

معماری گلین، گزینه صنعت ساختمان برای مدیریت بحران کم آبی مقایسه تحلیلی مصرف آب در یک بنای نمونه با سه سازه فولادی، بتنی و گلین

محسن عباسی هرفته*

تاریخ دریافت مقاله:

۱۴۰۰/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۴۰۱/۰۴/۲۱

چکیده

آمار و ارقام دقیقی از میزان مصرف آب در صنعت ساختمان کشور (چه آبی که مستقیماً در این فرایند مصرف می شود و چه آب پنهان) وجود ندارد. اساساً بین سیستم های معمول ساخت و ساز با سیستم های جایگزینی که می توانند مطرح باشند اولویت سنجی از حیث آب خواهی صورت نگرفته است. نظر به اینکه بحران کم آبی در ایران بسیار جدی است و صنعت ساختمان به عنوان یکی از آب خوارترین صنایع مطرح است، این مقاله با چشم انداز کاهش مصرف آب از طریق انتخاب بهینه سیستم سازه های ساختمان های عرفی که در کشور ساخته می شوند این هدف را دنبال می کند که میزان آب مصرفی سیستم های فولادی و بتنی مرسوم در نظام ساخت و ساز کشور را با سیستم سازه های گلین، که در دنیا مجدداً مطرح شده است و البته شیوه های سنتی آن سابقه ای طولانی دارد، مقایسه نماید. لذا دو سؤال مطرح است؛ نخست آنکه میزان مصرف آب در مرحله سفت کاری ساختمان های عرفی در کشور چگونه است؟ پس از این سؤال و با هدف رسیدن به شیوه ای مناسب (با نیاز آبی کمتر)، سؤال اصلی مقاله مطرح شده است که نسبت مصرف آب برای اجرای سفت کاری سازه های معمول (بتنی و فلزی) در مقایسه با سازه های گلین (خاکی) چگونه است؟ روش کار در قالب مطالعات کتابخانه ای برای استخراج میزان آب مصرفی در مواردی که آمارهای معتبر وجود دارد و در موارد نبود اطلاعات معتبر به شیوه آزمایشگاهی و کارگاهی برای رسیدن به داده های قابل اطمینان بوده و در همه این موارد حذف انحراف معیارها و اصل سه سویه سازی لحاظ شده است. نتایج به دست آمده حکایت از آن دارد که ساختمان هایی با سازه گلین بین ۷ تا ۱۵ درصد نمونه های مشابهشان با سازه های فولادی و بتنی آب مصرف می کنند؛ به تعبیری دیگر در احداث هر مترمربع از ساختمان حداقل ۲۵۰۰ لیتر آب صرف جویی می شود.

کلمات کلیدی: ساختمان عرفی، معماری گلین، کم آبی، صنعت ساختمان، صنایع ساختمانی آب خوار.

* استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد، یزد، ایران. abbasi@yazd.ac.ir

مقدمه

صنعت ساختمان امروزه از صنایع مهاجم زیست محیطی محسوب می شود که با آلوده کردن آب، خاک و هوا از یک سو و مصرف منابع و انرژی های تجدیدناپذیر از سوی دیگر و همین طور تولید نخاله های ساختمانی نگرانی های جدی را ایجاد کرده است. مطابق آمار حدود ۳۵ درصد تولید گازهای گلخانه ای به صورت مستقیم یا غیرمستقیم مربوط به صنعت ساختمان است (قالیافان، ۱۳۸۲). این صنعت پیوند قوی با دو صنعت سیمان و فولاد دارد که از جمله بزرگ ترین صنایع آلاینده دنیا محسوب می شوند (Tapali & Papadakis, 2012; Kumar Mehta, 2001; UNIDO, 2014). صنایع فولاد و سیمان وابسته به صنعت ساختمان، حجم عمده گازهای گلخانه ای دنیا را تولید می کنند (Trudeau et al., 2011). ۷ درصد دی اکسید کربن اضافه شده به اتمسفر به ازای تولید جهانی سالانه ۱/۶ میلیارد تن سیمان است (Kumar Mehta, 2001). با هر تن سیمان، نزدیک به یک تن دی اکسید کربن تولید می شود (Bremner, 2001; Trudeau et al., 2011). همین طور سالانه بالغ بر ۱۲ میلیارد تن از خاک طبیعی زمین به عنوان سنگ دانه ها بتن مصرف می شود (Kumar Mehta, 2001) که زمان بازگشت دوباره آن ها به طبیعت روشن نیست. دو صنعت فولاد و سیمان، جزء سه صنعت نخست انرژی خوار دنیا محسوب می شوند و در مجموع، نزدیک به ۳۰ درصد مصرف انرژی دنیا را به خود اختصاص داده اند (Trudeau et al., 2011). بالغ بر ده درصد انرژی مصرفی صنایع جهان فقط به صنعت سیمان اختصاص دارد (Tapali & Papadakis, 2012). باید اضافه کرد که ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله ها و نخاله های تولید شده دنیا مربوط به صنعت ساختمان است (قالیافان، ۱۳۸۲).

تولید سالانه نخاله های بنایی ساختمان های فولادی و بتنی رقم قابل توجهی است؛ فقط در اروپا، آمریکا و ژاپن سالانه ۹۰۰ (نهصد) میلیون تن نخاله ساختمانی تولید می شود، حال آنکه بیش از نیمی از تولید بتن دنیا توسط چین و هند تولید می شود و می توان حدس زد که عدد جهانی چندین برابر این عدد است (wbcsd, 2009). از جمله مشکلات زیست محیطی صنعت ساختمان، در دنیا به طور عام و در کشور ما به طور خاص، آب خوار بودن آن است (فولادنیوز، ۱۳۹۵)؛ به خصوص در ایران که با بحران کم آبی مواجه است. تا آنجا که دو صنعت فولاد و سیمان از آب خوارترین صنایع وابسته به صنعت ساخت و ساز محسوب می شوند. تمرکز مقاله بر مصرف آب در ساختمان های عرفی در کشور است و مراد ساختمان های زیر سه طبقه ای است که با اسکلت فلزی و بتنی بیشتر در خارج از کلان شهرها ساخته می شود و حجم قابل توجهی را شامل می شوند. با هدف کاهش میزان مصرف آب در ساخت و ساز از طریق انتخاب بهینه سیستم سازه ای و ایفای نقش مثبت صنعت ساختمان در بحران کم آبی سعی می شود به دو سؤال پاسخ داده شود؛ نخست آنکه میزان مصرف آب در مرحله سفت کاری ساختمان های عرفی در کشور چگونه است؟ پس از این سؤال و با هدف رسیدن به شیوه ای مناسب (با نیاز آبی کمتر)، سؤال اصلی مقاله مطرح شده است که نسبت مصرف آب برای اجرای سفت کاری سازه های معمول (بتنی و فلزی) در مقایسه با سازه های گلین (خاکی) چگونه است؟

ادبیات موضوع

اگرچه در خصوص مقایسه مصرف آب مربوط به ساخت ابنیه نوین خاکی با سیستم های معمول ساختمانی پژوهشی رؤیت نشد، اما برخی پژوهش ها با موضوع مصرف آب صنعت ساختمان و سیستم های

ساختمان‌های مسکونی چندطبقه بتنی و فولادی در هند مصرف آب برای هر مترمربع در یک ساخت‌وساز معمول شهری را در حدود ۲۷ مترمکعب معرفی کرده که حدوداً با آب مصرفی ۳۴ خانواده ۵ نفره در طول یک سال در همان شهر برابری می‌کند. عمده این مصرف به فرایند تولید مصالح برمی‌گردد. نهایتاً منگ و همکاران در پیمایشی که سال ۲۰۱۴ میلادی انجام دادند آب مصرفی برای ساخت ۶ ساختمان در پکن را حدود ۲۰ مترمکعب در هر مترمربع زیربنا محاسبه کردند (شاه‌حسینی، شکوهیان و درخشان، ۱۳۹۴). این مطالعات حکایت از آن دارد که بخش عمده این آب‌خواری به فرایند تولید مصالح ساختمانی برمی‌گردد و فولاد و سیمان بیشترین سهم را در این میان دارند (Ferriz Papi, 2012).

متأسفانه در ایران علی‌رغم جدی بودن موضوع، تحقیقات بسیار کمی در این زمینه صورت گرفته است. از سوی دیگر آمار و اطلاعات دقیقی از مصرف آب در ساختمان و صنایعی که مصالح ساختمانی را تولید می‌کنند وجود ندارد و موارد در دسترس هم به علت استاندارد نبودن و کیفیت مختلف خطوط تولید کارخانه‌ها و کارگاه‌ها بسیار متنوع است.

در تحقیقی در تهران درباره آب موردنیاز تولید مصالح و ساخت دو برج مسکونی با اسکلت‌های فولادی و بتنی مشخص شد که مقدار آب مصرفی برای برج فولادی معادل ۱۱ و برای برج بتنی حدود ۶ مترمکعب در هر مترمربع زیربنا است (بهادری نژاد و فطانت دیدار، ۱۳۸۲). میزان مصرف بالای آب در این مقایسه نشان می‌دهد که می‌توان با انتخاب دقیق‌تر سیستم‌های ساختمانی و مصالح مربوط به آن نقش مؤثری در صرفه‌جویی آب ایفا کرد و از مصرف بی‌رویه آن جلوگیری نمود. در تحقیق دیگری در ایران مشخص

معمول آن مثل (سازه‌های فلزی و بتنی) انجام گرفته است. اساساً توجه به مقوله مصرف آب در ساخت‌وساز در ایران موضوع جدیدی است و تاکنون ارزانی و دسترس‌پذیری آب، توجه متخصصین را کمتر به این حوزه جلب کرده است ولی در برخی کشورهای دیگر در زمینه مقادیر آب مصرفی صنعت ساختمان مطالعاتی انجام شده است؛ هرچند حتی در کشورهای توسعه‌یافته هم اطلاعات محدودی در موضوع مصرف آب در صنعت ساخت‌وساز وجود دارد (Bardhan, 2011, 94). تحقیقی در زمینه آب مصرفی در ساخت‌وساز در استرالیا صورت گرفته که در آن آب موردنیاز در ساخت یک خانه عرفی تقریباً برابر با ۱۵ سال مصرف آب در دوران بهره‌برداری محاسبه شده است (Treloar et al., 2004). مطالعه دیگری آب مصرفی ساخت یک ساختمان تجاری را حدود ۵۴ مترمکعب در هر مترمربع ساختمان دانسته است (Crawford & Treloar, 2005). مکرمک و همکاران تعدادی بنای غیرمسکونی را باز در استرالیا مطالعه کردند و آب مصرفی در ساخت‌وساز آن‌ها را حدود ۲۰ مترمکعب برای هر مترمربع زیربنا برآورد کردند (McCormack et al., 2007, 161). یک محقق انگلیسی هم آب مصرفی تولید مصالح و حین فرایند ساخت خانه‌ای نمونه را محاسبه کرده است (Brathwaite, 2009). تحقیقی دیگر بر روی یک ساختمان مسکونی و ساکنانش در استرالیا نشان می‌دهد مصرف آب حین ساخت‌وساز حدود ۳۰ مترمکعب در مترمربع است که با مصرف آب بهره‌برداری از همان ساختمان در طول ۵۰ سال برابری می‌کند (Crawford & Pullen, 2011)؛ تحقیقی دیگر در دهلی‌نو نیز که برای یک هتل صورت گرفته است این رقم را تأیید می‌کند (Choudhuri, 2015). «باردهان» در سال ۲۰۱۱ میلادی با بررسی

شده که نوع سیستم‌های ساختمانی می‌تواند در مصرف آب صنعت ساخت‌وساز بسیار تأثیرگذار باشد؛ در این تحقیق به ترتیب سیستم‌های رایج کشور از منظر آب‌خواری محاسبه و معرفی شده‌اند (ضیایی و عباسی هرفته، ۱۳۹۷).

از تفاوت و کم بودن آمارهای ارائه‌شده می‌توان دریافت با وجود تحقیقات صورت‌گرفته، هنوز نیازمند محاسبه و استخراج اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر در خصوص آب مصرفی ساختمان در ایران هستیم. از سوی دیگر از آنجاکه روش‌های ساخت‌وساز و نحوه تولید مصالح در هر منطقه‌ای می‌تواند متفاوت باشد و باتوجه‌به اینکه فعالیت علمی و قابل‌توجهی در این زمینه در کشور صورت نگرفته است، تحقیقات بیشتر و جدی‌تر در این حوزه در کشور ما باتوجه‌به بحران جدی کم‌آبی و آب‌خواری قابل‌توجه صنعت ساخت‌وساز یک ضرورت حیاتی به شمار می‌رود.

روش تحقیق

در این پژوهش میزان متوسط آب مصرفی در فرایند ساخت‌وساز در قالب دوره سه‌ساله پژوهش میدانی در کارگاه‌های ساختمانی و کارخانه‌های تولید مصالح در کنار مصاحبه با کارشناسان صنایع موردنظر و گردآوری آمار پراکنده در منابع مکتوب استخراج شده است؛ کاری که باتوجه‌به کمبود آمار و ارقام با دشواری بسیار همراه بود و از این حیث مقاله می‌تواند برای سایر پژوهش‌های مرتبط، نقش مرجع را داشت باشد. در این مسیر اطلاعات پراکنده و خام موجود در زمینه آب مصرفی تولید مصالح ساختمانی و اجرای ساختمان (تا مرحله سفت‌کاری) گردآوری و پس از صحت‌سنجی، حذف انحراف معیارها و رعایت اصل سه سویه‌سازی برای استخراج میزان آب مصرفی دو سیستم رایج ساختمان‌سازی در کشور (فولادی و بتنی) مورد استفاده

قرار گرفت.

برای محاسبه آب مصرفی ساختمان‌های گلین از روش شبیه‌سازی کارگاهی و آزمایشگاهی استفاده شده است و برای روایی مقادیر به‌دست‌آمده از تکنیک سه سویه‌سازی بهره گرفته شده است؛ به‌نحوی که در سه کارگاه مختلف و توسط سه گروه متفاوت شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته و مقادیر به دست آمد. باتوجه‌به اینکه در داده‌های حاصل از انحراف معیار مشاهده نشد، پس از کنترل با استادکاران سنتی، میانگین مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان داده نهایی مورد استناد قرار گرفت. نهایتاً بر مبنای اطلاعات به‌دست‌آمده در قالب یک ساختمان فرضی به‌عنوان نمونه موردی، آب موردنیاز برای تولید مصالح این ساختمان و همین‌طور آب موردنیاز در کارگاه برای اجرای آن، برای دو گونه رایج اجرا در کشور یعنی اسکلت فلزی و بتنی محاسبه و با دو نمونه مشابه با سازه گلین (خشتی و دیوار خاک کوبیده) مقایسه گردید.

مصرف آب در اجرای ساختمان بتنی و فولادی

امروز عمده ساخت‌وسازهای کشور با سیمان، فولاد و فراورده‌های آن‌ها است؛ مصالحی که بر اساس مستندات موجود بسیار آب‌بر بوده و صنعت ساخت‌وساز را به صنعتی «آب‌بر» بدل نموده‌اند. در ادامه مبتنی بر منابع ارائه‌شده، میزان آب مصرفی در تولید مصالح ساختمانی رایج در کشور ارائه شده است.^۲

آب مصرفی سازه‌های سیمانی

بتن پرمصرف‌ترین ماده مصنوع دنیا (wbcsd, 2009; Tapali & Papadakis, 2012) و پرکاربردترین مصالح ساختمانی در ایران به شمار می‌رود (دفتر مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۵). آب یکی از مواد اصلی در فرایند ساخت بناهای بتنی است به‌نحوی که این صنعت از صنایع آب‌خوار دنیا محسوب می‌شود (Tapali &

ج- برای عمل آوری؛

د- شست و شوی ماشین آلات.

در اکثر اختلاطها آب مناسب بدین منظور آبی است که برای نوشیدن مناسب باشد (بروکس و نویل، ۱۳۷۴، ۸۱). هرچند میزان دقیق مواد مصرفی برای تهیه یک مترمکعب ترکیبات سیمانی به طرح اختلاط، عیار و نوع دانه بندی شن و ماسه بستگی دارد اما به طور متوسط، میزان مواد مصرفی برای تولید یک مترمکعب بتن ساختمانی در کشور که عیار متوسط ۳۵۰ را دارد، شامل:

- شن و ماسه به میزان ۱۹۰۰ کیلوگرم؛

- سیمان به میزان ۳۵۰ کیلوگرم؛

- آب به میزان ۱۵۰ لیتر

است (قالیپافان، ۱۳۸۲؛ کیمیا بتن، ۱۳۹۶). میزان آب مصرفی برای عمل آوری هر مترمکعب بتن باتوجه به حداقل زمانی که باید بتن مرطوب نگه داشته شود، ۲۵۰ لیتر محاسبه گردید. نهایتاً مطابق محاسبه انجام شده در جدول شماره ۱، برای تولید هر مترمکعب از این ترکیب سیمانی رایج در ساخت و ساز عرفی کشور به طور متوسط حدود ۱۴۰۰ لیتر آب مصرف می شود.

آب مصرفی سازه های فولادی

فولاد از جمله صنایع آب خوار جهان به شمار می رود. در سال ۲۰۱۵، یک میلیارد و ششصد و شش میلیون تن فولاد در جهان تولید شده است (Worldsteel, 2016(a) و اگر شاخص جهانی مصرف آب برای تولید هر کیلوگرم فولاد را بپذیریم (هشت لیتر آب برای هر کیلوگرم فولاد) این به معنای مصرف حدود ۱۳ میلیارد لیتر آب است که البته مصرف واقعی آب در این صنعت حداقل ۲/۵ برابر این عدد است؛ از این مقدار فولاد تولیدی، حدود نیمی از آن در صنعت ساخت و ساز مصرف می شود (AISI, 2015; Worldsteel, 2016(b).

(Papadakis, 2012; Kumar Mehta, 2001). در آغاز

قرن بیستم در صنعت ساخت بتن در هر سال حدود یک میلیارد لیتر آب شیرین فقط برای تولید سیمان مصرف می شد^۳ (قالیپافان، ۱۳۸۲؛ Kumar Mehta, 2001). در سال ۱۳۹۳ ایران برای تولید ۷۰ میلیون تن سیمان (ماهنامه فناوری سیمان، ۱۳۹۳)، حدود ۳۵ میلیارد لیتر آب شیرین مصرف کرد. به این میزان آب مصرفی باید آبی که بابت تولید بتن مصرف می شود مانند شست و شوی سنگ دانه ها و ماشین آلات، عمل آوری و نگهداری مرطوب بتن نیز اضافه کرد که این رقم را چندین برابر می کند.

مصرف آب برای تولید سیمان

آب در فرایند تولید سیمان در تولید دوغاب مواد خام، خنک سازی تجهیزات، مصرف آزمایشگاهی و پرسنلی کارخانه مصرف می شود. بخشی از این آب به چرخه برمی گردد و بخشی دیگر به واسطه تبخیر، نشت و ... مصرف می شود. منظور از آب مصرفی در اینجا میزان آبی است که برای تولید هر کیلوگرم سیمان، مصرف می شود و باید در چرخه تولید جایگزین شود. هرچند آب مصرفی برای تولید سیمان بسته به روش تولید، نوع و کیفیت ماشین آلات، ظرفیت تولید و سیستم های صرفه جویی می تواند متفاوت باشد اما به طور متوسط آب مورد نیاز برای تولید هر کیلوگرم سیمان در کشور ما بین ۰/۴ تا ۰/۵ لیتر محاسبه شده است^۴ (چهرگانی، ۱۳۹۱). آمار اخذ شده از کارخانه های تولیدکننده نیز این عدد را تأیید می کند^۵.

آب مصرفی برای تولید بتن

آب در چهار مرحله عمده در شکل گیری یک بنا با ترکیبات سیمانی مورد استفاده قرار می گیرد:
الف- برای شستن سنگ دانه ها (شن و ماسه)؛
ب- به عنوان یکی از اجزای متشکل ترکیب سیمانی؛

تولید فولاد کشور در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵، نزدیک به ۱۵ میلیون تن بوده که نزدیک به نیمی از آن فقط برای صنعت ساخت‌وساز استفاده شده است (بانک خاورمیانه، ۱۳۹۴؛ آداب و همکاران، ۱۳۹۹) که برای این مقدار فولاد تولیدی و نورد شده ساختمانی در یک سال حداقل ۴۵۰ میلیارد لیتر آب مصرف شده است. در فرایند تولید آهن، از آب عمدتاً به‌عنوان خنک‌کننده، غبارزدایی مواد اولیه، تمیزکاری سطوح، تهیه محلول‌ها، منابع بخار و فیلترهای کنترل آلودگی هوا و در نهایت مصارف شست‌وشو استفاده می‌شود. بر اساس شاخص جهانی فولاد برای تولید هر کیلوگرم فولاد به ۸ لیتر آب نیاز است که این شاخص در میان فولادسازان ایرانی به خاطر استفاده از فناوری‌های گوناگونی متغیر است (طاهری‌زاده، ۱۳۹۵). همانند

سیمان، میزان مصرف آب به ازای تولید هر تن فولاد به عوامل مداخله‌گر زیادی چون تکنولوژی تولید، نوع ماشین‌آلات و ... وابسته است. اما جمع‌بندی اطلاعات از منابع مختلف در کشور حکایت از آن دارد که برای تولید هر کیلوگرم شمش فولاد به‌طور متوسط بالغ بر ۲۰ لیتر آب مصرف می‌شود^۷ (محمدی، ۱۳۹۴؛ بهادری نژاد و فطانت دیدار، ۱۳۸۲؛ تولائی‌ان، ۱۳۹۳)؛ عدد دقیق‌تر پس از تحقیقات تکمیلی میدانی ۲۱/۵ لیتر است. از سوی دیگر در طی فرایند نورد گرم فولاد برای تهیه پروفیل‌های آهن ساختمانی، به ازای هر کیلوگرم فولاد در منابع مختلف بین ۴/۳ لیتر (شرکت ملی فولاد ایران و همکاران، ۱۳۹۶، ۴۹۰) تا ۷ لیتر (مصاحبه با کارشناسان واحد کولینگ فولاد مبارکه اصفهان، آبان ماه ۱۳۹۵) آب ذکر شده است (جدول شماره ۲).

ج ۱. نحوه محاسبه میزان مصرف آب برای تولید و گیرش یک متر مکعب بتن

آب	سیمان	شن و ماسه	نوع	مواد تشکیل دهنده یک متر مکعب بتن
۱۵۰ لیتر	۳۵۰ کیلوگرم	۱۹۰۰ کیلوگرم	میزان (بروکس و آدام، ۱۳۷۴)	
	۰/۴۵ (لیتر در هر کیلوگرم)	۰/۴ (لیتر در هر کیلوگرم)		میزان مصرف آب برای شست‌وشو و تولید هر جزء
۱۵۰ لیتر	۱۵۷/۵ لیتر	۷۶۰ لیتر		میزان آب مصرفی برای تولید هر متر مکعب بتن
		۱۰۰ لیتر برای هر متر مکعب		میزان آب مصرفی برای شست‌وشوی تراک بتن (شکرچی زاده و میرزایی، ۱۳۸۸؛ پیدایش، ۱۳۸۴؛ کیمیا بتن، ۱۳۹۶)
	۲۵۰ لیتر			میزان آب مصرفی برای عمل‌آوری (نگهداری مرطوب) هر متر مکعب
	≈ ۱۴۱۷ لیتر			کل آب مصرفی به ازای هر متر مکعب بتن

ج ۲. میزان مصرف آب برای تولید یک کیلوگرم آهن ساختمانی

۲۱/۵ لیتر	میزان مصرف آب برای تولید هر کیلوگرم فولاد خام (در فرایند تولید شمش)
۵ لیتر	میزان آب مصرفی برای تولید هر کیلوگرم آهن ساختمانی (در فرایند نورد)

لزوم یک تغییر

محاسبات صورت‌گرفته که در شکلی حداقلی و خوش‌بینانه صورت پذیرفته^۸، حکایت از مصرف بالای آب در ساختمان‌های بتنی و فولادی دارد. اگرچه امروزه برای کاهش استفاده از آب در فرایند تولید سیمان، بتن و فولاد، تلاش‌های قابل‌تقدیری در حال انجام است و توصیه‌نامه‌های بین‌المللی دائماً صنایع را بر اهمیت و

ضرورت این مهم متذکر می‌شوند^۹، اما این تلاش‌ها فقط می‌تواند مشکل ذاتی و خسارات این صنایع به انسان و زیست‌بوم او را کم کند و الا امکان مرتفع ساختن آن‌ها ماهیتاً امکان‌پذیر نیست و در مقابل کاهش هر متغیر آلاینده یا آسیب‌رسان، تغییری دیگر افزایش می‌یابد. برای مثال برای بازیافت آب مصرفی و مناسب‌سازی آن برای آوردن دوباره در چرخه تولید در صنعت فولاد نیاز

زیست محیطی این صنعت وابسته به فولاد و سیمان، که چون محل تمرکز مقاله نبود به تفصیل بدان پرداخته نشد، لزوم تغییری بنیادین در صنعت ساخت و ساز را ایجاد می کند.

معماری گلین، یک گزینه جایگزین

با علم به همه معایب و آسیب های صنعت کنونی ساختمان، این سؤال مطرح خواهد بود که آیا گزینه مناسبی پیش روی صنعت ساختمان است؟ به نظر می رسد این تحول می تواند با رجعت به سرمایه های تمدنی این کشور در حوزه معماری و آموختن از پیشینیانی که با حداقل آسیب به زیست بوم، فعل ساختن را صرف می کرده اند، صورت پذیرد. معماری گلین گذشته فلات مرکزی ایران، از کم آب خواه ترین شیوه های ساخت و ساز در دنیا به شمار می رود که مصرف آب در آن به شکل قابل توجهی پایین است. گزینه پیشنهادی، رجوع به معماری خاک و بهره مندی از شیوه های روزآمد آن است که امروزه به مدد مطالعات جدیدی که در دنیا بر روی آن صورت پذیرفته، ارتقاء یافته و بهینه شده است. به بیانی دقیق تر، دست کم در حوزه ساخت و سازهای با طبقات محدود (تا دو طبقه) این گزینه وجود دارد و از آنجاکه حجم عمده ساختمان های کشور در خارج از کلان شهرها با همین تعداد طبقات است، می توان به شکل قابل توجهی در مصرف آب صرفه جویی کرد. ضمن آنکه مخاطرات زیست محیطی وابسته نیز کاهش می یابد^۱.

در ادامه میزان آب بری یک سازه خاکی مورد بررسی قرار می گیرد تا سپس مقایسه ای میان بناهای بتنی، فولادی و گلین در این خصوص صورت پذیرد.

میزان آب مورد نیاز ساختمان های گلین

تاکنون محاسبات دقیقی در خصوص مصرف آب بناهای خاکی صورت نگرفته است. در این تحقیق برای

به انرژی هست و این به معنای کاهش یک متغیر (میزان آب مصرفی) به قیمت افزایش متغیری دیگر (میزان مصرف سوخت) هست.

تبعات زیست محیطی این دو صنعت وابسته به ساختمان، غیر قابل چشم پوشی است. تبعاتی که باعث شده اند ایران هشتمین کشور آلاینده دنیا به شمار رود (UNIDO, 2014). سیمان سومین صنعت انرژی بر در ایران محسوب می شود که نزدیک به ده درصد مصرف انرژی کشور مصرف آن می شود (یزدیان و شکرچی زاده، ۱۳۹۳؛ UNIDO, 2014). در ایران هم اکنون حدود ۵۵ میلیون تن سیمان تولید می شود و به همین مقدار نیز گاز دی اکسید کربن تولید می گردد. برای تولید آن مقدار سیمان، سالانه ۱۹۲ میلیون تن منابع سنگی ارزشمند زمین شامل، شن، ماسه و سنگ دانه های شکسته که در واقع ذخایر تجدیدناپذیر خاک در کشور به شمار می روند، برداشت می شود (دفتر مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۵). صنعت فولاد نیز با تولید بالغ بر ۳۰ تن دی اکسید کربن به طور سالانه در ایران از جمله صنایع آلاینده به شمار می آید که با حدود ۱۵ درصد مصرف انرژی کشور، انرژی خوارترین صنعت کشور (بدون احتساب نیروگاه ها) محسوب می شود (UNIDO, 2014). این دو صنعت عامل شکل گیری بالاترین سهم را به صنعت ساختمان در تولید نخاله هایی می دهند که بازگشت معقولی برای آن ها به طبیعت متصور نیست.

در کنار این تبعات زیست محیطی، صنعت ساختمان به واسطه وابستگی به صنایع فولاد و سیمان همان طور که به تفصیل اشاره شد از آب خوارترین صنایع در این کشور کم آب دنیا به شمار می رود. آمار تکان دهنده از مصرف آب در صنعت ساختمان که با لحاظ کردن آب پنهان محاسبه نشده در فرایند حمل مصالح و اجرای ساختمان افزایش هم پیدا می کند، به همراه سایر تبعات

محاسبه میزان مصرف آب در این نوع معماری با استفاده از تجربه استادکاران سنتی از روش شبیه‌سازی، ساخت نمونه‌ها و اندازه‌گیری میزان آب مصرفی در روند اجرا در کارگاه و آزمایشگاه، بهره گرفته شده است. طبیعی است که بسته به نوع خاک، ترکیب دانه‌بندی آن، طرح اختلاط ملات‌ها و اقلیمی که بنا در آن شکل می‌گیرد، حتی تجهیزات کارگاه و دقت کارگران میزان مصرف آب در ساختمان‌های گلین متفاوت است. اما از آنجاکه اختلاف‌ها در مقایسه با سایر روش‌های ساخت‌وساز ناچیز است از آن‌ها صرف‌نظر شده و آنچه در این تحقیق محاسبه شده میزان متوسطی است که از طریق ساخت نمونه در چند کارگاه مختلف در یزد (حداقل برای هر مورد سه کارگاه) و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی یزد و خاکی که در محدوده بافت تاریخی آن موجود است به انجام رسیده است و نهایتاً ارقام با اتکا به تجربه استادکاران سنتی کنترل شده است. روش‌های متنوعی در ساخت با خاک در دنیا وجود دارد که دو مورد آنکه رایج‌تر بوده برای این تحقیق انتخاب شده است. نمونه نخست سازه‌های خشتی انتخاب شده و نمونه دوم یک سازه با سیستم خاک کوبیده مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ساخت یک دیوار یک مترمکعبی خاک کوبیده، حدود ۱۰۰ لیتر آب مصرف می‌شود (حاج میربابا، ۱۳۹۸)^{۱۱} برای تولید هر خشت با ابعاد ۲۰*۲۰*۵ نیز ۰/۷ لیتر آب مصرف می‌شود. برای ملات گل و همین‌طور ملات شفته آهک نیز باتوجه‌به نمونه‌های ساخته‌شده و با استناد به آیین‌نامه‌های موجود به ترتیب برای هر مترمکعب ملات، ۳۰۰ و ۴۰۰ لیتر آب مصرف می‌شود (ARS:682, 1996) (جدول شماره ۳).

مقایسه مصرف آب بناهای بتنی، فولادی و گلین

برای مقایسه میزان مصرف آب در ساختمان‌هایی با

سیستم‌های سازه‌ای سه‌گانه رایج در کشور از روش شبیه‌سازی استفاده شده است، به‌نحوی که ساده‌ترین شکل یک بنا با سیستم‌های سازه‌ای متفاوت در نظر گرفته شده است. بنابراین نقشه‌های اجرایی یک اتاق با ابعاد ۴/۵ * ۴/۵ متر (تقریباً با زیربنای ۲۰ مترمربع)، در یک طبقه (ارتفاع دیوارها سه متر)، تهیه شد. نقشه‌های اجرایی اتاق بتنی و فولادی توسط مهندسین سازه محاسبه و در مورد اتاق گلی بر اساس ضوابط مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان تهیه و متره گردید. پس از مشخص شدن حجم مقادیر مصرفی سیمان، آهن‌آلات، خشت، و ملات‌ها^{۱۲}، تا اتمام مرحله سفت‌کاری، میزان مصرف آب هر یک از سیستم‌ها مطابق جدول شماره ۴ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مطالعات نشان می‌دادند سیستم خاک کوبیده کمترین نیاز را به آب دارد (Petrovic et al., 2017, 289) و بعد از آن ساختمان خشتی و بعد با اختلاف زیاد ساختمان اسکلت فلزی و بتنی قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که محاسبات تقریبی حکایت از آن دارد که با افزایش طبقات تا دو طبقه (زیرزمین و همکف)، کاهش مصرف آب در ساختمان‌های گلین در مقایسه با همتایان بتنی و فولادی نتایج بهتری نیز دارد. ضمناً باید در نظر داشت که میزان آب مصرفی برای اتاق نمونه تحقیق باتوجه‌به کوچک بودن مساحت آن و نامتعارف بودنش، بیشتر از یک ساختمان معمولی به دست آمده^{۱۳} و لذا در محاسبات نمونه موردی بیشتر از باب مقایسه مصرف آب سیستم‌های سازه‌ای مختلف، محلی از اعراب دارد. پیش‌بینی می‌شود برآورد متوسط مصرف آب در هر مترمربع برای ساختمان‌ها کمتر از ارقام به‌دست‌آمده در جدول شماره ۴ خواهد بود؛ بدیهی است در مورد ابر پروژه‌ها و پروژه‌های خاص شرایط کاملاً متفاوت بوده و نیازمند تحقیقات مستقلی است.

ج ۳. محاسبه میزان مصرف آب برای تولید عناصر سازنده بناهای گلی

۰/۷ لیتر	میزان مصرف آب برای تولید هر عدد خشت ۲۰*۲۰*۵
۰/۲ لیتر	میزان آب مصرفی برای هر کیلو گرم ملات گل و ملات گل و گچ
۳۰۰ لیتر	میزان آب مصرفی برای هر متر مکعب ملات گل
۴۰۰ لیتر	میزان آب مصرفی برای هر متر مکعب ملات شفته آهک
۱۰۰ لیتر	میزان آب مصرفی برای تولید یک متر مکعب دیوار خاک کوبیده

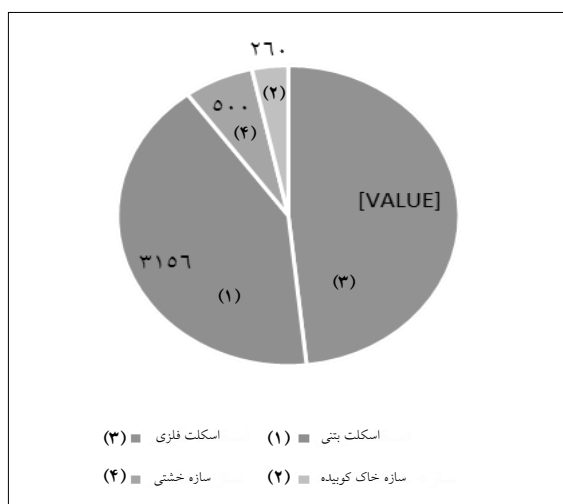
ج ۴. مقایسه مصرف آب بناهای بتنی، فولادی و گلی (خشتی و خاک فشرده)

مصرف کل آب هر سیستم (لیتر)	نوع مصالح و میزان آب بری آن ها				مشخصات اجمالی ابعاد بیرونی: ۴/۵*۴/۵ متر	نوع سازه	
	مصرف آب کل (لیتر)	مصرف آب در واحد مصالح (لیتر)	تعداد یا وزن (متر مکعب/کیلوگرم)	نوع مصالح			
۱۰۱۲۶	۷۱۱۶ عدد	۰/۷	۱۰۱۶۶ عدد	خشت ۲۰*۲۰*۵	دیوار خشتی ۶۰ س.م. اسپر ۲۰ س.م. طاق: گهواره ای (پر یک خشته)	دیوار خشتی با طاق گهواره ای	سازه گلین
	۱۴۱۰	۳۰۰ (ARS:682:1996)	۴/۷	ملات گل (متر مکعب)			
	۱۶۰۰	۴۰۰	۴	ملات شفته آهک عیار ۱۵۰ (متر مکعب)			
۵۲۷۲	۱۲۳۶ عدد	۰/۷	۱۷۶۶ عدد	خشت ۲۰*۲۰*۵	دیوار خاک کوبیده باربر ۶۰ س.م. اسپرها ۲۰ س.م. طاق: گهواره ای (پر یک خشته)	دیوار خاک کوبیده با سقف گهواره ای	سازه گلین
	۲۰۱۶	۱۰۰	۲۰/۱۶	دیوار خاک کوبیده (متر مکعب)			
	۴۲۰	۳۰۰ (ARS:682, 1996)	۱/۴	ملات گل (متر مکعب)			
	۱۶۰۰	۴۰۰	۴	ملات شفته آهک عیار ۱۵۰ (متر مکعب)			
۶۳۹۱۸	۱۹۸۳۸	۱۴۱۷	۱۴	بتن (متر مکعب)	دیوار بلوک بتنی ۲۰*۲۰*۴۰ س.م. با ملات ماسه سیمان و فندانسیون بتنی	اسکلت بتنی و سقف تیرچه بلوک	سازه بتنی
	۳۴۳۷۰	۲۶/۵	۱۲۹۷	آهن آلات (کیلوگرم)			
	۷۱۰ عدد	۵	۱۴۲	بلوک سیمانی سقف			
	۹۰۰۰ عدد	۶	۱۵۰۰	بلوک سیمانی دیوار			
۷۴۰۹۱	۱۲۳۲۷	۱۴۱۷	۸/۷	بتن (متر مکعب)	دیوار بلوک بتنی ۲۰*۲۰*۴۰ س.م. با ملات ماسه سیمان و فندانسیون بتنی	اسکلت فلزی و سقف تیرچه بلوک	سازه فلزی
	۵۱۷۵۴	۲۶/۵	۱۹۵۳	آهن آلات (کیلوگرم)			
	۷۱۰ عدد	۵	۱۴۲	بلوک سیمانی سقف			
	۹۳۰۰ عدد	۶	۱۵۵۰	بلوک سیمانی دیوار			

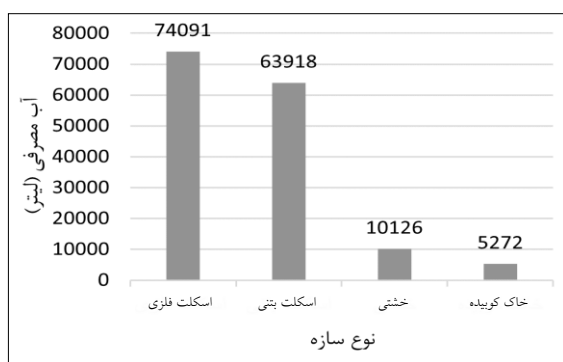
نتیجه

است با اتخاذ شیوه‌های کم‌مصرف، علاوه بر مهار مصرف آب در این صنعت، سایر تبعات ناگوار آن نیز کنترل شود. آمار و ارقام دقیق و مستند در خصوص مصرف آب ساخت‌وساز محدود است و بخشی از تلاش این مقاله صرف تولید اطلاعاتی در این زمینه از طریق مراجعات میدانی به کارگاه‌ها و کارخانه‌ها،

میزان مصرف انرژی، تولید آلاینده‌ها و حجم فزاینده نخاله‌های ساختمانی حکایت از فاجعه‌ای زیست‌محیطی و انسانی در حوزه صنعت ساختمان دارد. در کنار این موارد این صنعت یکی از آب‌خوارترین صنایع در کشوری است که با بحران کم‌آبی مواجه است. ضروری



ت ۱. مصرف آب (لیتر) به ازای هر مترمربع زیربنا با سیستم های سازه ای متفاوت در پروژه نمونه موردی تحقیق



ت ۲. مصرف آب (لیتر) تا اتمام مرحله سفت کاری در پروژه نمونه موردی با سیستم های سازه ای متفاوت تا اتمام مرحله سفت کاری

تشکر و قدردانی

از آقایان سید محسن رضوانفر، حامد عزیزی بندرآبادی، محمد رضا رمضانخانی و خانم اکرم شفیعی نادری که در استخراج و محاسبه مقادیر کمک شایانی نمودند، سپاسگزاری می شود.

شبیه سازی، مصاحبه و جستجو در بین متون پراکنده با هدف رسیدن به مقادیر مصرف واقعی و معتبر شد. با تکیه بر اطلاعات به دست آمده، مقایسه مصرف آب ساختمان های بتنی و فولادی از یک سو و ساختمان های گلین از سوی دیگر، نشانگر کسر ناچیزی از نیاز بناهای گلین به آب و صرفه جویی قابل توجه در این زمینه دارد. به نحوی که یک ساختمان خشتی با مصرف ۵۰۰ لیتر در هر مترمربع حدود ۱۴ درصد و یک ساختمان با سازه دیوار خاک کوبیده با مصرف ۲۶۰ لیتر آب، تنها ۷ درصد یک ساختمان اسکلت فلزی و به ترتیب ۱۵ و ۸ درصد یک ساختمان بتنی مشابه آب مصرف می کند (تصاویر شماره ۱ و ۲). این در حالی است که اجرای سیستم های سازه ای بتنی و اسکلت فلزی یک ساختمان به همراه دیوارهای جداکننده آن در نمونه موردی پژوهش با آب خواری هر مترمربع حدود ۳۱۶۰ و ۳۶۶۰ لیتر (تصاویر شماره ۱ و ۲) با شرایط کشور ما که مواجه با بحران کم آبی ست، قرابتی ندارند.

امروزه با توجه به نکات فوق الذکر دنیای توسعه یافته به سمت معماری با خاک معطوف شده است. ض روری به نظر می رسد ایران نیز که پشتوانه ای قوی و داشته های تمدنی ارزشمندی در این زمینه دارد، با پرهیز از باورهای غلط معاصر در این حوزه، شروع به شناخت و بهره مندی از قابلیت های این نوع معماری دست کم در حوزه ساخت و ساز عرفی (ساختمان های غیرعمومی کمتر از ۳ طبقه با استفاده از کلاف های افقی و قائم) که درصد قابل توجهی از ساخت و ساز کشور را به خود اختصاص می دهد، نماید. این مهم می تواند راهکاری اساسی در جهت مدیریت بحران کم آبی در حوزه ساخت و ساز باشد.

۱. مراد از مرحله سفت کاری در این مقاله مشخصاً اجرای شالوده، عناصر باربر و سقف ساختمان (کلاً سازه بنا) به همراه دیوارهای جداکننده است؛ فارغ از اینکه چه جزئیاتی از قبیل اندود، عایق، نماسازی، کف‌سازی و تزیینات را شامل می‌شوند.

۲. محاسبات صورت گرفته در این مقاله به واسطه

- متنوع بودن فرایند تولید بتن و سیمان

- تفاوت شیوه‌های تولید

- تنوع سطح فناوری ماشین‌آلات

به صورت متوسط تقریبی محاسبه شده است. دستیابی به این آمار و اطلاعات در کشور ما به دلیل:

- تنوع مصرف کارخانه‌ها و کارگاه‌های تولیدی به واسطه نبود نظام استاندارد یکپارچه

- عدم وجود آمار دقیق و علمی حتی در نزد تولیدکنندگان و متولیان این صنایع

- پرهیز از ارائه آمارهای واقعی به واسطه نگرانی از سیاه نمایی در باب صنعت موجود باتوجه به شرایط بحرانی آب

دو چندان دشوار است. باین حال ارقام ارائه شده از دو بابت قابل اعتبار است، نخست اینکه هم از طریق محاسبه و هم از طریق پرسش‌های میدانی و چندباره غیررسمی از کارشناسان متعدد تهیه شده است و دوم اینکه به شکل متوسط حداقلی محاسبه شده است.

۳. محاسبه این عدد کار دشواری نیست. همان‌طور که گفته شد مصرف سالانه بتن در جهان ۵/۱ میلیارد مترمکعب است که به ۱/۵۶ میلیارد تن سیمان مصرف می‌شود. با احتساب نسبت متوسط آب به سیمان به میزان ۰/۵، آب اختلاط مصرفی فقط برای تولید سیمان بتن بالای یک تریلیارد لیتر می‌شود.

$۱/۵۶ \times ۵/۸ = ۷۸$ میلیارد تن آب در سال

به این مقدار اگر آب لازم برای شست‌وشوی سنگ‌دانه‌ها، شستن وسایل و عمل‌آوری بتن را اضافه کرد در شکل خوش‌بینانه میزان مصرف آب تا دو برابر افزایش پیدا خواهد کرد (قالیباف، ۱۳۸۲).

۴. باید توجه داشت که این آب مربوط به روش خشک است و در روش تر میزان آب مصرفی تا حدود دو برابر افزایش می‌یابد.

۵. مصاحبه با کارشناسان سیمان ممتازان کرمان و اخذ آمارهای مصرف ماهیانه آب این کارخانه در آذرماه ۱۳۹۵ نیز گویای همین عدد است.

۶. به استناد نشریه ۲۸ دفتر تحقیقات و استانداردهای فن سازمان برنامه و بودجه (سابق)، برای ساختمان‌های معمول ساخته شده در کشور که بین دو الی شش طبقه احداث می‌شوند با لحاظ نسبت وزنی هر یک از ترکیبات و نوع سازه بنا، عیار متوسط سیمان در این ترکیبات،

۴۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و در نشریه ۵۵، عیار متوسط ۳۵۰ کیلوگرم برای پی و ستون‌ها و تیرها و پوشش سقف در نظر گرفته شده است. مصاحبه با کارخانه‌های تولید بتن ساختمانی، استادکاران و مهندسین مجری در این خصوص نیز نشان می‌دهد که عیار ۳۵۰ بالاترین فراوانی مصرف را دارد.

عیار سیمان	محل استفاده ترکیبات سیمان در ساختمان‌های تا چهار طبقه
۳۵۰-۴۰۰	بتن در سازه بنا
۳۵۰	ملات ماسه سیمان (برای چیدن دیوارها، فرش و کف)
۴۰۰	دوغاب‌ها (پشت سنگ و کاشی)
۳۰۰	اندودهای سیمانی
۳۰۰	بندکشی نما

۷. برای تولید فولاد در کشور ارقام متنوعی اعلام می‌شود، آمار از ۲۸ مترمکعب (طاهری‌زاده، ۱۳۹۵) و ۲۵ مترمکعب (فرونچی، ۱۳۹۳) تا ۱۰ مترمکعب (تولاییان، ۱۳۹۳؛ سبحانی، ۱۳۹۳ الف و ب؛ سبحانی، ۱۳۹۴) ذکر می‌شود. مصاحبه با دست‌اندرکاران و کارشناسان کارخانه‌های فولاد (برای مثال مصاحبه با کارشناسان واحد کولینگ فولاد مبارکه اصفهان در آبان ماه ۱۳۹۵) و همین‌طور محاسبات عددی و وزن دهی به آمار موجود برحسب دقت آمار و میزان تولید، عددی حدود ۲۱۵۰۰ لیتر برای هر مترمکعب شمش فولاد را عدد متوسط واقعی مصرف آب در ایران نشان می‌دهد (برای مثال مصاحبه با کارشناسان واحد کولینگ فولاد مبارکه اصفهان در آبان ماه ۱۳۹۵)

۸. برای مثال، برای تولید هر تن فولاد، حدود چهار تن جابه‌جایی اعم از سنگ‌آهن، سایر مواد خام، قطعات، توزیع و ... صورت می‌پذیرد.

۹. افزایش دوام سازه‌ها، حفاظت حداکثری از آن‌ها، بازیافت نخاله‌های ساختمانی به عنوان مواد خام کارخانه‌ها، اصلاح خط تولید و ماشین‌آلات با نیاز به آب کمتر، بازیافت آب کارخانه‌ها و تغییر شیوه‌های تبرید از اهم این راهکارها هستند (Kumar Mehta, 2001).

۱۰. هم‌اکنون این نوع از معماری در کشورهای بسیاری چون آلمان، فرانسه، اسپانیا، پرتغال، نیوزلند، استرالیا، آمریکا، پرو، برزیل و ... مجوز ساخت گرفته و رو به گسترش است (Houben & Guillaud, 1994)؛ کشورهایی که برخی از آن‌ها به لحاظ وضعیت استقرار در پهنه‌بندی زلزله شبیه ایران هستند.

۱۱. بر مبنای اندازه‌گیری میزان آب مصرفی در ساخت نمونه موردنظر در قالب یک کارگاه پژوهشی توسط گروه معماری گلین پژوهش‌شده معماری بومی دانشگاه یزد در شهرستان تفت یزد که به سرپرستی دکتر نریمان فرحزاد در روزهای ۱۸ لغایت ۲۱ خردادماه ۱۳۹۳ برگزار شد. در این کارگاه چهار روزه برای دیواری با طول ۶ متر، ارتفاع ۲/۵ متر و ضخامت ۴۰ سانتیمتر مقدار ۲۵۰۰ لیتر آب مصرف شده که بخش عمده این آب (حدوداً سه چهارم) شامل آب مصرفی نیروی انسانی (شست‌وشو، خوردن و ...) بوده است که با یک تناسب، عدد

مستند مرکز کراتر در ایران نیز صدق می‌کند.

۱۲. در مورد ملات‌ها محاسبه آب مصرفی کار آسانی نیست چون مقدار آب مورد نیاز در درجه اول به مواد تشکیل دهنده ملات بستگی دارد (ASTM, 2003)، ضمن اینکه عواملی نظیر وضعیت آب و هوایی، دقت کارگران، شرایط و تجهیزات کارگاه و... بر این میزان تأثیر می‌گذارند. همواره گفته می‌شود ملات‌ها باید حاوی حداکثر مقدار آبی باشند که مطلوب‌ترین حالت کارایی حاصل شود (همان) و بر همین اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای تعیین آب مصرفی ملات‌ها رایج نیست (خدابنده، ۱۳۷۴). نهایتاً با انجام آزمایش‌هایی که به سفارش نگارنده در سه کارگاه مختلف در سال ۱۳۹۸ و همین‌طور شبیه‌سازی مشابهی که توسط خانم فرنز ضیایی دانشجوی کارشناسی ارشد معماری در آزمایشگاه مواد و مصالح دانشگاه یزد در سال ۱۳۹۷ صورت گرفت این میزان به‌طور تقریبی و متوسط در حدود ۳۰ درصد حجم ملات معادل ۳۰۰ لیتر برای هر مترمکعب ملات گل و حدود ۴۰ درصد حجم ملات معادل ۴۰۰ لیتر آب برای شفته آهک به دست آمد.

در مورد ملات ماسه سیمان ۱:۶، مبتنی بر نتایج به‌دست‌آمده در آزمایشگاه و کارگاه به ازای هر مترمکعب ملات، ۱۸۰ لیتر آب به‌طور متوسط مصرف شد که نتایج تحقیقات مشابه نیز آن را تأیید می‌کند (ضیایی و عباسی هرفته، ۱۳۹۷). باتوجه به مشابهت زیاد این عدد با عدد به‌دست‌آمده برای بتن در جدول شماره ۱، در محاسبات جدول شماره ۴، حجم بتن و ملات ماسه سیمان با یکدیگر جمع شده‌اند. ۱۳. دلیل اصلی هم برمی‌گردد به اینکه سازه پروژه نمونه موردی تحقیق به علت کوچک بودن، به نسبت سنگین‌تر از یک سازه متعارف محاسبه می‌گردد.

فهرست منابع

- آداب، ابوالفضل؛ قاضی نوری، سید سپهر؛ قاضی نوری، سید سروش؛ شاهوردی، حمیدرضا؛ احمدپور، کیومرث. (۱۳۹۹)، واکاوی زنجیره ارزش صنعت فولاد ایران با استفاده از تحلیل اقتصادی زنجیره ارزش و جریان مواد. پژوهش‌های مدیریت عمومی، ۴۸ (۱۳): ۵۹-۸۵ (تابستان ۱۳۹۹).

- بهادری نژاد، مهدی؛ فطانت دیدار، توحید. (۱۳۸۲)، آب مورد نیاز تولید مصالح و ساخت دو برج مسکونی در تهران با اسکلت‌های فولادی و بتنی. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- بروکس، جی. جی؛ نویل، آدام. (۱۳۷۴)، تکنولوژی بتن. ترجمه علی اکبر رمضانپور و محمدرضا شاه نظری. تهران:

انتشارات پرهام.

- پیدایش، منصور. (۱۳۸۴)، بتن و تعامل آن با محیط‌زیست. دومین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه. ۱۰-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۴. تهران.

- تولانیان، مهدی. (۱۳۹۳)، فولاد مبارکه اصفهان، رکورددار جهانی صرفه‌جویی در مصرف آب. مصاحبه با مدیر ارشد خدمات فنی و پشتیبانی فولاد مبارکه. <https://www.msc.ir/> (آخرین دسترسی در ۱۳۹۳/۹/۲۵).

- دفتر مقررات ملی ساختمان. (۱۳۹۵)، مبحث پنجم: مصالح و فرآورده‌های ساختمانی. تهران: نشر توسعه ایران.

- حاج میربابا، مجید. (۱۳۹۸)، مصاحبه‌ای منتشر نشده با محسن عباسی هرفته: درباره مصرف آب سازه‌های خاک کوبیده بر اساس تجربه بیست‌ساله کار تجربی وی. گرونوبل (فرانسه).

- خدابنده، ناهید. (۱۳۷۴)، بررسی ملات‌های معمولی ایران. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

- فرونچی، مجتبی. (۱۳۹۳)، مصاحبه با مجتبی فرونچی مدیرعامل شرکت فولاد شرق کاوه در تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۲۰. eaststeelco.com (آخرین دسترسی در آبان ۱۳۹۵).

- فولاد نیوز (پایگاه جامع اطلاع رسانی صنعت فولاد ایران). (۱۳۹۵)، بحران کم‌آبی در ایران: سهم بالای فولاد در مصرف انرژی. دوشنبه ۱۳ مهر ۱۳۹۵.

- قالیبافان، مهدی. (۱۳۸۲)، بتن و محیط‌زیست. فصلنامه انجمن بتن ایران. سال سوم، شماره ۱۱، پاییز ۱۳۸۲.

- چهرگانی، حسین. (۱۳۹۱)، نکات فنی و علمی کوتاه از صنعت سیمان. ماهنامه علمی-تخصصی فن‌آوری سیمان، ۵۲: ۸۹-۹۵ (تیر ۱۳۹۱).

- سبحانی، بهرام. (۱۳۹۳ الف)، مصرف ۱۰ مترمکعب آب به ازای هر تن فولاد. مصاحبه خبرگزاری ایمن با مدیرعامل فولاد مبارکه در تاریخ ۱۳۹۳/۴/۹. www.imna.ir (آخرین دسترسی ۹۸/۳/۱۰).

- سبحانی، بهرام. (۱۳۹۳ ب)، اتخاذ سیاست‌های مناسب و راهبردی، کاهش رکود در صنعت فولاد. مصاحبه روزنامه دنیای اقتصاد با مدیرعامل فولاد مبارکه اصفهان در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۳. سایت خبری تحلیلی صنعت فولاد (مرجع فولاد): steelpedia.ir (آخرین دسترسی ۹۸/۵/۲۰).

- سبحانی، بهرام. (۱۳۹۴)، سرانه مصرف ۳۰۰ کیلوگرمی فولاد

فولاد). تاریخ انتشار ۹ دی ۱۳۹۴.
<https://steelpedia.ir/fa/article/23208/>
 (آخرین دسترسی ۱۳۹۸/۱۲/۱۳).

- یزدیان، مهدی؛ شکرچی زاده، محمد. (۱۳۹۳)، بررسی
 روش های کاهش اثرات زیست محیطی بتن در ایران. هشتمین
 کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل،
 ۱۸ و ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۳.

- AISI (American Iron and Steel Institute). 2015. Market Applications in Steel. <http://www.steel.org/about-aisi/statistics/market-applications-in-steel.aspx> (accessed Nov. 30, 2016).

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). Standard specification for mortar for unit masonry. Annual book of ASTM standards, C 270 - 03b.

- ARS 682. 1996. Compressed earth blocks-code of practice for the assembly of compressed earth block masonry. Center for the development of industry ACP-EU/CRAterre-BASIN. <http://www.nzdl.org/> (accessed Jan. 10, 2020).

- Bardhan, S. 2011. Assessment of water resource consumption in building construction in India. In Ecosystems and sustainable development VIII, ed. Y. Villacampa and C.A. Brebbia, 93-101. Southampton, UK: WITpress.

<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/EC/O11/ECO11008FU1.pdf> (revision: 8/11/2018)

- Brathwaite, Ruel. 2009. The embodied water within the construction of a UK sustainable home, MPhil in engineering for sustainable development: Global challenges, engineering solutions. University of Cambridge. <https://www.esdmphil.eng.cam.ac.uk/about-the-programme/dissertations/students/brathwaite> 2009 (revision: 8/11/2018)

- Bremner, T. W. 2001. Environmental aspect of concrete: Problems and solutions. Invited Paper for the Plenary Session of the first All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete, 9-14 September 2001.

- Crawford, Robert H. Pullen, Stephen. 2011. Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. Building Research and Information, 39 (6): 589-602.

- Choudhuri, Indraneel R. 2015. Assessment of Embodied Water of Construction: Case Study of a Four Star Rated Hotel in New Delhi, India. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, 3(8): 195-199.

- Crawford, Robert H., & Treloar, Graham J. 2005. An assessment of the energy and water Embodied in commercial Building construction, in Australian Life Cycle Assessment Conference, Sydney, Australia. <http://dro.deakin.edu.au/eserv/DU:30005640/crawford-anassessment-2005.pdf> (revision: 8/11/2018)

ایران تا ۱۴۰۴. مصاحبه با رئیس انجمن تولیدکنندگان فولاد ایران و مدیرعامل گروه فولاد مبارکه اصفهان در تاریخ ۱۳۹۴/۳/۱۱. پایگاه اطلاع رسانی انجمن تولیدکنندگان فولاد ایران (استیل ایران): steeliran.org (آخرین دسترسی ۱۳۹۸/۱۲/۲۰)

- شاه حسینی، احمد؛ شکوهیان، محمد و درخشان، سهیل. (۱۳۹۴)، آب مجازی در صنعت ساخت و ساز (با بررسی کشورهای چین، هند و استرالیا). پوستر ارائه شده در سومین سمپوزیوم بین المللی مهندسی محیط زیست و منابع آب، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

- شکرچی زاده، محمد؛ میرزایی، زانیار. (۱۳۸۸)، آموزش مهندسی بتن و سیمان با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست. نشریه دانشکده فنی. دوره ۴۳. شماره ۳ (پیاپی ۱۲۱).

(ویژه کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴). ۱۱۳-۱۲۳.

- شرکت ملی فولاد ایران، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران و شرکت مهندسی بین المللی فولاد تکنیک (۱۳۹۶)، مطالعات طرح جامع فولاد کشور: پایش سال ۱۳۹۶.

- کیمیا بتن. (۱۳۹۶)، بازدید و مصاحبه با مسئولین و کارشناسان شرکت کیمیا بتن یزد. ۹۶/۱۱/۱۶.

- ضیایی، فرناز؛ عباسی هرفته، محسن. (۱۳۹۷)، تأثیر نوع سیستم ساختمانی بر میزان آب مصرفی ساخت و ساز در مسکن عرفی معاصر یزد. معماری اقلیم گرم و خشک. (۸): ۲۱-۱

- طاهری زاده، ابوذر. (۱۳۹۵)، راهکارهای بهینه سازی مصرف آب در صنعت فولاد. مصاحبه با معاون آموزشی پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان در تاریخ ۱۳۹۵/۹/۴. سایت شرکت فولاد مبارکه: fooladnews.com (آخرین دسترسی ۱۳۹۷/۵/۴)

- ماهنامه فناوری سیمان. (۱۳۹۳)، آمار تولید و تحویل سالانه سیمان و کلینکر. شماره ۷۰-۷۱. فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۳. cementtechnology.ir/Statistics/Production.1392-12.Months.pdf (آخرین دسترسی در ۱۳۹۸/۱۲/۲۰)

- بانک خاورمیانه، گروه تحقیقات اقتصادی. (۱۳۹۴)، بررسی صنعت فولاد ایران. www.middleeastbank.ir (آخرین دسترسی در ۱۴۰۰/۹/۲۰)

- محمدی، محسن. (۱۳۹۴)، تحلیلی بر تأمین و مصرف آب در صنعت فولاد. مرجع فولاد (سایت خبری تحلیلی صنعت

- Ferriz Papi, J.A. (2012). Water consumption in buildings: Embedded water in construction materials. In Water, Waste and Energy Management International Congress, Salamansa, Spain. https://www.researchgate.net/publication/277716798_Water_Consumption_in_Buildings_EmbeddedWater_in_Construction_Materials (revision: 8/11/2018)
- Kumar Mehta, P. 2001. Reducing the environmental impact of concrete. Concrete International. October 2001:61-66
- McCormack, Michael; Treloar, Graham J.; Palmowski, Laurence & Crawford, Robert. 2007. Modeling direct and indirect water requirements of construction. Building Research and Information, 35 (2): 156-162.
- Petrovic, Emina K., Vale, Brenda. Zari, Maibritt P. 2017. Materials for a Healthy, Ecological and Sustainable Built Environment.
- Tapali, J.; Papadakis, V.G. 2012. An optimum design of reinforced concrete structures for prolongation of service lifetime at the lowest environmental cost. Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2012), Vienna, Austria, 3-6 October 2012.
- Treloar, Graham J.; McCormack, Michael; Palmowski, Laurence & Fay, Roger. 2004. Embodied water of construction, BEDP Environment Design Guide, GEN 58, May.
- Trudeau, N., Tam, C., Graczyk, D., and Taylor, P. 2011. Energy transition for industry: India and global context. Paris: International Energy Agency.
- UNIDO (United Nations industrial development Organization). 2014. Industrial Energy Efficiency in Iran. <http://en.ieeiran.ir> (accessed Nov. 5, 2016).
- Worldsteel (World Steel Association). World steel in figures. 2016(a). <https://www.worldsteel.org/publications/Infographics.html> (accessed Nov. 30, 2016).
- Worldsteel (World Steel Association). Construction hidden. 2016(b). <https://www.worldsteel.org/publications/Infographics.html> (accessed Nov. 30, 2016).
- Wbcsd (world business council for sustainable development). 2009. The cement sustainability initiative: recycling concrete. Washington D.C.: WRI. <http://www.wbcsdcement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf> (accessed Nov. 10, 2016).
- Houben, H. Guillaud H. 1994. Earth Construction, A comprehensive Guide. London: Intermediate Technology Publications.
- <https://doi.org/10.22034/41.178.63>