و درگیر کردن بخش‌های بیشتری از توده بتن، توزیع تنش را پیچیده‌تر کرده که منجر به افزایش انحراف معیار نسبت به حالت درز سرد ساده شده است.

۶- بررسی الگوی شکست و مقایسه روش‌های اصلاحی نشان داد که در نمونه‌های دارای درز سرد، شکست عمدتاً در امتداد سطح درز رخ می‌دهد؛ در حالی‌که استفاده از روش‌های اصلاحی، به‌ویژه کلید برشی، با ایجاد درگیری مکانیکی مؤثرتر نسبت به شیار سطحی، موجب توزیع بهتر تنش در توده بتن، کاهش تمرکز تنش در محل درز و گسترش ترک‌ها در حجم بیشتری از بتن شده است.

۷- پیشنهادهای کاربردی و اجرایی

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، پیشنهاد می‌شود در اجرای سازه‌های بتنی، برنامه‌ریزی بتن‌ریزی به نحوی انجام گیرد که از تشکیل درز سرد تا حد امکان جلوگیری شود. در مواردی که ایجاد درز سرد اجتناب‌ناپذیر است، لازم است محل آن در نواحی با تنش کمتر انتخاب شده و از استقرار آن در نواحی بحرانی سازه‌ای جلوگیری شود. همچنین، آماده‌سازی مناسب سطح بتن قدیم از طریق زبرسازی،

شیارزنی یا سایر روش‌های مکانیکی می‌تواند پیوستگی بین دو لایه بتن را بهبود بخشد. استفاده از کلید برشی در محل‌هایی که انتقال برش اهمیت دارد نیز از دیگر راهکارهای قابل توصیه است. افزون بر این، اعمال کنترل کیفیت دقیق در محل درزهای اجرایی، شامل کنترل وضعیت سطح، زمان‌بندی بتن‌ریزی مجدد و نحوه تراکم بتن تازه، می‌تواند در کاهش افت مقاومت ناشی از درز سرد مؤثر باشد.

از سوی دیگر، طرح اختلاط بتن نیز نقش مهمی در عملکرد ناحیه درز دارد؛ به گونه‌ای که نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، نوع سنگدانه‌ها، کارایی مخلوط و استفاده از افزودنی‌های معدنی یا شیمیایی می‌تواند بر میزان چسبندگی بین بتن قدیم و جدید اثر مستقیم بگذارد. به‌ویژه، طرح اختلاط‌های با کارایی مناسب و خمیر سیمانی کافی، امکان نفوذ بهتر بتن تازه به ناهمواری‌های سطحی و در نتیجه ایجاد اتصال مؤثرتر در محل درز سرد را فراهم می‌کنند. بنابراین، علاوه بر اصلاح سطح و تمهیدات اجرایی، انتخاب طرح اختلاط مناسب نیز یکی از عوامل کلیدی در کاهش افت مقاومت ناشی از درز سرد به شمار می‌رود.

۸-مراجع

- [1] G. L. Golewski, "Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash using digital image techniques," *Measurement*, vol. 135, pp. 96–105, 2019.
- [2] J. C. Kishen and P. S. Rao, "Fracture of cold jointed concrete interfaces," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 1, pp. 122–131, 2007.
- [3] Y. M. Lim, M. K. Kim, and S. K. Shin, "Numerical simulation for quasi-brittle interface fracture in cementitious bi-material system," in *Proc. 4th Int. Conf. Fracture Mechanics of Concrete Structures*, vol. 1, pp. 73–80, 2001.
- [4] S. G. Shah and J. C. Kishen, "Fracture behavior of concrete–concrete interface using acoustic emission technique," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, no. 6, pp. 908–924, 2010.
- [5] H. P. Stang, S. N. Spiesz, and J. Bijen, "Evaluating the durability of concrete with cold joints under various environmental conditions," *Cement and Concrete Research*, 2016.
- [6] V. R. Rathi and P. Kolase, "Effects of cold joints on the structural integrity of reinforced concrete members," *Cement and Concrete Composites*, 2013.
- [7] J. L. Clarke and R. E. Hobbs, "Effects of cold joints on the structural integrity of reinforced concrete members," *Cement and Concrete Composites*, 2015.
- [8] E. N. B. S. Julio, F. A. Branco, and V. D. Silva, "Concrete-to-concrete bond strength: Influence of the roughness of the substrate surface," *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 9, pp. 675–681, 2004.
- [9] B. Roy and A. Islam Laskar, "Cyclic behavior of in-situ exterior beam-column subassemblies with cold joint in column," *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 822–833, 2017.
- [10] D. S. Dugdale, "Yielding of steel sheets containing slits," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100–104, 1960.
- [11] G. I. Barenblatt, "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture: General ideas and hypotheses, axially symmetric cracks," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, no. 3, pp. 622–636, 1959.
- [12] K. Park, H. Choi, and G. H. Paulino, "Assessment of cohesive traction–separation relationships in ABAQUS: A comparative study," *Mechanics Research Communications*, vol. 78, pp. 71–78, 2016.
- [13] M. F. Selivanov and Y. O. Chornoivan, "A semi-analytical solution method for problems of cohesive fracture and some of its applications," *International Journal of Fracture*, vol. 212, no. 2, pp. 113–121, 2018.
- [14] S. Muralidhara, B. K. Raghu Prasad, and H. Eskandari, "Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 4, pp. 479–486, 2010.

- [15] K. Park, G. H. Paulino, and J. Roesler, "Cohesive fracture model for functionally graded fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 6, pp. 956–965, 2010.
- [16] C. G. Hoover and Z. P. Bažant, "Comprehensive concrete fracture tests: Size effects of types 1 and 2, crack length effect and post-peak behavior," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 110, pp. 281–289, 2013.
- [17] C. G. Hoover and Z. P. Bažant, "Universal size–shape effect law based on comprehensive concrete fracture tests," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 140, no. 3, pp. 473–479, 2014.
- [18] S. Kumar, S. R. Pandey, and A. Srivastava, "Determination of double-K fracture parameters of concrete using peak load method," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 131, pp. 471–484, 2014.
- [19] M. Kozłowski, M. Kadela, and A. Kukielka, "Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams," *Procedia Engineering*, vol. 108, pp. 349–354, 2015.
- [20] D. Gil and G. Golewski, "Effect of silica fume and siliceous fly ash addition on the fracture toughness of plain concrete in Mode I," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [21] A. Atashi, V. Kalatjari, and E. Zamani Beydokhti, "Experimental and Numerical Investigation of Cold Joint Effects on Intermediate Concrete Moment Frame Under Cyclic Loading," *Period. Polytech. Civil Eng.*, vol. 69, no. 1, pp. 193–209, Jan. 2025.
- [22] Atashi, A., Kalatjari, V. R., and Zamani Bidokhti, E. (2024). "Investigation of improvement methods on the seismic behavior of reinforced concrete frames with cold joints." *Journal of Structural Engineering and Construction*, 12(3), 117–143. doi:10.22065/jsce.2024.455887.3405
- [23] ASTM C33-03, "Standard specification for concrete aggregates," ASTM International, 2003
- [24] ASTM C1602/C1602M-22, "Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [25] ASTM C94/C94M, "Standard specification for ready-mixed concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [26] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2002.
- [27] European Committee for Standardization, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens, EN 12390-3, Brussels, 2019.
- [28] ASTM, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C496/C496M, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.