

ارزیابی خسارت‌های بتن در سازه‌های هیدرولیکی در سد میناب و تکنولوژی ترمیم



محمد رضا حاج بابایی

دانشجوی کارشناسی ارشد
عمران (محیط زیست)، دانشکده
فنی و مهندسی دانشگاه خواجه
نصیر، تهران



حامد رضا حاج قاسم

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران
گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده
فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمد جواد محمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران
گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تهران
سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی
دانشگاه تهران
عضو هیات مدیره انجمن بتن ایران

چکیده

سازه‌های بتنی هیدرولیکی از قبیل سدها و تاسیسات وابسته به آن در طول عمر خود دچار آسیب‌های فیزیکی، شیمیایی و اجرایی متنوعی می‌شود. عوامل فیزیکی که علت عمده آسیب‌های بتن در سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد، شامل سایش و فرسایش، پدیده خلاءزایی و چرخه‌های ذوب و انجماد است. همچنین عوامل شیمیایی شامل حمله سولفات‌ها، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و خوردگی می‌باشد. در این پژوهش، روش عملکرد هر عامل مخرب مورد بررسی قرار گرفت و چهار روش ترمیم بتن شامل بتن الیافی، پلیمری، ملات اپوکسی و میکروسیلیسی از نظر مشخصات مکانیکی شامل مقاومت سایشی، کشش مستقیم، مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته، رابطه زمان عمل‌آوری و مقاومت اولیه، نفوذپذیری و چسبندگی با بتن پایه مقایسه شدند. از نظر مشخصات مکانیکی، ملات اپوکسی و میکروسیلیسی نسبت به دیگر مصالح بهترین عملکرد را دارد ولی در برخی از موارد اجرایی دچار ضعف‌هایی مثل عدم اجرا در سطوح شیب‌دار و لزوم عمل‌آوری طولانی می‌باشد. از نتایج کلی این تحقیق، دستیابی به روش ترمیم مناسب با توجه به نوع آسیب، با مصالح موجود در کشور در منطقه سد استقلال میناب اشاره نمود. کلمات کلیدی: سازه‌های بتنی هیدرولیکی، آسیب فیزیکی، آسیب شیمیایی، ترمیم بتن، سد استقلال میناب

بتن به‌عنوان اصلی‌ترین و پرمصرف‌ترین ماده در ساخت سازه‌های هیدرولیکی امری بدیهی به نظر می‌رسد. سدها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی، سازه‌هایی با عمر بهره‌برداری طولانی هستند که به علت هزینه بالای تعمیرات، مسأله دوام آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از مصالح نامناسب و غیر استاندارد در بتن، عدم رعایت اصول

مقدمه

صنعت سازه‌های هیدرولیکی به ویژه سدها به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین فعالیت‌های ساختمانی همواره مد نظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی یکی از منابع مهم هر کشور و منطقه محسوب می‌شود. اهمیت کاربرد

پژوهش این کمیته، دستیابی به علل آسیب‌های وارد شده و روش‌های ترمیم مناسب می‌باشد. [۴]

گالواو و کریزانوسکی (۲۰۱۲) و آریاس و همکاران (۲۰۱۵)، تاثیر مقاومت سایشی بتن با استفاده از آزمایش سایش سطح بتن توسط آب، عوامل مخرب بتن در سازه‌های هیدرولیکی و مراحل ترمیم را بررسی کردند. نتیجه تحقیق، لزوم افزایش دوام سازه‌های هیدرولیکی در برابر عوامل مخرب می‌باشد و باید کیفیت بتن را با افزودنی‌های شیمیایی و معدنی بهبود بخشید تا از بتن سازه محافظت کرد. [۵-۷]

کورمان و همکاران (۲۰۰۳) عملکرد چهار روش ترمیم بتن با ملات اپوکسی، میکروسیلیسی، بتن الیافی و پلیمری را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده جهت دستیابی به مشخصات مکانیکی هر ترمیم، ملات اپوکسی بهترین عملکرد را نشان داده است. البته ملات اپوکسی با توجه به مدول الاستیسیته پایین‌تر نسبت به دیگر بتن‌ها، برای اجرا در سرریزها و سطوح منحنی نیاز به تجهیزات خاص دارد. [۲] پویو (۲۰۱۸) بر روی مقاومت سایشی بتن غلتکی استفاده شده در سرریز سد تحقیق کرد و عوامل تاثیرگذار بر این موضوع را بررسی کرد. [۸]

۲- مشخصات سد استقلال میناب

دشت میناب در حاشیه دریای عمان و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری خاور بندر عباس واقع شده و سد استقلال در ۳ کیلومتری شهر میناب بر روی رودخانه میناب احداث گردیده است. مطالعه اولیه در سال ۱۳۴۴ آغاز و عملیات اجرائی از سال ۱۳۵۳ شروع و در دی ماه سال ۱۳۶۱ بهره‌برداری از آن آغاز شده است.

سد استقلال میناب با ارتفاع ۵۹ متر، عرض پی و تاج سد به ترتیب ۵۸ متر و ۳ متر و حجم مفید مخزن ۲۵۵ میلیون متر مکعب می‌باشد.

اهداف احداث این سد عبارتند از: محافظت مناطق زیر کشت در مقابل سیلاب‌ها، تنظیم آب رودخانه، آبیاری نخلستان‌ها بر اساس سیستم جدید آبیاری با توجه به شرایط طبیعی و محدودیت‌های آن، توسعه و افزایش سطح زیر کشت مقابله با خطرات شوری زمین به علت ارتباط

فنی در ساخت و اجرای سازه‌های بتنی، وجود عوامل و شرایط محیطی مخرب، آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی ناشی از عوامل مخرب، عدم دقت در عمل‌آوری بتن، عدم حفاظت و نگهداری بتن و عدم انجام تعمیرات جزئی لازم در حین بهره‌برداری از عوامل عمده خرابی‌های زودرس در کشور می‌باشد. [۱]

از دیرباز محققین و مهندسان عمران به دنبال مصالحی بوده‌اند تا به کمک آن‌ها خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشند و در این زمینه موفقیت‌های بسیاری به دست آورده‌اند. ترمیم آسیب‌های به وجود آمده در دوره‌های زمانی مشخص، موجب افزایش عمر مفید سازه می‌شود. توجه به این مهم ضروری است که تخریب بتن سازه‌ها و ترمیم آن‌ها باید با روش صحیح انجام شود تا نتیجه مورد نظر حاصل شود.

در این تحقیق، خواص مکانیکی چهار نوع مصالح ترمیمی بتن بررسی شده و نسبت به شرایط اجرایی موجود برای ترمیم بتن آسیب دیده استفاده می‌شود. از این رو آزمایش‌های تأثیرگذار بر دوام بتن به کار رفته در یک سازه هیدرولیکی نظیر مقاومت سایشی، کشش مستقیم، مقاومت فشاری و خمشی، رابطه زمان عمل‌آوری و مقاومت اولیه، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری و چسبندگی با بتن پایه روی نمونه‌های ساخته شده از بتن پلیمری و الیافی، ملات اپوکسی و میکروسیلیسی انجام گرفت. [۲]

انجمن بتن آمریکا (۱۹۹۴ تا ۲۰۰۵) با استفاده از تحقیقات گسترده انجام شده، گزارشی از فرسایش در سازه‌های هیدرولیکی منتشر کرد و برای بهبود کیفیت بتن، روش‌هایی از طرح اختلاط بتن حجیم و گزارش از اجرا ارائه داد. همچنین راهنمای ترمیم بتن در شرایط مختلف را برای افزایش دوام سازه‌های سالخورده ارائه داد. انجمن بتن ژاپن (۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷) بر روی بهبود خواص مکانیکی بتن استفاده شده در سازه‌های هیدرولیکی تحقیق کرد و به بتن‌های خاص مانند بتن الیافی، بتن با سنگدانه بازبافتی دست یافت. کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (۱۹۳۳) که از اهداف آن نگهداری سدهای سالخورده می‌باشد، کنفرانس و جلسات متنوعی از این موضوع برگزار کرده است. نتیجه

آب‌های شور زیرزمینی با سطح خاک، آبیاری ده هزار هکتار از زمین‌ها و باغ‌های میناب و تامین قسمت عمده آب مصرفی شهر بندرعباس. [۳]

جهت تخلیه سیلاب‌های ورودی به مخزن سد، سیستم تخلیه سیلاب شامل ۱۴ دهانه سرریز دریاچه‌دار واقع بر قسمت مرکزی بدنه سد بتنی پیش‌بینی شده است. عرض هر یک از دهانه‌های سرریز ۱۱ متر و عرض پایه‌های میانی ۳ متر می‌باشد. دریاچه‌ها از نوع قطاعی به ارتفاع ۱۰/۵ متر می‌باشند و تراز تاج سرریز ۸۸ متر از سطح دریا قرار دارد. حداکثر دبی خروجی از هر دریاچه ۸۹۲ متر مکعب در ثانیه و در مجموع دبی ۱۲۵۰۰ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. چهار دریاچه بر اساس ارتفاع آب به صورت خودکار عمل می‌کنند و ۱۰ دریاچه دیگر به صورت دستی کنترل می‌شوند.

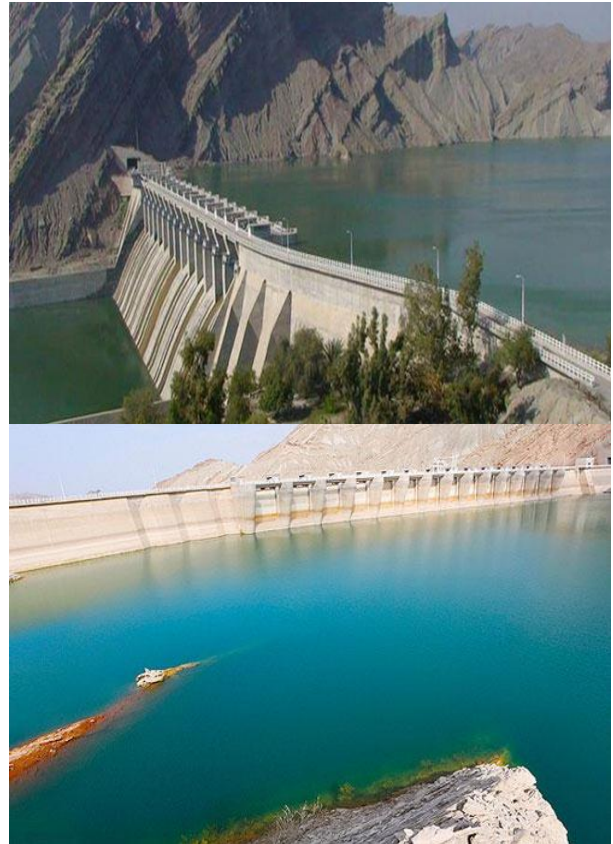
حجم بتن مصرفی ساخت سد ۳۰۰۰۰ متر مکعب و هزینه احداث سد حدود ۱۰ میلیارد تومان می‌باشد. دریاچه سد استقلال میناب با مساحت ۱۹ کیلومترمربع و برخورداری از چشم‌انداز مناسب، از تفرجگاه‌های اهالی منطقه محسوب می‌شود.

۳- بررسی و نتایج

۳-۱- پراکندگی آسیب‌های بتن

با توجه به منابع موجود، آسیب‌های فیزیکی بیشتر از آسیب‌های شیمیایی رخ می‌دهد و خرابی‌های ناشی از اجرای نامناسب در کشورهای جهان سوم بیشتر می‌باشد. سازه‌های هیدرولیکی که در معرض آب با سرعت‌های بالا هستند بیشتر مستعد سایش و خلاءزایی می‌باشند. آسیب‌های شیمیایی بستگی به محیط ساخت سد و مصالح مصرفی دارد که می‌توان با آزمایش هنگام مطالعات ساخت سد از وقوع آن جلوگیری کرد. [۱۰]

در ایران، سدهایی از قبیل عباسپور، کرخه، پیشین، سنبل رود، دز، قشلاق، وحدت و میناب دچار سایش و کاویتاسیون شده‌اند. [۳]



شکل ۱- سد استقلال میناب

سد استقلال میناب شامل ۳۲ بلوک می‌باشد که قسمت میانی ۲۱ بلوک پایه‌دار به عرض ۱۴ متر دارد، ۱۵ بلوک در قسمت مرکزی و بر روی یک سطح بنا شده‌اند و ۳ بلوک در هر طرف بر روی سطوح مختلف ایجاد گردیده‌اند. قسمت‌های انتهایی از دو قسمت وزنی تشکیل شده‌اند، سمت چپ ۸ بلوک به عرض ۱۴ متر و سمت راست ۳ بلوک به عرض ۱۵ متر قرار دارد.



شکل ۲- سرریز سد استقلال میناب

جدول ۱- پراکندگی آسیب‌های بتن

نام پروژه	محل پروژه	نوع سازه	نوع آسیب
Alcova Dam	Casper, WY	سرریز	حمله شیمیایی
Arkabutla Lake	Coldwater, MS	حوضچه آرامش	سایش
Arthur R. Bowman Dam	Oregon	خروجی تونل	کاویتاسیون
Barren River Lake	Glasgow, KY	حوضچه آرامش و خروجی‌ها	سایش
Blue Mesa Dam	Colorado	تونل انتقال آب	سایش
Blue Ridge Dam	Toccoa River, GA	سرریز و حوضچه آرامش	سایش
Bonneville Dam	Bonneville, WA	حوضچه آرامش	سایش
Bratsk Dam	Bratsk, Irkutsk, U.S.S.R	سرریز	کاویتاسیون
Bull Shoals Lake Dam	Mountain Home, AR	حوضچه آرامش و خروجی‌ها	سایش و کاویتاسیون
Burfell Dam	Selfoss, Arnesssyla, Iceland	تخلیه تحتانی	سایش
Canyon Ferry Dam	Townsend, MT	حوضچه آرامش و خروجی‌ها	سایش
Causey Dam	Ogden River, UT	حوضچه آرامش و خروجی‌ها	سایش و کاویتاسیون
Center Hill Dam	Carthage, TN	حوضچه آرامش	سایش و کاویتاسیون
Cherokee Dam	Holston River, TN	سرریز و حوضچه آرامش	سایش
Conchas Dam	Tucumcari, NM	حوضچه آرامش	سایش
Derbendikhan Dam	Sulaymaniya, Iraq	سرریز	کاویتاسیون
Oologah Lake Dam	Tulsa, OK	حوضچه آرامش	سایش
Norris Dam	Clinch River, TN	سرریز	سایش
Palisades Dam	Irwin, ED	سرریز	سایش و کاویتاسیون
Navajo Dam	Farmington, NM	حوضچه آرامش و خروجی‌ها	سایش و کاویتاسیون

۳-۲- مقایسه روش‌های ترمیم بتن

جهت ساخت و اجرای سازه‌های عظیم چون سدها، زمان و هزینه زیادی صرف می‌شود، بنابراین نگهداری، حفظ سلامت و ترمیم این سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است. ترمیم بتن در واقع شیوه‌ای است که به طولانی‌تر شدن عمر مفید واقعی سازه و رسیدن به عمر مفید طراحی آن کمک می‌کند.

در ترمیم بتن می‌خواهیم شرایط را به نحوی فراهم سازیم تا سازه مشخصات خود را در دوره بهره‌برداری حفظ نماید.

ترمیم بتن قدیمی نیازمند تحلیل و تدبیر بیشتری است، به گونه‌ای که ناحیه آسیب دیده از بقیه نواحی جدا شده و جایگزین گردد. ترمیم بتن بدون بسترسازی و حذف عوامل خرابی بتن امکان‌پذیر نیست. هر علتی که منجر به خرابی شده باشد، پس از ترمیم نیز پابرجاست، لذا لازم است این علل حذف شوند تا نوسازی بتن دارای پایداری بیشتری باشد.

روش‌های مختلفی برای ترمیم سازه بتنی وجود دارد که اغلب به نوع ترک موجود از نظر فعال و غیر فعال بودن

بستگی دارد. با توجه به دلایل آسیب ایجاد شده در سازه، در این قسمت، مشخصات مکانیکی چهار مصالح ترمیمی سطح خرابی و همچنین عمق آن، روش ترمیم بتن انتخاب می شود.

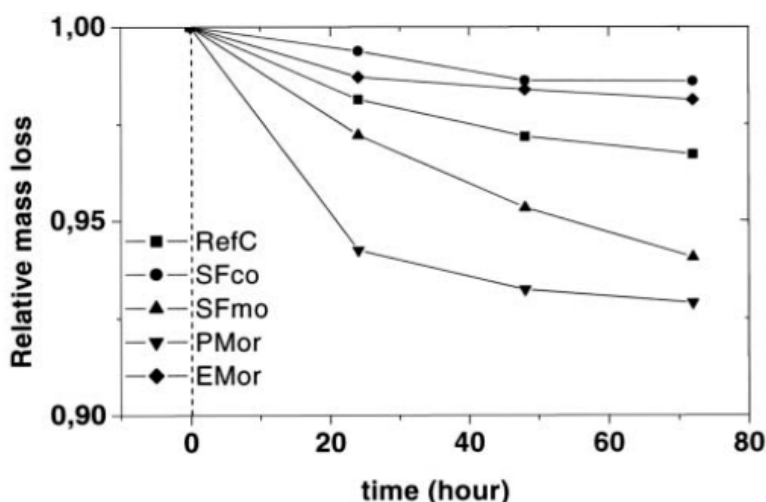
در این قسمت، مشخصات مکانیکی چهار مصالح ترمیمی بیان شده است. با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مصالح ترمیمی از نظر مشخصات مکانیکی و چسبندگی با بتن پایه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. [۲، ۵، ۶]

جدول ۲- مقادیر مقاومت فشاری و سازگاری با بتن پایه مصالح ترمیمی

نوع مصالح	سن (روز)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	سازگاری سیستم (مصالح ترمیمی و بتن پایه)
بتن پایه	۲۸	۴۴	-
بتن الیافی	۲۸	۳۸	قوی
ملات اپوکسی	۲۸	۹۱	ضعیف
بتن پلیمری	۲۸	۲۲	ضعیف
ملات میکروسیلیسی	۲۸	۴۴	قوی

مقاومت فشاری زیاد ملات اپوکسی نسبت به بتن پایه باعث ایجاد مشکلات شرایط مرزی در اتصال بین آن‌ها می‌شود و ضعف در اتصال با بتن پایه را ایجاد می‌کند. از طرف دیگر مقاومت فشاری کم بتن پلیمری باعث ایجاد سایش بیشتری در سطح بتن می‌شود. بتن الیافی و ملات میکروسیلیسی سازگاری مناسبی با بتن پایه دارند و مقاومت فشاری نزدیکی به بتن پایه دارند. [۲]

در نمودار زیر رابطه بین کاهش وزن نسبی مصالح ترمیمی توسط سایش در طول زمان بررسی شده است. بتن الیافی و ملات اپوکسی بهترین عملکرد را در برابر سایش در طول زمان دارند. [۲]



شکل ۳- کاهش وزن مصالح ترمیمی [۲]



شکل ۴- نمونه‌های تحت سایش [۲]

بعد از مقاومت مناسب نمونه‌های بتن الیافی در برابر سایش، تحت رطوبت زیاد قرار گرفتند، الیاف فولادی موجود در بتن خورده شده و خوردگی در سطح بتن باعث کمک به پدیده سایش و فرسایش می‌شود. [۲، ۹]

با آزمایش نمونه‌های ساخته شده از مصالح ترمیمی و مقایسه نتایج بدست آمده، جدول ۳ حاصل می‌شود.

جدول ۳- دسته‌بندی کلی سیستم مصالح ترمیمی برای تعمیر فرسایش سازه‌های بتنی هیدرولیکی

بتن پایه سیستم مصالح ترمیمی*				آزمایش
بتن پلیمری	بتن الیافی	ملات میکروسیلیس	ملات اپوکسی	
↓	↔	↓	↑	مقاومت در برابر سایش
↓	↔	↔	↑	چسبندگی با کشش مستقیم
↓	↔	↔	↑	کشش مستقیم
↔	↔	↔	↑	مقاومت فشاری
↓	↔	↔	↑	مقاومت خمشی
↓	↓	↓	↑	زمان عمل‌آوری-مقاومت اولیه بالا
↔	↔	↔	↓	مدول الاستیسیته
ارزیابی نشده	↔	↑	ارزیابی نشده	نفوذپذیری

* عملکرد: ↑ زیاد؛ ↔ متوسط؛ ↓ کم

با آزمایش‌های انجام شده و نتایج گذشته، ترتیب عملکرد مصالح ترمیمی به شرح زیر است: [۲، ۵، ۶]

ملات میکروسیلیسی - ملات اپوکسی < بتن الیافی < بتن پلیمری



شکل ۵- اجرای ملات‌های ترمیمی بر روی بتن پایه

با بررسی نتایج، توجه به نکات زیر ضروری می‌باشد. [۲]

ملات اپوکسی با وجود عملکرد مناسب تحت سایش، به دلیل خواص خود، مشکلات خاصی از قبیل خودترازی در هنگام استفاده دارد، بنابراین برای سطوح شیب‌دار توصیه نمی‌شود. برای رفع این مشکل لازم است که مقدار ماسه کوارتز را افزایش داد. مزیت این مصالح، مقاومت فشاری اولیه بالای آن می‌باشد زیرا برای تعمیر اضطراری مطلوب می‌باشد. ملات میکروسیلیسی یک مصالح ترمیمی عالی می‌باشد و عملکرد مکانیکی سازگاری با بتن پایه و رسیدگی مناسبی دارد.

جدول ۴- مثال‌های اجرایی ترمیم بتن سازه‌های هیدرولیکی

نام پروژه	نوع سازه	نوع آسیب	نوع ترمیم
Dworshak Dam	سد وزنی	کاویتاسیون	پلیمر اشباع
Lower Monumental Dam	بند کشتیرانی	کاویتاسیون	اپوکسی
Terzaghi Dam	مجرای تخلیه	کاویتاسیون	هیدرولیکی
Keenleyside Dam	مجرای تخلیه	کاویتاسیون	بتن پرمقاومت
Kinzua Dam	حوضچه آرامش	سایش	بتن میکروسیلیسی
Los Angeles River Channel	کانال	سایش	بتن میکروسیلیسی
Pine River Watershed Structure No. 41	کانال	سایش	بتن پرمقاومت
NoIn Lake Dam	حوضچه آرامش	سایش	هیدرولیکی
Sheldon Gulch Siphon	خروجی سیفون	سایش	ملات پلیمر اصلاح شده
Barceloneta Trunk Sewer		خط لوله شیمیایی	حمله پوشش PVC

بتن پلیمری عملکرد نامطلوبی با ۱۸ درصد آب داشت و مطالعات بیشتری برای سعی در کاهش مقدار آب تا ۸ درصد لازم است. در این تحقیق، به بررسی چند نمونه اجرایی از سازه‌های هیدرولیکی آسیب‌دیده در مناطق مختلف و روش‌های ترمیم بتن آن می‌پردازیم. [۱۰]

تنها محدودیت این مصالح، ضرورت عمل‌آوری و سخت شدن طولانی آن است. بتن الیافی در رطوبت بالا مشکل خوردگی الیاف فولادی در سطح و افزایش شدت سایش و فرسایش را دارد.



شکل ۶- اجرای ترمیم بتن آسیب دیده در سازه‌های هیدرولیکی

۳-۳- ترمیم سد استقلال میناب

مهندسی مهتاب قدس واگذار گردید. در این راستا شرکت مهندسی مشاور بررسی‌های سازه‌ای، هیدرولیکی، تکنولوژی بتن و در نهایت برآورد هزینه و روش اجرای ترمیم سرریز سد استقلال میناب را در قالب شرح خدمات مهندسی انجام داده و مطالعات به تصویب مراجع مربوطه رسیده است. [۳]

با بررسی‌های هیدرولیکی، عواملی که باعث خرابی در سرریز و حوضچه آرامش شده است، اجرای نامطلوب بتن در هنگام ساخت سد، نفوذ یون کلر موجود در منطقه در بتن سرریز، سایش شدید هنگام استفاده از سرریز و پدیده خلاءزایی می‌باشد.

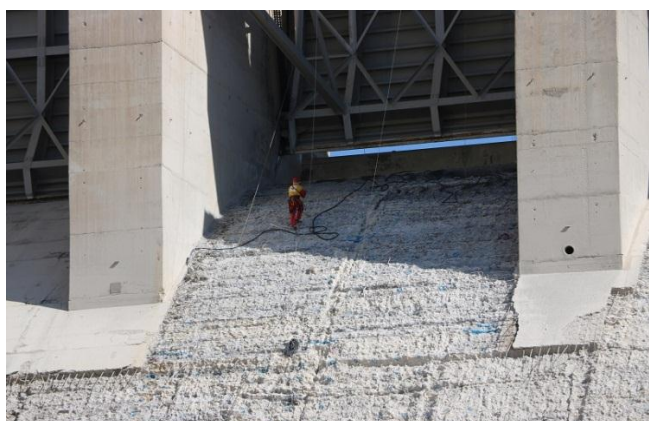
از همان سال‌های اولیه بهره‌برداری تخریب و خوردگی بتن در سطح تندآب و کف حوضچه آرامش سرریز مشاهده گردید. عملیات ترمیم برای اولین بار در سال ۱۳۶۳ و بعد از تحویل موقت انجام و به دنبال آن در سال‌های ۱۳۶۷، پس از سیلاب سال ۱۳۷۶ و همچنین در سال ۱۳۸۱ با مشاهده مجدد تخریب بتن، عملیات موضعی ترمیم با استفاده از روش‌های مختلف (عمدتاً با مواد اپوکسی رزین) انجام شده است. متأسفانه هیچکدام از ترمیم‌های قبلی روش مناسبی برای ترمیم این تخریب‌ها نبوده است. مطالعات "بررسی علل خوردگی بتن سرریز سد استقلال میناب و ارائه راهکار تعمیرات اساسی آن" به شرکت



شکل ۷- خرابی بتن سد استقلال میناب

جهت اجرای طرح علاج بخشی سرریز سد استقلال میناب، تخریب پوسته سست بتنی به عمق ۲۵ سانتی متر با استفاده از دستگاه واتر جت هوشمند انجام شد. مقدار کل تخریب بتن فرسوده ۵۵۰۰ متر مکعب می باشد که بزرگترین پروژه تخریب بتن با واتر جت است.

با استفاده از تکنولوژی روز به منظور تخریب بتن رویه و ترمیم آن، عمر مفید سد را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد و سد در مقابل سیلاب های با دبی بالا ایمن خواهد بود. [۳]



شکل ۹- وضعیت دسترسی تخریب بتن سرریز سد

به منظور توسعه تحقیقات انجام شده در این پژوهش، ارزیابی کامل تر و دقیق تر می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه روش های طراحی هیدرولیکی مناسب برای پیشگیری از آسیب به سازه.
- مدل سازی عددی جریان و پیش بینی محل آسیب.
- بررسی مقاومت بتن های نوین و خاص در برابر سایش و فرسایش به عنوان مصالح ترمیمی.
- بررسی اقتصادی و اجرایی استفاده از بتن های خاص برای افزایش عمر مفید سازه.

۴- جمع بندی

در این تحقیق، دستیابی به مناسب ترین روش ترمیم بتن برای انواع مختلف آسیب های موجود در سازه های بتنی هیدرولیکی با بررسی نمونه های اجرایی مورد توجه قرار گرفت.

طرح علاج بخشی سرریز سد میناب به صورت تخریب و جمع آوری بتن و شبکه آرماتور آسیب دیده و اجرای بتن جدید با رعایت ضوابط فنی در دستور کار قرار گرفت. عملیات اجرایی این طرح در کشور منحصربه فرد هست و با توجه به نمودار پروفیل سرریز و حجم بسیار بالای تعمیر بتن تاکنون تجربه نشده است.

دستگاه های خاصی برای اجرای طرح به داخل کشور وارد شد. طراحی و ساخت سیستم انتقال دستگاه به تمام سطح سرریز جهت تخریب بتن و ساخت سیستم قالب لغزان جهت بتن ریزی که با نظر به پروفیل سرریز سد که دارای خصوصیات فنی پیچیده می باشند، انجام گردیده است.



شکل ۸- تخریب بتن آسیب دیده سرریز سد

اعتبار اولیه انجام این پروژه ۱۹ میلیارد و ۳۰۰ میلیون تومان از محل اعتبارات ملی استانی برآورد شده است. به دلیل هندسه سرریز، دامنه کار، محدودیت زمانی، دسترسی دشوار و بسیاری عوامل بازدارنده دیگر، بهترین روش تخریب پوسته به کارگیری واتر جت تشخیص داده شد.

به این منظور ابتدا عواملی که باعث آسیب‌های مختلف در بتن می‌شود بررسی شد. آسیبی که ممکن است در ابتدای اجرای سازه رخ دهد، طراحی و اجرای نامناسب بتن از جمله شرایط عمل‌آوری، قالب‌بندی، پوشش ناکافی و عدم رعایت مفصل‌ها می‌باشد. جهت ترمیم این آسیب‌ها استفاده از ملات‌های اپوکسی گزارش شده است.

اغلب آسیب‌های موجود در سازه‌های هیدرولیکی در اثر عوامل فیزیکی می‌باشد، سایش و خلاءزایی اغلب در سرریز، حوضچه آرامش و سازه‌های منتقل کننده آب با سرعت بالا رخ داده است. افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش مقاومت بتن در برابر سایش شده و ملات‌های ترمیمی با مقاومت بالا عمدتاً در برابر سایش نتایج مناسبی داشتند. خرابی ناشی از چرخه‌های ذوب و انجماد در کشورهای سردسیر مهم‌ترین آسیب می‌باشد و برای مقابله با این پدیده استفاده از مواد حباب هوازا، ملات اپوکسی و بتن پلیمری (در صورت مشاهده ترک) پیشنهاد شده است.

آسیب دیگر، در اثر نفوذ مایعات و گازهای مضر به بتن و حملات شیمیایی ناشی از آن می‌باشد. حمله سولفاتی از طریق خاک و آب به بتن که در اثر انبساط محصولات جانبی تشکیل شده، شکستن بتن رخ می‌دهد. با کاهش نفوذپذیری بتن می‌توان از این آسیب جلوگیری کرد. خرابی عمده در سدها، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها می‌باشد که قبل از مصرف، از معدن مربوطه آزمایش‌های لازم را باید انجام داد و سلامت سنگدانه تایید شود. استفاده از پوزولان‌ها تا حد زیادی از این پدیده جلوگیری می‌کند. با نفوذ یون کلر و محیط قلیایی بتن خوردگی در آرماتور آغاز می‌شود. ترک‌های ناشی از تنش کششی بوجود آمده در بتن باعث خرابی پوشش بتن می‌شود.

جهت ترمیم بتن، چهار مصالح ملات اپوکسی، ملات میکروسیلیسی، بتن الیافی و بتن پلیمری از نظر مقاومت سایشی، کشش مستقیم، مقاومت فشاری و خمشی، رابطه زمان عمل‌آوری و مقاومت اولیه، مدول الاستیسیته، نفوذپذیری و چسبندگی با بتن پایه مقایسه شدند. ملات اپوکسی مشخصات مکانیکی مناسبی از جمله مقاومت فشاری اولیه بالا دارد ولی برای سطوح شیب‌دار به دشواری اجرا می‌شود. ملات میکروسیلیسی در صورت عمل‌آوری مناسب و کافی، مصالح ترمیمی مناسبی می‌باشد. بتن الیافی در محیط‌های بسیار مرطوب، احتمال خوردگی دارد و به فرسایش بتن کمک می‌کند. مقاومت فشاری کم بتن-های پلیمری با ۱۸ درصد آب باعث عملکرد نامطلوب در برابر سایش و فرسایش شد.

با استفاده از نتایج فوق و بررسی ترمیم آسیب‌های مختلف از نمونه‌های اجرایی سازه هیدرولیکی کشورهای مختلف و سد استقلال میناب می‌توان نتیجه گرفت که برای ترمیم و علاج‌بخشی سازه آسیب دیده، ابتدا باید شناخت کافی نسبت به آسیب و عوامل آن داشت، سپس روش ترمیمی مناسب با آن را با انجام آزمایش‌های مربوطه انتخاب کرد. توجه به این مهم ضروری است که تخریب بتن سازه‌های هیدرولیکی و ترمیم آن‌ها باید با روش صحیح و لوازم درست انجام شود تا نتیجه مورد نظر حاصل شود. از الزامات اجرایی، بسترسازی، قالب‌بندی، عمل‌آوری مناسب و دیگر حساسیت‌های مربوط به هر اجرا می‌باشد.

- [1] J. R. Graham Chairman Patrick J Creegan Wallis S Hamilton John G Hendrickson et al., "ACI 210R-93 Erosion of Concrete in Hydraulic Structures Members of ACI Committee 210 voting on the revisions: 4.2-Erosion by mineral-free water 4.3-Erosion by miscellaneous causes," *ACI Mater. J.*, vol. 93, no. Reapproved, pp. 1–24, 1998.
- [2] A. C. M. Kormann, K. F. Portella, P. N. Pereira, and R. P. Santos, "Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams," *Cerâmica*, vol. 49, no. 309, pp. 48–54, 2005.
- [3] "Mahabghodss/مهتاب قدس." [Online]. Available: <http://46.32.2.170/ExternalSites/new/PrjDtl.aspx?ID=53>.
- [4] L. Y. Xiao, "A Review of Detection, Evaluation and Repair Technology for Hydraulic Concrete Structures," in *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 690, pp. 805–810.
- [5] J. C. Alves Galvo, K. Franke, A. C. Morales Korm, J. C. A. Galvão, K. F. Portella, and A. C. M. Kormann, "Abrasive Effects Observed in Concrete Hydraulic Surfaces of Dams and Application of Repair Materials," *Abrasion Resist. Mater.*, pp. 19–34, 2012.
- [6] A. Kryžanowski, M. Mikoš, J. Šušteršič, V. Ukrainczyk, and I. Planinc, "Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the Lower Sava River," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 58, no. 4, pp. 245–254, 2012.
- [7] A. Ariyath, R. G. Pillai, R. Gettu, and M. Santhanam, "First National Dam Safety Conference Deterioration of concrete materials in dam structures and possible testing and repair methods-A brief overview," 2015, no. April 2018.
- [8] M. Poyo, "Abrasion resistance of IV-RCC used to construct spillway concrete steps of South African dams," *University of Cape Town*, 2018.
- [9] K. F. von Fay, *Guide to Concrete Repair*, no. August. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 2015.
- [10] J. R. Graham, A. E. Herrera, and E. K. Schrader, "Compendium of Case Histories on Repair of Erosion-Damaged Concrete in Hydraulic Structures Reported by ACI Committee 210," *Policy*, vol. 94, no. Reapproved 1999, pp. 1–33, 2004.

اثرات آب مغناطیسی بر مشخصات بتن تازه و سخت شده



محمد مهدی جباری

گروه مهندسی عمران، واحد شیراز
دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران



محمد رضا بهادری

گروه مهندسی عمران، واحد شیراز
دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده:

امروزه بتن نقش بسیار مهمی را در مهندسی عمران و صنعت ساختمان ایفا می‌کند. از گذشته تاکنون افزایش مقاومت فشاری، دوام و روانی از مهمترین مولفه‌هایی است که مد نظر محققان تکنولوژی بتن قرار گرفته است. با توجه به اینکه آب جز یکی از مهمترین اجزا تشکیل دهنده مخلوط‌های بتنی است و حجمی ۱۵ تا ۲۰ درصدی از بتن را تشکیل می‌دهد، کیفیت آن نقش کلیدی را در بتن ایفا می‌کند یکی از راه‌های افزایش کارایی و مقاومت که در کشورهای بلوک شرق مثل چین و روسیه متداول است، استفاده از تکنولوژی مغناطیسی در ساخت بتن است. بدین نحو که با استفاده از تکنولوژی مغناطیسی، آب مغناطیسی تولید شده و در اختلاط بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نوشتار حاضر سعی بر آن است تا مروری بر مطالعات و آزمایش‌های انجام شده در رابطه با استفاده از آب مغناطیسی در مخلوط بتن صورت گیرد. بر اساس گزارش مقالات، آب مغناطیسی تأثیرات مثبتی از جمله افزایش مقاومت فشاری و کششی، صرفه‌جویی در مقدار سیمان مصرفی و کاهش جذب آب بر بتن دارد.

کلمات کلیدی: آب مغناطیسی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام

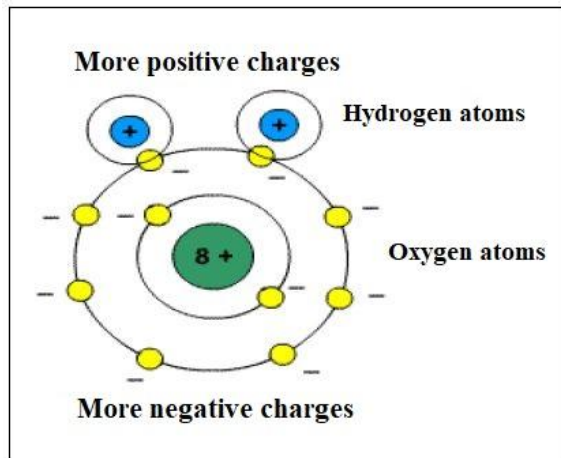
مقدمه

بتن و فولاد دو نوع از مصالحی هستند که بیش از سایر مصالح در سازه‌ها به کار برده می‌شوند. بتن در قرن بیستم بعد از آب به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در جهان شناخته می‌شود. مقاومت بالای آن در مقابل آب، سهولت شکل دادن به آن برای ساخت اجزای مختلف سازه و سهولت دسترسی و ارزانی این مصالح در کار از جمله دلایلی است که موجب مصرف بالای آن نسبت به دیگر مصالح ساختمانی شده است. در مقایسه با اغلب مصالح ساختمانی، تولید بتن نیاز به انرژی اولیه کمتری دارد [۱].

بتن یکی از علومی است که به دلیل وجود انواع افزودنی‌ها، در چند دهه اخیر دستخوش تغییر و تحول فراوانی شده است. با توجه به پیشرفت علم در تکنولوژی بتن، شناخت انواع بتن و خواص آن‌ها برای مهندسی عمران ضروری است.

کیفیت آب مورد استفاده در بتن با توجه به حجمی که در بتن دارد، به طور مستقیم بر روی خواص مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد. یکی از راه‌های افزایش کارایی و مقاومت که در کشورهای بلوک شرق مثل چین و روسیه متداول است، استفاده از تکنولوژی مغناطیسی در ساخت بتن است. بدین

بر اساس کوین [۶]، یک مولکول آب شامل یک اتم اکسیژن و دو اتم هیدروژن و H_2O است. پیوند کووالانسی که اتم هیدروژن را به اتم اکسیژن نگه می‌دارد، حاصل یک جفت الکترون است که مشترک است. (شکل ۱)، یک مولکول آب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مولکول آب [6]

از آنجا که دو اتم هیدروژن در یک طرف به الکترون‌ها تقسیم می‌شوند، مولکول دارای بار مثبت در یک طرف و بار منفی در طرفی دیگر است. برخی از این‌ها ممکن است باعث شوند که مولکول آب شبیه یک آهنربا کوچک‌تر عمل کند. از این به عنوان لحظه دوقطبی مولکول اشاره شده است. بر اساس کوین [۶]، مولکول‌های قطبی تحت تاثیر میدان مغناطیسی مختلف قرار می‌گیرند. هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، تعداد دوقطبی‌های اشاره شده در جهت میدان بیشتر می‌شود.

مولکول آب از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن به صورت $H-O-H$ تشکیل شده است. اتصال دو اتم هیدروژن به اتم اکسیژن به صورت V و با زاویه ای حدود 105° درجه می‌باشد. مولکول آب دوقطبی است به طوری که بار سمت اکسیژن منفی و باری که سمت هیدروژن‌ها قرار دارد مثبت است. بنابر این چنانچه چند مولکول آب کنار هم قرار گیرند، جاذبه‌ای بین هیدروژن مثبت از یک مولکول با اکسیژن منفی از مولکول همجوار به وجود می‌آید که به آن پیوند هیدروژنی گفته می‌شود. به علت دوقطبی بودن مولکول آب، وقتی تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، در راستای میدان مغناطیسی قرار گرفته و فرم مولکول

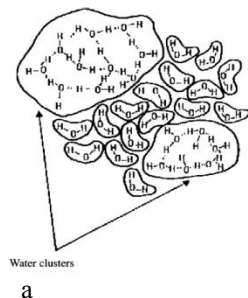
نحو که با استفاده از تکنولوژی مغناطیسی، آب مغناطیسی تولید شده و در اختلاط بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب مغناطیسی آبی است که از یک میدان مغناطیسی عبور داده شده است. این آب بسیار ارزان، دوستار محیط زیست، و با هزینه تجهیزات تولید کم می‌شود. درک اثرات مشاهده شده میدان مغناطیسی در طول و بعد از اعمال آن بر روی آب و محلول‌های آبی هنوز یک مسئله بحث برانگیز مقالات است، هرچند بیش از نیم قرن از گزارش این اثرات می‌گذرد. در ادامه مروری بر مهمترین تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از آب مغناطیسی در مخلوط‌های بتنی خواهیم داشت.

اثر میدان مغناطیسی بر روی آب

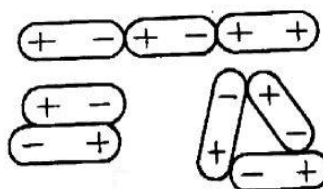
پیشینه آب مغناطیسی به سال ۱۸۰۳ برمی‌گردد. زمانی که برای تهیه آب جوش برای شستشوی لباس از کتری‌های بزرگ استفاده می‌شد. در آن زمان جهت حفظ تعادل کتری‌ها در برابر وزش باد در کف آن‌ها تکه سنگ‌هایی قرار داده شده بود. هر پنج ظرف چدنی بودند. با گذشت زمان مشاهده شد که در سه تا از این ظروف مواد معدنی رسوب شده فرمی سخت داشته ولی در دو کتری دیگر این رسوبات فرمی نرم و پودر مانند داشته و به راحتی با برس از سطوح پاک می‌شدند. بعدها متوجه شدند که دو عدد از آن پنج سنگ مغناطی طبیعی بوده است [۲]. اثر میدان مغناطیسی روی آب در سال ۱۹۰۲ توسط یک فیزیکدان دانمارکی نام هنریک آنتون لورنتز مطرح شد که موفق به اخذ جایزه نوبل فیزیک نیز گردید. وی مطرح کرد که تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی مولکول‌های قطبی آرایش یافته و جدا می‌شوند. در نتیجه آب سبک‌تر می‌شود [۳-۴]. تحقیقات او نشان داد که وقتی مولکول‌های آب تحت یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، خواص فیزیکی و شیمیایی آب تغییر می‌کند. در شرایط عادی، مولکول‌های آب به علت وجود پیوندهای هیدروژنی از یکدیگر جدا نمی‌شوند. بنابراین، آن‌ها تمایل به تشکیل کلاستر دارند و هر کلاستر شامل حدود ۱۰۰ مولکول آب در دمای اتاق است [۵].

تجمع دسته‌ای تهیه نمود. تعداد مولکول را در یک تجمع پایدار عدد مغناطیسی می‌نامند. میزان مغناطیسی شدن آب هنوز یک موضوع جنجال برانگیز است زیرا نتایج گزارش شده در تحقیقات کمتر قابل باز تولید (با همان مشخصات گزارش شده) بوده و از یکنواختی کمتری برخوردار هستند. به دلیل اینکه در فرایند مغناطیسی شدن آب عوامل زیادی همچون ناخالصی‌های مختلف موجود در آب و میزان اکسیژن حل شده در آن بسیار متفاوت است.

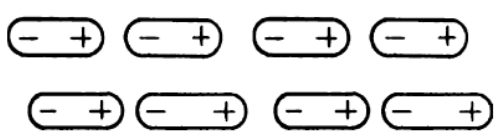
خواص غیرمعمول آب را می‌توان به پیوند هیدروژنی گسترده بین مولکول‌های آن نسبت داد. اظهار شده است که مولکول‌ها می‌توانند کلاسترها را شکل دهند. (شکل ۳-۳-۱). این تجمع‌ها و عدم تجمع‌های مولکول‌های آب در تعادل ترمودینامیکی است (شکل 3-b) [5]. در میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی می‌تواند کلاسترهای آب را به مولکول‌های تکی یا کوچک‌تر جدا کند [۷]، همانطور که در شکل (۳-۳-۲) نشان داده شده است. بنابراین فعالیت آب بهبود می‌یابد.



a

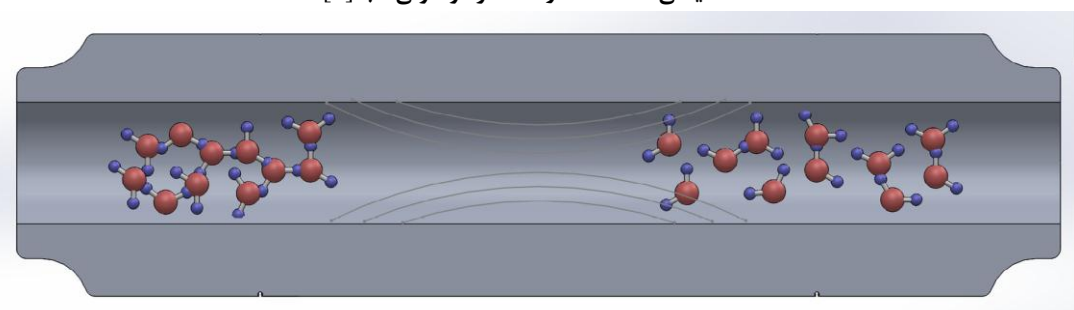


b



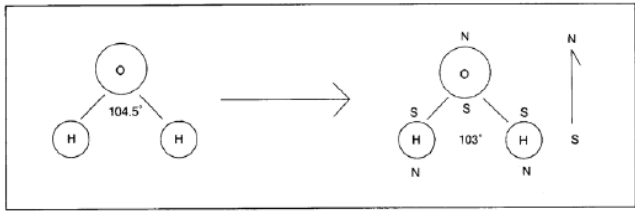
c

شکل ۳-۳-۱ اثر میدان مغناطیسی بر مولکول‌های آب: (a) خوشه‌های آب پایدار ترمودینامیکی، (c) مولکول‌های آب پس از عبور از یک میدان مغناطیسی، (c) ساختار کلاستر مولکولی آب [5]



شکل ۴-۴ تاثیر میدان مغناطیسی بر روی کلاسترهای مولکولی آب [3]

کشیده‌تر و زاویه دو اتم هیدروژن با اکسیژن کمتر از ۱۰۵ درجه می‌شود شکل (۲).



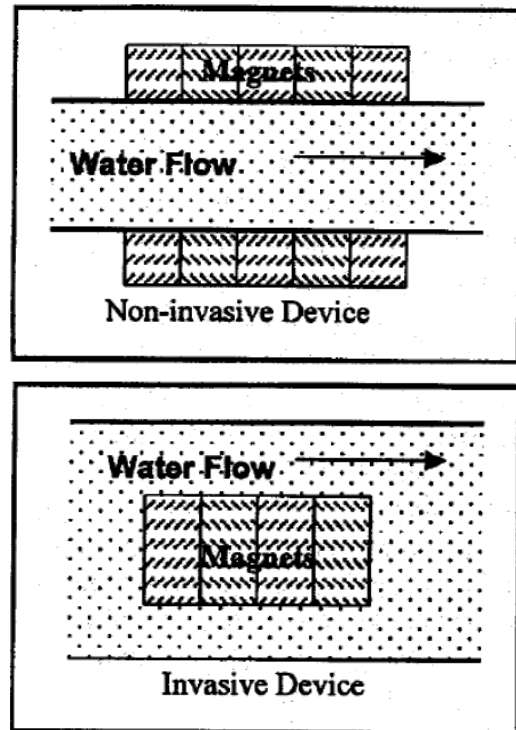
شکل ۲-۲ فرم مولکول آب قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی [36]

این امر باعث تضعیف پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های همجوار آب شده و در عمل مولکول‌های آب در دسته‌هایی قرار می‌گیرند. این تغییر ساختار باعث کاهش کشش سطحی، قابلیت نفوذ بیشتر و افزایش PH آب (قلیائی‌تر شدن) می‌شود. کاهش کشش سطحی آب باعث جدا شدن و رسوب بیشتر املاح موجود در آب و سبک‌تر شدن آن می‌گردد.

اکنون شناخته شده که ساختار مولکول‌های آب به صورت تجمع‌های دسته‌ای می‌باشد. گزارش شده که بسته به شدت میدان مغناطیسی، تجمع‌های دسته‌های مولکول‌های آب را می‌توان با تعداد ۱، ۴، ۷، ۱۱ و ۱۳ مولکول آب در یک

شکل های دستگاه مغناطیس کننده آب

این دستگاه ها دارای دو نوع متفاوت از نظر نصب و سه نوع متفاوت از نظر عملکرد هستند. بر اساس بیکر و جود [۸]، همان طور که در شکل (۵) دیده می شود، دستگاه های مغناطیس کننده آب ممکن است به صورت توکار یا روکار (داخل جریان یا خارج جریان) نصب شوند. دستگاه های توکار آن هایی هستند که تمام یا قسمتی از قطعاتشان در مسیر جریان قرار دارند. بنابراین برای نصب این دستگاه ها باید قسمتی از لوله از مسیر خارج شود. دستگاه های روکار کاملاً خارج از مسیر آب قرار دارند، بنابراین می توانند روی لوله نصب شوند.



شکل ۵- پایین: دستگاه توکار، بالا: دستگاه روکار [9]

با توجه به لیپوس و همکاران [10] سرعت باید در حدود ۰,۵ - ۲ متر بر ثانیه باشد.

اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص آب

جوشی و کامات [۱۱] گزارش کردند که تاثیر میدان مغناطیسی بر پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب باعث می شود که برخی از خواص فیزیکی آب از جمله چگالی،

کشش سطحی و هدایت الکتریکی تغییر کند. تغییرات pH آب مقطر تا ۰,۴ واحد توسط جوشی و کامات گزارش شده است. با این حال، هیچ تغییری در pH آب دوبار تقطیر تحت تاثیر میدان مغناطیسی بسیار قوی ۲۴۰۰۰ گاوس یافت نشد [۱۲]. یاماشیتا و همکاران [۱۳] شاهد نوسانات آهسته و بزرگ pH (۰,۱-۰,۵) در طی چند ساعت اول مغناطیسی شدن آب مقطر بودند. نتایج آن ها نشان داد که برای بررسی دقیق اثرات میدان مغناطیسی بر روی آب، شرایط آزمایش دقیق مانند شرایط تولید شده توسط دستگاه های متداول آزمایشگاهی و روش های معمول نمی تواند نادیده گرفته شود. وی همچنین بیان می کند که ادامه دادن اندازه گیری ها تا چندین ساعت ممکن است برای مشاهده دقیق تأثیرات آب مغناطیسی ضروری باشد. نوسانات در تغییر pH از آزمایش به آزمایش دیگر نشان می دهد که فعل و انفعالات پیش بینی نشده به تغییر PH کمک می کند. ممکن است رفتار مغناطیسی آب در بعضی از شرایط فقط یک شاخص باشد که نمی توان به تنهایی به آن اعتماد کرد. تای و همکاران [۱۴] با اشاره ای به لینگینگ و کریستینسن، کاهش pH آب از ۹,۲ به ۸,۵ پس از مغناطیسی شدن را گزارش کردند. بوش و همکاران [۱۵] کاهش اولیه ۰,۵ واحد در PH از ۷,۰ به ۶,۵ را نشان دادند و به دنبال آن افزایش تدریجی در طول آزمایش، pH از ۷,۵ به ۸ رسید. پارسونز و همکاران [۱۶] نیز گزارش کردند پس از عبور از آب از طریق دستگاه مغناطیس کننده pH آب ۰,۵ واحد کاهش می یابد.

چو و لی [۱۷] تاثیر مقدار مغناطیسی شدن توسط یک آهنربای دائمی روی کشش سطحی را بررسی کردند. دو آزمایش جداگانه انجام شد: یکی اندازه گیری کشش سطحی بود و دیگری مشاهده رفتار جریان پذیری رنگ در نمونه های آب بود. هر دو آزمایش نشان داد که با افزایش تعداد چرخش آب در میدان مغناطیسی، کشش سطحی نمونه کاهش می یابد. اُتسوکا و همکاران [۱۸] به این نتیجه

رسیدند که پس از قرارگیری در میدان مغناطیسی، هیچ تغییری در خواص آب خالص (مقطر شده از آب فوق خالص در خلاء) مشاهده نشد. با این حال، هنگامی که همان رفتار مغناطیسی پس از مقطر کردن آب در معرض O₂ قرار گرفت، خواص مانند کشش سطحی تغییر یافت.

نشان داده شده است که میزان تبخیر آب، به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر میدان مغناطیسی استاتیکی واقع می‌شود. همچنین گزارش شده است که میزان انحلال اکسیژن در آب به طور قابل ملاحظه‌ای در حضور یک میدان مغناطیسی تسریع می‌گردد [۱۹]. اعمال یک میدان مغناطیس افزایشی به آب، زمانی که میدان مغناطیسی بیشتر از ۰.۵ تسلا است، دمای انجماد کاهش می‌یابد [۲۰]. اندازه کلاسترهای آب در هنگام قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی تغییر می‌کند [۲۱-۲۲]. میزان خوردگی فولاد را تا ۱۴ درصد کاهش می‌دهد و در دمای بالای ۴۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار رسوبات در سطح فولاد خورده شده را به ترتیب ۴۵ و ۳۹ درصد کاهش می‌یابد. رسانایی آب بدون در نظر گرفتن دما کاهش می‌یابد [۲۳].

مک ماون [۲۴] مروری گسترده بر کیفیت آب تحت میدان‌های مغناطیسی انجام داد. برخی اثرات مثبت که آب مغناطیسی می‌تواند ایجاد کند از این قبیل است:

تغییر در pH آب

کاهش کشش سطحی آب

افزایش مقاومت فشاری و کششی سیمان

کاهش رسوبات کربنات کلسیم در تاسیسات مکانیکی حرارتی/برودتی

کاهش نیاز به مصرف آب و افزایش تولید محصولات کشاورزی

مزایای پزشکی/بهداشتی آن همچون افزایش اکسیژن حل شده در آب

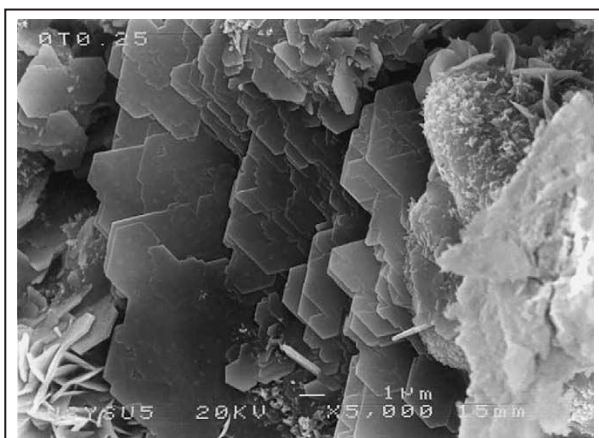
مک ماون نتیجه گرفت که اگرچه در بعضی موارد تاثیر آب مغناطیسی بر بهبود عملکرد واضح است و می‌توان به نتایج مشخص رسید، ولی در دیگر موارد میزان تاثیر آن (به علت خلط اثر آب مغناطیسی با دیگر عوامل) قابل برآورد کمی نبوده و مطالعات و آزمایشات بیشتری در مورد صحت و میزان تاثیر آن لازم است انجام شود. مواردی که در آن تاثیر مثبت آب مغناطیسی عملکرد و خواص بتن با آب مغناطیسی مشخص و واضح تشخیص داده شد می‌توان به آزمایشات مربوط به تغییر در pH آب، کاهش کشش سطحی آب، تغییر عملکرد سیمان، کنترل رسوبگذاری کربنات کلسیم و دیگر املاح، میزان اکسیژن محلول در آب و یا رشد گیاهان اشاره کرد.

یوکای وانگ و همکاران [۲۵] تاثیر میدان مغناطیسی بر خواص فیزیکی آب را مورد بررسی قرار دادند. آب لوله کشی و ۴ نوع آب مغناطیسی در شرایط مشابه اندازه‌گیری شد. مشخص شد که خواص آب شهری پس از قرارگیری تحت میدان مغناطیسی تغییر می‌یابد و باعث افزایش مقدار تبخیر، کاهش حرارت خاص و نقطه جوش پس از مغناطیسی شدن می‌شود. علاوه بر این، قدرت میدان مغناطیسی تاثیر مشخصی روی اثر مغناطیسی دارد. حالت مغناطیسی بهینه تحت میدان مغناطیسی 300 mT تعیین شد. یافته‌های این مطالعه یک رویکرد فشرده برای بهبود بهره‌وری خنک کننده و تولید برق در صنعت ارائه می‌دهد که می‌تواند راه جدیدی برای تغییر ویژگی آب فراهم کند و به صنایع مربوطه برای صرفه جویی در انرژی اعمال می‌شود.

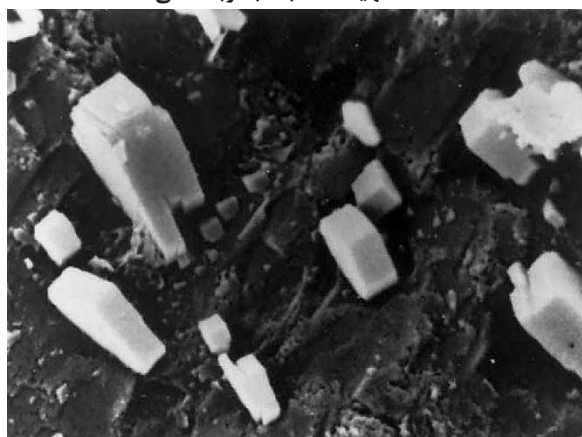
بهبود خواص تازه و مقاومت سیمان و بتن

اکثر تحقیقات دانشمندان علم تکنولوژی بتن روی تولید بتن با کارایی بالا متمرکز شده است. به این منظور راه‌های مختلفی جهت افزایش کارایی و دوام و مقاومت بتن پیشنهاد شده است. اخیراً از مصالحی نظیر میکروسیلیس جهت افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن استفاده می‌گردد

مقاومت بتن در برابر آب انداختگی افزایش یابد و همچنین تا حدودی از یخ زدن بتن جلوگیری شود [۲۶-۳۱]. فو و ونگ [۲۶] نتیجه گرفتند که آب مغناطیسی را می‌توان تا ۱۲ ساعت در مخزن ذخیره کرد ولی بیش از این مدت اثر مغناطیسی آب از بین می‌رود. آزمون SCM سو و همکاران [۵] نشان داد استفاده از آب مغناطیسی به جای آب معمولی در بتن، منجر به تشکیل کریستال‌های کوچک‌تر کلسیم هیدروکسید (CH) می‌شود و در نتیجه موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود (شکل ۶).



الف: تهیه شده با آب لوبه کشی



ب: تهیه شده با آب مغناطیسی [5]

شکل ۶- عکس میکروسکوپ الکترونی رویشی از بلورهای هیدروکسید کلسیم در چسب سیمان

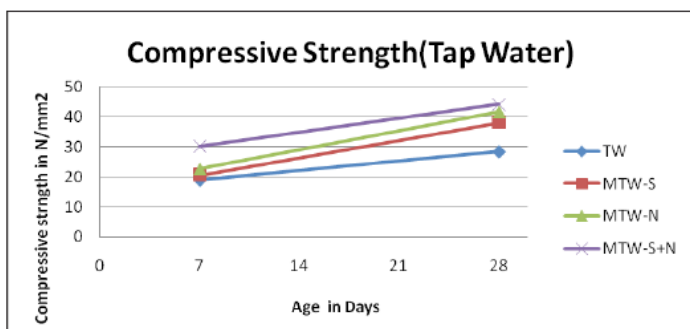
که به دلیل کاربرد روزافزون این نوع بتن شناخت خصوصیات آن حائز اهمیت فراوان است. همچنین استفاده از بتن‌های معمولی با مقاومت بالا نیز معمول است. یکی از راه‌های افزایش کارایی و مقاومت که در کشورهای بلوک شرق مثل چین و روسیه متداول است، استفاده از تکنولوژی مغناطیسی در ساخت بتن است. بدین نحو که با استفاده از تکنولوژی مغناطیسی، آب مغناطیسی تولید شده و در اختلاط بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اثر آب مغناطیسی بر روی بتن می‌تواند برای بتن سازان جالب باشد. هدف از ارائه این تحقیق گشودن مسیری جهت ورود این تکنولوژی به کشور و استفاده از این تکنولوژی بسیار پیشرفته در پروژه‌های تحقیقاتی و اجرایی می‌باشد به این صورت که با برآورد کردن شرایط و هزینه‌ها و با در نظر گرفتن میزان این اثر، نسبت به استفاده از آن اقدام کنند.

در سال ۱۹۶۲ ولاچوسوفوسکی و آلمانیا شروع به تحقیق در رابطه با استفاده از آب مغناطیسی در بتن کردند [۲۶]. تحقیقات مشابهی نیز در ژاپن، اروپا و چین انجام شد که نشان داد آب مغناطیسی می‌تواند مقاومت بتن را تا ۱۰٪ افزایش دهد [۲۷-۲۸]. سو و وو [۲۷] گزارش کردند که چگونه میدان مغناطیسی قادر به شکستن پیوندهای هیدروژنی درون دسته‌ای بوده و نفوذ آب به قسمت اصلی هسته سیمان را تسهیل نموده و عمل هیدراته شدن مقاومت بتن را افزایش می‌دهد. در فرآیند هیدراته شدن، حضور آب مغناطیسی سبب می‌شود، ذرات سیمان به وسیله یک لایه تک مولکولی آب با چگالی و کشش سطحی کمتر احاطه شوند که در نتیجه با افزایش سرعت واکنش و کاهش آب مصرفی، فرآیند هیدراته شدن کامل‌تری رخ می‌دهد [۲۹-۳۰]. استفاده از آب مغناطیسی باعث می‌شود تا ضمن صرفه‌جویی در مصرف سیمان به میزان ۵ درصد،

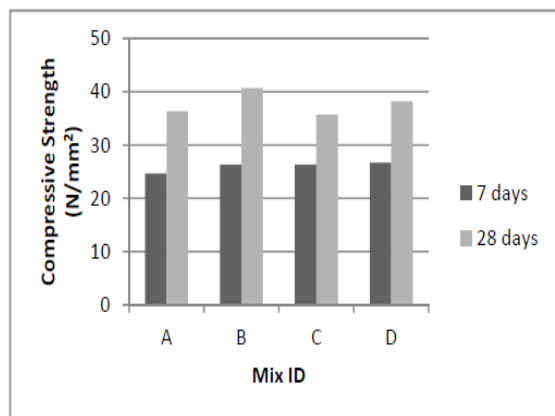
نتایج SCM سوتو- برنال و همکاران [۳۲] نشان می‌دهد که افزایش میدان مغناطیسی منجر به متراکم‌تر شدن و

مغناطیسی، مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به بتن ساخته شده با آب معمولی را نشان می دهد (شکل ۷).

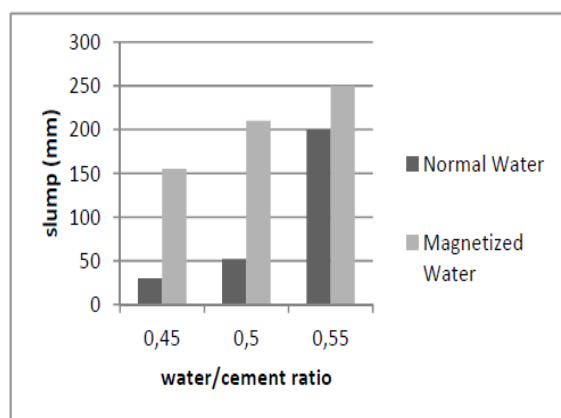


شکل ۷- مقاومت فشاری بتن با و بدون آب مغناطیسی [36]

عبدالمجید و همدان نشان دادند [۳۴] وزن نمونه های مکعبی بتنی می تواند حدود ۳٪ با استفاده از آب مغناطیسی کاهش یابد. و مواد سیمانی در هنگام ترکیب با آب مغناطیسی می تواند تا ۷۵٪ بدون تاثیر بر مقاومت فشاری کاهش یابد (شکل های ۷ و ۸).



شکل ۸- مقاومت فشاری بتن با مخلوط های مختلف [34]



شکل ۹- اسلامپ با نسبت مختلف w/c و نوع آب [34]

کاهش تخلخل ژل هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) می شود. همچنین افزایش میزان و گرمای هیدراته شدن هنگام استفاده از آب مغناطیسی و ارتباط مستقیم بین قدرت میدان مغناطیسی و زمان گیرش خمیر سیمان را گزارش کردند. یک میدان مغناطیسی قوی تر باعث تسریع گیرش سیمان می شود. نان سو و همکاران [۲۷-۵] اثر آب مغناطیسی بر خصوصیات مهندسی بتن حاوی سرباره کوره آهن گدازی را بررسی کردند. متغیرها شامل شدت میدان مغناطیسی آب، جایگزینی سرباره به جای سیمان و نسبت آب به چسباننده (W/B) بود. نتایج نشان داد استفاده از آب مغناطیسی می تواند مقاومت فشاری نمونه ها را بهبود بخشد. میزان افزایش به شدت میدان مغناطیسی آب وابسته است. هنگامی که آب مغناطیسی ۰,۸، ۱,۲ یا ۱,۳۵ تسلا باشد، مقاومت فشاری ملات ها ۹ - ۱۹ درصد افزایش می یابد. با افزایش سن نمونه ها، روند افزایش مقاومت فشاری نمونه های تهیه شده با آب مغناطیسی، مشابه با آب معمولی است. مقاومت فشاری بتن با جایگزینی سرباره بالاتر از بتن بدون سرباره است. همچنین نسبت آب به خمیر بر مقاومت فشاری ملات تهیه شده با آب مغناطیسی تاثیر می گذارد. روند تغییر شبیه به ملات مخلوط با آب معمولی است. صرف نظر از مقدار سرباره، سیالیت ملات تازه تهیه شده با آب مغناطیسی بهتر از سیالیت ملات با آب شیرین آماده است. آب مغناطیسی می تواند مقاومت فشاری بتن را ۱۰ - ۲۳ درصد افزایش دهد. بزرگترین افزایش می تواند زمانی حاصل شود که آب مغناطیسی ۰,۸ یا ۱,۲ تسلا باشد. در مقاومت ۷ روزه اختلاف قابل توجهی در مقاومت فشاری بین بتنی که بطور تقریبی با ۵٪ سرباره جایگزین شده است و نمونه بدون سرباره، وجود ندارد. نمونه های بتنی ساخته شده با آب مغناطیسی، درجه هیدراته شده بالاتری نسبت به نمونه های ساخته شده با آب شیرین دارند. ردی و همکاران [۳۶] نشان دادند کارایی بتن آب مغناطیسی کمی بیشتر از آب معمولی است. چگالی بتن با آب مغناطیسی بالا است و جذب آب آن نسبت به آب معمولی کمتر است. آن ها همچنین گزارش کردند بتن ساخته شده با آب مقطر

طریق میدان مغناطیسی دائمی عبور می‌کند، عوامل مهمی در پایداری و مقاومت هستند. نتایج مجید قلهکی و همکاران [۳۸] نشان داد آب مغناطیسی با افزایش میزان جریان‌پذیری، نیاز مخلوط به کاهنده شدید آب را حدود ۴۵ درصد کاهش می‌دهد. ویسکوزیته بتن خودتراکم را که به وسیله زمان جریان T_5 و زمان عبور بتن از قیف ۷ اندازه‌گیری می‌شود، کاهش می‌دهد. آب مغناطیسی می‌تواند توانایی عبور مخلوط خودتراکم را در جعبه L افزایش دهد. میزان جذب آب بتن خودتراکم بتن ساخته‌شده با آب مغناطیسی حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات می‌توان بیان داشت آب مغناطیسی باعث تغییر در pH آب، کاهش کشش سطحی آب و کاهش رسوبات کربنات کلسیم در تاسیسات مکانیکی حرارتی/برودتی و همچنین بهبود مقاومت و کارایی بتن می‌شود. نوع دستگاه مغناطیس کننده آب بای استفاده حائز اهمیت است. نتایج نشان می‌دهند در فرآیند هیدراتاسیون، حضور آب مغناطیسی سبب می‌شود، ذرات سیمان به وسیله یک لایه تک مولکولی آب با چگالی و کشش سطحی کمتر احاطه شوند که در نتیجه با افزایش سرعت واکنش و کاهش آب مصرفی، فرآیند هیدراتاسیون کامل‌تری رخ می‌دهد. استفاده از آب مغناطیسی به جای آب معمولی در بتن، منجر به تشکیل بلورهای کوچک‌تر کلسیم هیدروکسید (CH) می‌شود و در نتیجه موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. استفاده از آب مغناطیسی باعث می‌شود تا ضمن صرفه جویی در مصرف سیمان به میزان ۵ درصد، مقاومت بتن در برابر آب‌انداختگی و یخزدگی افزایش یابد. آب مغناطیسی با افزایش میزان جریان‌پذیری قادر است نیاز مخلوط به کاهنده شدید آب را کاهش دهد. همچنین می‌تواند ویسکوزیته بتن را کاهش

اچ آی احمد [۳۵] تحقیقی تحت عنوان رفتار بتن مغناطیسی همراه با نانو آلومین مصری انجام داد. تحقیق او نشان داد برای آب معمولی، استفاده از ۱٪ نانو آلومین در مقایسه با ۰٪ مخلوط نانو آلومین در وزن سیمان پرتلند معمولی، مقاومت فشاری را ۱۷ درصد افزایش می‌دهد و تخلخل موئینه را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. برای آب مغناطیسی، استفاده از ۱٪ نانو آلومین در وزن سیمان پرتلند معمولی در مقایسه با ۰٪ مخلوط نانو آلومینا، باعث افزایش ۱۳ درصدی مقاومت فشاری و کاهش ۲۷ درصدی تخلخل موئینه می‌شود. تاکید کرد که استفاده از آب مغناطیسی به جای آب معمولی موجب بهبود قابل توجهی در ریز ساختار بتن شده است، جایی که ساختار آب مغناطیسی چگال‌تر از آب معمولی است.

نتایج آزمایش وی و همکاران [۳۶] نشان داد استفاده از آب مغناطیسی می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت ترک‌خوردگی بتن را بهبود بخشد.

نتایج سعید قربانی و همکاران [۳۷] نشان داد آب مغناطیسی بدون در نظر گرفتن دفعات آب عبور داده شده از میدان مغناطیسی، تاثیر مثبتی بر پایداری و مقاومت نمونه‌های بتنی و در مقایسه با نمونه‌ی شاهد دارد و مقاومت آن‌ها را بهبود می‌بخشد. در این مطالعه، هنگامی که آب معمولی، یک بار از طریق میدان مغناطیسی دائمی عبور می‌کند، نمونه‌های با سرعت جریان 2.75 m/s بیشترین اثر مثبت از میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند، در حالی که وقتی آب از طریق میدان مغناطیسی دائمی، ۵ و ۱۰ بار عبور می‌کند نمونه‌های با سرعت جریان 0.75 m/s بیشترین اثر مثبت از میدان مغناطیسی را نشان دادند. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد دفعات آب عبوری از میدان مغناطیسی، بیشترین مقاومت و پایداری برای سرعت جریان 0.75 m/s و 1.75 m/s به‌دست آمد. جذب آب نمونه‌های بتنی ساخته‌شده با آب مغناطیسی نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با آب معمولی زمانی که ۱، ۵ و ۱۰ بار از میدان مغناطیسی عبور می‌کند، به ترتیب ۱۳، ۶، ۵ و ۱۵ درصد باعث کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که سرعت جریان و تعداد دفعاتی که آب از

- [1] رمضانیاپور، ع. ا. قدوسی، پ. گنجیان، ا. (۱۳۹۵). ریزساختار، خواص و اجزای بتن. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۷۸۱.
- [2] Brower, J. (2005). *Magnetic water treatment. Pollution Engineering*, 37(2), 26-28.
- [3] Ghorbani, S., Gholizadeh, M., & de Brito, J. (2018). *Effect of magnetized water on the mechanical and durability properties of concrete block pavers. Materials*, 11(9), 1647.
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1902/lorentz/facts/>
- [5] Su, N., & Wu, C. F. (2003). *Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. Cement and concrete composites*, 25(7), 681-688.
- [6] Quinn, C. J., Molden, T. C., & Sanderson, C. H. (1997). *Magnetic treatment of water prevents mineral build-up. Iron and steel Engineer*, 74, 47-52.
- [7] Zhou, K. X., Lu, G. W., Zhou, Q. C., Song, J. H., Jiang, S. T., & Xia, H. R. (2000). *Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field. Journal of Applied Physics*, 88(4), 1802-1805.
- [8] Baker, J. S., & Judd, S. J. (1996). *Magnetic amelioration of scale formation. Water research*, 30(2), 247-260.
- [9] McMahon, C. A. (2009). *Investigation of the quality of water treated by magnetic fields.*
- [10] Lipus, L. C., & Dobersek, D. (2007). *Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. Chemical Engineering Science*, 62(7), 2089-2095.
- [11] Joshi, K. M., & Kamat, P. V. (1966). *Effect of magnetic field on the physical properties of water. J. Ind. Chem. Soc*, 43, 620-622.
- [12] Quickenden, T. I., Betts, D. M., Cole, B., & Noble, M. (1971). *Effect of magnetic fields on the pH of water. The Journal of Physical Chemistry*, 75(18), 2830-2831.
- [13] Yamashita, M., Duffield, C., & Tiller, W. A. (2003). *Direct Current Magnetic Field and Electromagnetic Field Effects on the pH and Oxidation–Reduction Potential Equilibration Rates of Water. I. Purified Water. Langmuir*, 19(17), 6851-6856.
- [14] Tai, C. Y., Chang, M. C., Shieh, R. J., & Chen, T. G. (2008). *Magnetic effects on crystal growth rate of calcite in a constant-composition environment. Journal of Crystal Growth*, 310(15), 3690-3697.
- [15] Busch, K. W., & Busch, M. A. (1997). *Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. Desalination*, 109(2), 131-148.
- [16] Parsons, S. Wang, B, Judd, J. Stephenson, T., 1997. *MAGNETIC TREATMENT OF CALCIUM CARBONATE SCALE-EFFECT OF pH, Water Research* 31 (2), 339–342.
- [17] Cho, Y. I., & Lee, S. H. (2005). *Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(1-2), 1-9.
- [18] Otsuka, I., & Ozeki, S. (2006). *Does magnetic treatment of water change its properties?. The Journal of Physical Chemistry B*, 110(4), 1509-1512.
- [19] Nakagawa, J., Hirota, N., Kitazawa, K., & Shoda, M. (1999). *Magnetic field enhancement of water vaporization. Journal of applied physics*, 86(5), 2923-2925.
- [20] Aleksandrov, V. D., Barannikov, A. A., & Dobritsa, N. V. (2000). *Effect of magnetic field on the supercooling of water drops. Inorganic materials*, 36(9), 895-898.

- [21] Lee, S. H., Takeda, M., & Nishigaki, K. (2003). Gas-Liquid Interface Deformation of Flowing Water in Gradient Magnetic Field-Influence of Flow Velocity and NaCl Concentration. *Japanese journal of applied physics*, 42(4R), 1828.
- [22] Iwasaka, M., & Ueno, S. (1998). Structure of water molecules under 14 T magnetic field. *Journal of applied physics*, 83(11), 6459-6461.
- [23] Bikul'chuyus, G., Ruchinskene, A., & Deninis, V. (2003). Corrosion behavior of low-carbon steel in tap water treated with permanent magnetic field. *Protection of Metals*, 39(5), 443-447.
- [24] McMahon, C. A. (2009). Investigation of the quality of water treated by magnetic fields.
- [25] Wang, Y., Wei, H., & Li, Z. (2018). Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in physics*, 8, 262-267.
- [26] Fu, W., & Wang, Z. B. (1994). *The new technology of concrete engineering*. Beijing: The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 56-59.
- [27] Su, N., Wu, Y. H., & Mar, C. Y. (2000). Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 599-605.
- [28] Su, N., & Lee, K. C. (1999). Effect of magnetic water on mechanical properties and microstructures of concrete. *J. Chin Inst Civ Hydraul Eng*, 11(3).
- [29] Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., & Keddad, M. (2001). Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research*, 35(13), 3249-3259.
- [30] Kronenberg, K. (1985). Experimental evidence for effects of magnetic fields on moving water. *IEEE Transactions on magnetics*, 21(5), 2059-2061.
- [31] Chau, Z. J. (1996). *The new construction method of concrete*. The Publishing House of Chinese Architectural Industry, Beijing, 401-407.
- [32] Soto-Bernal, J. J., Gonzalez-Mota, R., Rosales-Candelas, I., & Ortiz-Lozano, J. A. (2015). Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- [33] Reddy, B. S. K., Ghorpade, V. G., & Rao, H. S. (2014). Influence of magnetic water on strength properties of concrete. *Indian journal of science and technology*, 7(1), 14-18.
- [34] Abdel-Magid, T. I. M., Hamdan, R. M., Abdelgader, A. A. B., & Omer, M. E. A. (2017). Effect of magnetized water on workability and compressive strength of concrete. *Procedia engineering*, 193, 494-500.
- [35] Ahmed, H. I. (2017). Behavior of magnetic concrete incorporated with Egyptian nano alumina. *Construction and Building Materials*, 150, 404-408.
- [36] Wei, H., Wang, Y., & Luo, J. (2017). Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. *Construction and Building Materials*, 147, 91-100.
- [37] Ghorbani, S., Ghorbani, S., Tao, Z., De Brito, J., & Tavakkolizadeh, M. (2019). Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 280-290.
- [38] Gholhaki, M., Hajforoush, M., & Kazemi, M. (2018). An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 158, 173-180.

شبیه‌سازی رفتار حرارتی بلوک‌های بتنی سبک‌دانه حفره‌دار ساده یا پر شده با عایق حرارتی



بهرز کاری
عضو هیات علمی مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی



فهیمة توران‌پشتی
کارشناس دانشگاه تهران



الهام هراتیان‌نژاد
کارشناس مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی



علیرضا پورخورشیدی
عضو هیات علمی مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



جعفر سبحانی
عضو هیات علمی مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

نگرانی‌های روزافزون ناشی از چالش‌های مطرح در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و حفاظت از منابع طبیعی باعث شده است تا تلاش‌های علمی و صنعتی بسیاری، در جهت بهبود بلوک‌های ساختمانی مورد استفاده در ساخت دیوارهای پوسته‌خارجی ساختمان‌ها، و برآورده کردن انتظارات تعیین‌شده در راستای صرفه‌جویی انرژی انجام شود. بدیهی است دست‌یابی به راه‌حل‌های مطلوب بدون درک رفتار حرارتی دقیق این بلوک‌ها و حساسیت‌سنجی تأثیر پارامترهای مرتبط با هندسه و خصوصیات فیزیکی - حرارتی بدنه آنها رخ نمی‌دهد. در طراحی و ساخت ساختمان‌های با مصرف انرژی کم، استفاده از مصالح عایق در پوسته ساختمان از اهمیت زیادی برخوردار است، و افزایش مقاومت حرارتی جدارها، با استفاده از عایق‌های حرارتی، بهبود عملکرد حرارتی ساختمان را به همراه دارد. یکی از فناوری‌های سبک‌سازی مطرح که بیشترین مقاومت فشاری سنگدانه‌ای را به همراه دارد، کاربرد سنگدانه‌های رس منبسط‌شده است. سنگدانه‌های رس منبسط‌شده، به دلیل ویژگی‌های فنی و مزایای بی‌شمار، از جمله بهبود ویژگی‌های حرارتی و صوتی محصول نهایی، در مقایسه با بسیاری از مواد اولیه صنعتی مورد استفاده در صنعت ساختمان، کاربرد بسیار زیادی دارند. استفاده از این مصالح به جای بتن با چگالی زیاد می‌تواند کارایی ساختاری ساختمان‌ها را بهبود بخشد و فرصت‌های بسیاری را در جهت بهبود عملکرد آن ایجاد می‌کند. در این مقاله، ابتدا انتظارات تعیین‌شده در ویرایش جدید مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان تشریح می‌گردد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی، تأثیر تعداد حفره‌ها در ضریب انتقال حرارت بلوک پر شده با عایق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان، جمع‌بندی و پیشنهادات برای بهبود عملکرد حرارتی ارائه می‌گردد.

Simulation of thermal behavior of lightweight hollow concrete blocks with air cavity or with cavity filled with thermal insulation

کلمات کلیدی: بلوک سیمانی، سبک‌دانه رس منبسط‌شده، ضریب انتقال حرارت، صرفه‌جویی انرژی

نظر به این که بخش اعظم انرژی مصرفی ساختمان‌ها صرف گرمایش و سرمایش ساختمان می‌شود، لذا استفاده از مصالح مناسب در ساخت جدارهای پوسته خارجی ساختمان می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی گردد. مطالعات متعددی در رابطه با این موضوع انجام شده است تا اثربخشی محل و ضخامت عایق در کاهش مصرف انرژی برای شرایط مختلف آب و هوایی و جهت‌گیری‌های مختلف دیوار ارزیابی شود. در اکثر مطالعات صورت گرفته، میزان دما و شدت تابش خورشیدی در اوقات مختلف سال جزو متغیرهای محیط خارج در نظر گرفته شده است، و دمای هوای داخل فضاها غالباً ثابت فرض شده است.

راهکار جذابی که در پروژه‌های متداول ساخت به صورت جدی مطرح است، کاربرد بلوک‌هایی است که به واسطه داشتن مقاومت حرارت قابل توجه، می‌توانند نیاز به یک لایه مضاعف عایق حرارتی را مرتفع سازند. افزایش مقاومت حرارتی بلوک‌ها به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است (جدول ۱-۱) علاوه بر این، ضخامت ملات که در حالت‌های متعارف بین ۸ تا ۱۲ میلی‌متر است، می‌تواند با ایجاد پل‌های حرارتی انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، و لازم است در راهکارهایی که برای کاهش انتقال حرارت از دیوارها در نظر گرفته می‌شود، برای بهبود کارایی این بخش از دیوار نیز راه‌حل‌های مناسبی پیشنهاد گردد.

جدول ۱-۱ راهکارهای پیشنهادی برای افزایش مقاومت حرارتی بلوک

بلوک توپر	○ کاهش ضریب هدایت حرارت بتن + افزایش ضخامت بلوک
بلوک حفره‌دار	○ کاهش ضریب هدایت حرارت بدنه بتنی ○ افزایش تعداد ردیف حفره‌ها (برای کاهش انتقال حرارت تابشی) ○ نزدیک کردن ضخامت لایه‌های هوا به ضخامت بهینه (برای کاهش انتقال حرارت همرفتی) ○ بهبود هندسه حفره‌ها (برای کاهش انتقال حرارت هدایتی)
	○ کاهش ضریب هدایت حرارت بتن + پر کردن تمامی یا بخشی از حفره‌ها با عایق حرارتی

- استفاده از سنگدانه و مواد پرکننده سبک، به جای سنگ‌دانه سنگین متعارف

- بهره‌گیری از فرایندهایی برای ایجاد حباب در مراحل اولیه تولید بتن

باید توجه داشت بهره‌گیری از مصالح سبک در ساختمان‌ها اقدام مهمی است در جهت کاهش بار مرده ساختمان، که کاهش نیروهای ناشی از زلزله را نیز به همراه دارد. از جایی که تفاوت در تراکم ظاهری و هدایت حرارتی مؤثر بتن از تفاوت در تخلخل آنها ناشی می‌شود، لذا هدایت حرارتی بتن تا حد زیادی وابسته به چگالی ظاهری آن است.

مطالعات بسیاری در مورد مصالح سبک و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده است، که بخشی از آن معطوف به فرآیند ارتقاء روش‌های ساخت و ساز معمولی به صنعتی با بهبود عملکرد حرارتی بلوک‌های سبک مورد استفاده برای اجرای دیوارهای بنایی انجام شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز مطرح شد، گام اصلی در جهت بهبود عملکرد حرارتی بلوک‌ها، کاهش ضریب هدایت بدنه بتنی آنهاست، و این کار با سبک‌سازی بتن صورت می‌گیرد، که خود به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است:

همچنین باید در نظر داشت که با افزایش رطوبت، هدایت حرارتی بتن افزایش می‌یابد.

امروزه در بازار انواع بلوک‌های مختلف، با ابعاد متفاوت، با یا بدون حفره، وجود دارد که با خصوصیات حرارتی مختلفی ارائه می‌شوند. در این میان، بلوک‌های بتنی حفره‌دار از پتانسیل بالاتر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش مصرف مواد اولیه و کاهش تأثیرات زیست محیطی برخوردار هستند.

عوامل اصلی تأثیرگذار در انتقال حرارت دیواره‌های بلوک بتنی حفره‌دار، اندازه، تعداد، موقعیت و شکل حفره‌ها، خصوصیات حرارتی ملات و ویژگی‌های حرارتی مواد پرکننده حفره‌ها است، که تأثیر مستقیمی در کاهش شار گرما در این بلوک‌ها دارد، به طوری که اصلاح خصوصیات حرارتی دیواره‌های بلوک حفره‌دار مورد استفاده و نیز پرکردن حفره‌ها بهبود عملکرد حرارتی جدار و افزایش مقاومت حرارتی آنها را به همراه دارد. این امر لزوم بررسی انواع گزینه‌های مطرح برای حفره‌ها، برای به حداقل رسانیدن میزان انرژی مورد نیاز برای سرمایش یا گرمایش ساختمان را روشن می‌سازد.

بنابراین، بررسی دقیق پارامترهای اصلی تعیین‌کننده میزان انتقال حرارت در بلوک‌ها، برای تجزیه و تحلیل، برای تفکیک اثر و تعیین کارایی هر اقدام اصلاحی، و ارائه بهترین توصیه‌ها برای بهبود عملکرد حرارتی جدار از اهمیت بالایی برخوردار است.

گرایش‌های فعلی در صنعت ساختمان با تمایل بیشتر به طراحی و تولید مصالح ساختمانی دارای خواص عایق حرارتی پیشرفته برای دستیابی به صرفه‌جویی در انرژی مشخص می‌شود [۴-۱]، توسعه بر روی انواع مواد تشکیل دهنده پوسته ساختمان، یعنی عایق‌های حرارتی، گچ‌ها و ملات‌ها، و مواد سازه‌های تحمل بار متمرکز شده است.

بلوک‌های با سیستم‌های پیچیده حفره داخلی که در طی چند دهه گذشته در سراسر جهان تولید می‌شود، تقریباً کاملاً جایگزین آجرهای سنتی می‌شوند [۵-۹]. در دهه‌های اخیر، انواعی از بلوک‌های حفره‌دار (توخالی)، که حفره‌های آنها توسط مواد مختلف عایق حرارتی پر شده‌است، مطرح شده‌است. اگرچه این راه حل در نگاه اول غیر منطقی و ناکارآمد به نظر می‌رسد، ولی از آنجا که رسانایی گرمایی هوا در حفره‌ها در مقایسه با هدایت حرارتی مواد عایق معمول بسیار کمتر است، این کار هم مصرف مصالح و هم میزان انتقال حرارت از طریق بلوک را کاهش می‌دهد. در حفره‌های هوا، گرما با سه روش مختلف یعنی هدایت، همرفت و تابش منتقل می‌شود. در نتیجه، انتقال حرارتی مؤثر در بلوک باید به عنوان ترکیبی از راه‌های مختلف انتقال گرما تعریف شود.

مواد عایق حرارتی در حفره‌های یک بلوک می‌توانند انتقال گرما از تابش را به مقدار قابل توجهی در مقایسه با هوا کاهش دهند. در نتیجه، خصوصیات حرارتی بلوک اصلاح شده باید از بلوک حفره‌دار ساده (بدون پر کردن حفره) بهتر باشد. بر خلاف بلوک‌های توپر، که در آن هدایت حرارتی به راحتی با استفاده از انواع روش‌های استاندارد مانند روش گرم صفحه محافظت شده قابل اندازه‌گیری است [۱۰-۱۱]، هندسه پیچیده بلوک‌های توخالی استفاده از روش‌های معمول را غیرممکن می‌کند. بنابراین، برای تعیین هدایت حرارتی مؤثر (یا معادل آن) بلوک‌های توخالی، از روش‌های آزمایشی جایگزین یا شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه بعدی استفاده می‌شود. ویوانکوس و همکاران [۱۲] در یک مطالعه تجربی، با هدف شناسایی رسانایی گرمایی مؤثر، مدلی را برای خصوصیات حرارتی بلوک‌های توخالی بر اساس کاربرد روش صفحه گرم محافظت شده پیشنهاد کردند.

جدول ۱۰۰ حداقل مقدار مقاومت فشاری لازم

مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)		رده مقاومت فشاری
بلوک منفرد	میانگین ۳ بلوک	
۲۰	۲۵	۲
۴۰	۵۰	۴
۶۰	۷۵	۶
۸۰	۱۰۰	۸

۳- انتظارات حرارتی تعیین شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

در ویرایش ۸۹ مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، دو روش برای طراحی پوسته خارجی ساختمان در نظر گرفته شده است. در روش اول، مقاومت حرارتی تمامی جدارها باید از مقادیر مرجع تعیین شده بیشتر باشد. لازم به ذکر است از بین حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای دیوار که شامل عایق از خارج، عایق از داخل، عایق میانی و عایق همگن، در صورت استفاده از بلوک‌های بتنی سبک، باید مقادیر در نظر گرفته شده برای دیوارهای همگن ملاک عمل قرار گیرد. مقادیر تعیین شده برای دیوارهای خارجی همگن گروه‌های مختلف ساختمان‌ها به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۱۰۰ مقادیر مقاومت حرارتی تعیین شده برای دیوارهای خارجی همگن گروه‌های مختلف ساختمان‌ها

مقاومت حرارتی حداقل دیوار ($m^2.K/W$)				ساختمان با پنجره برتر	گروه ساختمان
ساختمان با پنجره معمولی					
$25 > WWR (\%) > 20$	$20 > WWR (\%) > 15$	$15 > WWR (\%) > 10$	$10 > WWR (\%) > 0$		
غیرمجاز	غیرمجاز	غیرمجاز	غیرمجاز	۲,۱	۱
غیرمجاز	غیرمجاز	۴,۱	۲,۸	۱,۴	۲
۴,۶	۲,۸	۲,۱	۱,۹	۱,۱	۳

دیگر جدارها فراهم می‌باشد، ولی نکته مهم مطرح این است که طراحی منحصر به ساختمان است و قابل تعمیم به دیگر ساختمان‌ها نمی‌باشد. در نتیجه، در بررسی‌های

با توجه به این نکته که دیوار ساخته شده با بلوک حفره‌دار غیرهمگن تلقی می‌گردد، بنابراین، انتقال حرارت درون بلوک حفره‌دار نمی‌تواند به عنوان یک فرآیند یک بعدی در نظر گرفته شود. از طرف دیگر، معادل‌سازی بلوک با مجموعه‌ای از مقاومت‌های سری و موازی نیز با این فرض انجام می‌گیرد که تمامی جریان‌های حرارت، عمود بر سطوح داخلی و خارجی دیوار است، که همان‌طور که میدانیم فرضی غلط است. در نتیجه، ساده‌سازی خطاهای چشم‌گیری را به دنبال دارد، خصوصاً زمانی که تفاوت‌های بین ضرایب هدایت حرارت بدنه بلوک و عایق قابل توجه است. در این مقاله، تعیین رفتار حرارتی بلوک حفره‌دار با بهره‌گیری از محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های سه بعدی برای چند نوع متداول بلوک‌های بتنی تولید شده در ایران، ارائه می‌شود.

۲- الزامات مقاومت فشاری برای بلوک‌های بتنی سبک‌دانه

مقاومت فشاری بلوک‌های سیمانی سبک غیر باربر که طبق استاندارد ASTM C 140 آزمایش می‌شوند، باید مطابق با الزامات ذکر شده در جدول ۱۰۰ باشد.

در همین ویرایش، روش کارکردی نیز قابل اجرا می‌باشد، و در صورت طراحی بر مبنای آن، امکان کاهش مقاومت بعضی از جدارها و جبران آن با افزایش مقاومت حرارت

صورت گرفته، مقادیر تعیین شده در روش تجویزی مبنای کار قرار گرفت، تا امکان طرح یک جمع بندی کلی قابل تعمیم به تمامی ساختمان ها فراهم گردد.

در ویرایش جدید مبحث، تغییراتی در مقادیر حداقل تعیین شده صورت گرفته است، و مهم ترین تغییری که در روش تجویزی صورت گرفته است منتفی شدن کاربرد پنجره های معمولی است.

۴- فرضیات در نظر گرفته شده برای انجام شبیه سازی ها

برای بررسی دقیق تر با در نظر گرفتن تأثیر انتقال حرارت توسط همرفت و تابش، محاسبات با انجام شبیه سازی سه بعدی با نرم افزار کامسول تکرار شد و تجزیه و تحلیل سه بعدی بهینه سازی برای بلوک های حفره دار با الگوهای متفاوت (از میان بلوک های موجود در یک شرکت) با استفاده از روش عناصر محدود FEM بررسی گردید.

نرم افزار کامسول^۱ یک مجموعه کامل شبیه سازی است که می تواند معادلات دیفرانسیل سیستم های غیر خطی را توسط مشتق های جزئی به روش اجزاء محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید.

در این مدل شبیه سازی، فیزیک heat transfer in solid and fluids انتخاب شده است.

- شبکه بندی (مش): در این مطالعه سه بعدی، مش ساختاری برای هر بلوک با حداکثر سایز المان ۰/۰۱۷ در نظر گرفته شد.

در نهایت شبیه سازی ها در حالت پایدار محاسبه شد. گردش هوا در داخل هر حفره، که باعث انتقال همرفت طبیعی می شود، به عنوان یک جریان سیال لمینار در نظر گرفته می شود و علاوه بر همرفت، تابش حرارتی نیز در نظر گرفته شد.

در این محاسبات مصالح مورد استفاده به شرح زیر می باشد:

بتن: بدنه بلوک با ضریب هدایت حرارت، $[W/(m.K)]$ ، ۰/۲۶.

چگالی بتن $[kg/m^3]$ ۷۰۰ و ظرفیت گرمایی ویژه $[J/(kg.K)]$ ۸۸۰.

مالات مورد استفاده با ضریب هدایت، $[W/(m.K)]$ ۰/۰۹ و ضخامت ۵ میلیمتر

چگالی ملات $[kg/m^3]$ ۹۰۰ و ظرفیت گرمایی ویژه $[J/(kg.K)]$ ۸۸۰.

عایق حرارتی به عنوان پرکننده حفره ها با ضریب هدایت حرارت، $[W/(m.K)]$ ۰/۰۳۸.

چگالی عایق $[kg/m^3]$ ۵۰ و ظرفیت گرمایی ویژه $[J/(kg.K)]$ ۸۴۰.

شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی:

ضریب انتقال حرارت در سطح خارجی جدار برابر با مقدار $[W/(m^2.K)]$ ۱۶/۶۶.

ضریب انتقال حرارت در سطح داخلی جدار برابر با مقدار $[W/(m^2.K)]$ ۹/۰۹.

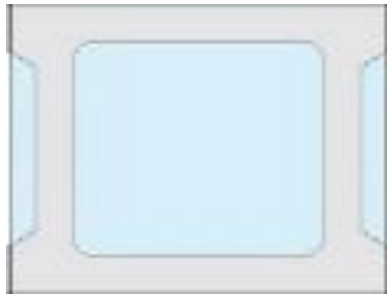
دمای هوا در سمت سرد (محیط خارج) برابر با ۰/۰ درجه سلسیوس

دمای هوا در سمت گرم (محیط داخل) برابر با ۲۰/۰ درجه سلسیوس

۵- تأثیر هندسه بلوک در انتقال حرارت جدار

برای بررسی تعیین تأثیر تعداد حفره ها در انتقال حرارت بلوک، ابتدا یک بلوک ساده با ضخامت ۱۵ سانتی متر، با حفره هوا به عرض ۱۱ سانتی متر در نظر گرفته شد. سپس با افزایش تعداد ردیف حفره ها و کاهش عرض حفره، تأثیر وجود تعداد حفره در مقاومت حرارتی بلوک بررسی گردد (شکل ۱-۰).

¹ Comsol



بلوک تیپ ۱



بلوک تیپ ۲

شکل ۱-۰ انواع بلوک مورد بررسی

داد که در صورت عدم استفاده از عایق حرارتی (برای پر کردن تمامی یا بخشی از حفره‌ها):

- مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی جدار ساخته شده با این بلوک‌ها عبارتند از: تعداد دیواره‌های میانی، ضخامت بلوک، ابعاد و تعداد ردیف‌های حفره‌ها.

- تابش حرارتی بخش مهمی از انتقال حرارت در حفره‌های بلوک را به خود اختصاص می‌دهد. راه‌های مختلف برای کاهش انتقال حرارت تابشی عبارتند از کاهش ضریب جذب (یا گسیلندگی) گرمایی و کاهش اختلاف دمای سطوح بدنه‌های حفره‌ها. با توجه به این نکته که کاهش گسیلندگی یا ضریب جذب گرمایی اقدامی پیچیده‌است و مستلزم نشانیدن یک لایه پوشش منعکس‌کننده آلومینیومی یا مشابه می‌باشد. لذا تنها راه کاهش انتقال حرارت تابشی در حفره‌ها، کم کردن اختلاف دمای سطوح حفره است که با افزایش تعداد ردیف حفره‌ها امکان‌پذیر می‌باشد.

- بخش مهم دیگر انتقال حرارت ناشی از جریان همرفت داخل حفره‌ها است. یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای به حداقل رساندن انتقال حرارت در حفره‌های بلوک‌های بتنی، کاهش ضخامت حفره‌ها تا میزان بهینه (حدود ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر) است که می‌تواند با افزایش تعداد ردیف حفره‌ها همراه باشد.

به عبارت دیگر، افزایش تعداد ردیف حفره‌ها هم انتقال حرارت تابشی و هم انتقال حرارت همرفتی را به صورت هم‌زمان کاهش می‌دهد.

در اولین بررسی با افزایش تعداد ردیف‌های حفره هوا، از بلوک تیپ ۱ به بلوک تیپ ۲، بدون تغییر در عرض و جنس بدنه بلوک، مقدار مقاومت حرارتی ۳۸ درصد افزایش یافت. این بررسی تأثیر انتقال حرارت همرفت در بلوک را به خوبی نشان می‌دهد.

در بررسی دیگر، برای کاهش اثر انتقال حرارت تابشی، تمام حفره‌ها با یک عایق با ضریب هدایت حرارت حدود 0.04 W/m.K پر شدند. نتایج نشان داد، اگر حفره‌ها با عایق پر شود، به دلیل افزایش اثر پل حرارتی بدنه بلوک، افزایش تعداد حفره‌ها موجب کاهش مقاومت حرارتی بلوک خواهد شد و در این موارد افزایش تعداد حفره پر شده با عایق پیشنهاد نمی‌گردد.

همچنین، در صورت پر کردن حفره‌ها با ملات از جنس بلوک، همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش تعداد حفره، و ثابت ماندن ضخامت بلوک، تأثیر قابل توجهی در مقاومت حرارتی مشاهده نمی‌شود.

بنابراین، در حالت کلی، کاربرد بلوک با یک ردیف حفره بزرگ هوا، از نظر عملکرد حرارتی، هیچ توجیهی ندارد و در صورت عدم امکان استفاده از عایق اضافی در حفره‌ها می‌توان با افزایش تعداد ردیف حفره، با کاهش انتقال حرارت همرفتی، مقاومت حرارتی را افزایش داد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر وجود عایق در حفره‌های بلوک حفره‌دار بر عملکرد حرارتی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان

- با کاهش انتقال حرارت تابشی و همرفتی، لازم خواهد بود برای کاهش انتقال حرارت در اثر هدایت هم اقدام مؤثری صورت گیرد. این کار با کاهش ضریب هدایت حرارت بدنه بتنی، کاهش عرض بدنه‌های بتنی بین ردیف‌های مختلف حفره‌ها و همچنین تغییر هندسه بلوک برای طولانی‌تر کردن مسیر جریان حرارت از یک طرف بلوک به سمت دیگر اجرایی می‌گردد.

- به طور کلی، می‌توان اظهار داشت که تنظیمات مختلف حفره‌ها در داخل بلوک‌های توخالی می‌تواند بر انتقال متقابل حرارتی بلوک‌ها تأثیر بگذارد. این امر به دلیل برهمکنش بین هدایت، همرفت و تابش حرارتی ناشی از هندسه توخالی بلوک است.

در صورت عدم استفاده از عایق حرارتی، برای پر کردن تمامی یا بخشی از حفره‌ها، نتایج متفاوتی به شرح زیر به دست می‌آید:

- مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی جدار ساخته شده با این بلوک‌ها عبارتند از: تعداد دیواره‌های میانی، ضریب هدایت حرارتی بدنه بلوک، ضریب هدایت حرارتی معادل عایق داخل حفره‌ها، ضخامت بلوک، ابعاد و تعداد ردیف‌های حفره‌ها.

- در صورت پرشدن حفره با یک عایق حرارتی، انتقال حرارت در اثر تابش و همرفت منتفی می‌شود، و انجام اقداماتی نظیر نشانیدن یک لایه پوشش منعکس‌کننده آلومینیومی یا مشابه، روی سطوح داخلی حفره‌ها، یا افزایش تعداد ردیف حفره‌ها، یا کاهش ضخامت حفره‌ها تا

میزان بهینه (حدود ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر) دیگر موضوعیتی ندارند.

- البته، بهبود هندسه بلوک، برای افزایش مسیر انتقال حرارت در اثر هدایت، از یک طرف بلوک به سمت دیگر، کماکان حائز اهمیت خواهد بود، واز طرف دیگر، کاهش ضریب هدایت حرارت بدنه بتنی، و کاهش ضخامت بدنه‌های بتنی پیرامونی و بین ردیف‌های مختلف حفره‌ها اثربخشی کاربرد عایق حرارتی در حفره‌ها را دوچندان می‌کند.

با توجه به این موارد، توصیه‌ها برای ارتقاء عملکرد حرارتی بلوک‌های شرکت مدنظر انجام اقدامات زیر است:

- در بلوک تیپ ۱، افزودن یک عایق حرارتی با ضریب هدایت حرارت 0.38 W/m.K داخل حفره، مقاومت حرارتی جدار را تا ۳ برابر بهبود خواهد داد و کاربرد این نوع بلوک را برای گروه‌های ساختمانی ۲ و ۳ در ساختمان‌های با پنجره برتر مجاز خواهد بود. البته این امر به معنای غیرمجاز بودن استفاده از این بلوک‌ها در دیگر موارد نیست. در دیگر موارد، لازم است با استفاده از روش‌های دیگر طراحی مشخص شده در مبحث ۱۹، جواب‌گویی به انتظارات تعیین شده مورد بررسی قرار گیرد.

- در بلوک تیپ ۲، افزودن یک عایق حرارتی با ضریب هدایت حرارت 0.38 W/m.K داخل حفره‌ها، مقاومت حرارتی جدار را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. در نتیجه، کاربرد این نوع بلوک برای گروه‌های ساختمانی ۲ و ۳ در ساختمان‌های با پنجره برتر مجاز خواهد بود.

۷- قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی کمال قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

- [1] D’Orazio, M., Di Perna, C., Di Giuseppe, E., et al. (2013). “Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: field tests under hot climatic conditions”. *Journal of Building Physics*, 36, 229–246.
- [2] Grynning, S., Jelle, BP., Uvslokk, S., et al. (2011). “Hot box investigations and theoretical assessments of miscellaneous vacuum insulation panel configurations in building envelopes.” *Journal of Building Physics*, 34, 297–324.
- [3] Haavi, T., Jelle, BP., and Gustavsen, A. (2012). “Vacuum insulation panels in wood frame wall constructions with different stud profiles.” *Journal of Building Physics*, 36, 212–226.
- [4] Sveipe, E., Jelle, BP., Wegger, E., et al. (2011). “Improving thermal insulation of timber frame walls by retrofitting with vacuum insulation panels—experimental and theoretical investigations.” *Journal of Building Physics*, 35, 168–188.
- [5] Antoniadis, KD., Assael, MJ., Tsiglifisi, CA., et al. (2012). “Improving the design of Greek hollow clay bricks.” *International Journal of Thermophysics*, 33, 2274–2290.
- [6] Arendt, K., Krzaczek, M., and Florczuk, J. (2011). Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1543–1553.
- [7] Nguyen, TD. and Meftah, F. (2012). “Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part I: experimental analysis.” *Fire Safety Journal*, 52, 55–64.
- [8] Principi P and Fioretti R (2012). “Thermal analysis of the application of PCM and low emissivity coating in hollow bricks.” *Energy and Buildings*, 51, 131–142.
- [9] Svoboda, Z., and Kubr, M. (2011). Numerical simulation of heat transfer through hollow bricks in the vertical direction. *Journal of Building Physics*, 34, 325–350.
- [10] Ng, SC., and Low, KS. (2010). “Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel.” *Energy and Buildings*, 42, 2452–2456.
- [11] Wu, J., and Morell, R., (2012). “Corrections for thermal expansion in thermal conductivity measurement of insulations using the high-temperature guarded hot-plate method.” *International Journal of Thermophysics*, 33, 330–341.
- [12] Vivancos, JL., Soto, J., Perez, I., et al. (2009). “A new model based on experimental results for the thermal characterization of bricks.” *Building and Environment*, 44, 1047–1052.