

تحلیل ردپای آب آبی و خاکستری ساخت سازه‌های بومی با تأکید بر مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران: یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای

سید مهدی حسینیان* (دانشیار)

علی صبوری قوچان عتیق (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهران کریمی‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۵۳-۶۳، صص. ۴، شماره ۳۹، پژوهشی)

صنعت ساخت ایران دارای تجربه غنی در ساخت بومی است که با شرایط اقلیمی ایران سازگار و در راستای ساخت پایدار است. متأسفانه، ساخت بومی در حال فراموشی و ساخت نوین جایگزین آن شده است. با توجه به کمبود منابع آبی در ایران، ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، ردپای آب ساختمان‌های بومی در مطالعات گذشته بررسی نشده است. این تحقیق، با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از جمله ۱۱ کارخانه مصالح و ۳۴ ساختمان بومی (سنگی، چوبی، خشتی و آجری)، تحلیلی از ردپای آب خاکستری و آبی ساخت ساختمان‌های بومی در ایران با تأکید بر مناطق مختلف آب‌وهوایی ارائه می‌دهد و نتایج با ساختمان‌های نوین (بتنی و فولادی) مقایسه می‌شوند. ردپای آب آبی و خاکستری احداث ساختمان‌ها با استفاده از روش شبکه ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که ساخت بومی الگویی مناسب برای کاهش مصرف آب و کاهش آلودگی آن است.

واژگان کلیدی: ارزیابی چرخه حیات، ردپای آب آبی، ردپای آب خاکستری، سازه‌های بومی.

s.hosseinian@basu.ac.ir
alisabouri5192@gmail.com
mehranchorimipoor@gmail.com

۱. مقدمه

آن‌ها رو به کاهش است. این ساختمان‌ها به دلیل مهارت مورد نیاز ساخت و احتمال فرسایش، با ساختمان‌های نوین جایگزین می‌شوند.^[۱] تولید مصالح نوین انرژی زیادی مصرف کرده و به محیط زیست آسیب می‌رساند. تحقیقات نشان داده‌اند که تولید یک تن فولاد و سیمان، به ترتیب ۱۳/۱۰۵ و ۱/۸۲۱ مترمکعب آب مصرف می‌کند و همچنین، از تولید این مصالح، به ترتیب ۱/۸۱ و ۰/۸۱ تن کربن تولید می‌شود.^[۲-۵] این وضعیت نگرانی‌ها در رابطه با سهم مصالح ساختمانی نوین در مشکلات پایداری صنعت ساخت را افزایش می‌دهد. افکار عمومی به دلیل تغییرات آب‌وهوایی خواهان پاسخگویی صنایع نسبت به عملکرد زیست محیطی خود هستند. متأسفانه، ساختمان‌های نوین بر اساس مد روز و یا گاهی بر اساس الگوهای کشورهای ثروتمند در آب شکل می‌گیرند.^[۸] همچنان در صنعت ساخت، به ویژه در ایران، به مسائل تغییر اقلیم و کم‌آبی توجه چندانی نمی‌شود.

ساختمان‌های بومی، منعکس‌کننده تاریخ، فرهنگ و جامعه مناطق خود هستند. متأسفانه، ساخت بومی در حال فراموشی و ساخت نوین جایگزین آن شده است. برخلاف ساختمان‌های نوین، ساختمان‌های بومی دارای ویژگی‌های سازگار با محیط زیست هستند، از جمله:

- استفاده از مصالح طبیعی و انرژی‌های تجدیدپذیر؛^[۱] ایجاد نور طبیعی؛^[۲] سازگاری با اقلیم محلی؛^[۱] مقرون به صرفه بودن؛^[۳] قابل بازیافت بوده و از نظر ضایعات ساختمانی عملکرد خوبی دارند.^[۴]

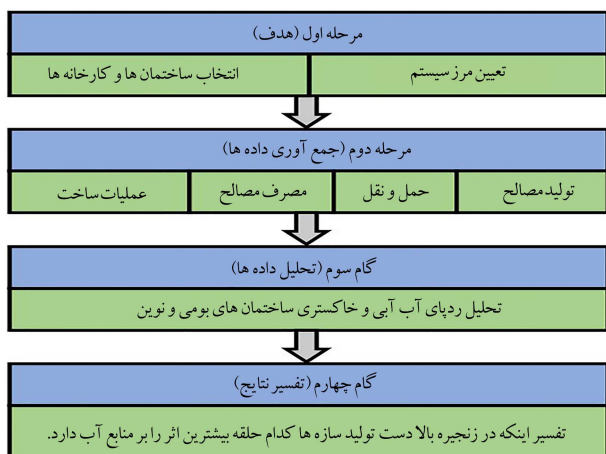
بسیاری از ساختمان‌های بومی همچنان مورد استفاده روزمره هستند، اگرچه تعداد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۲۶، پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۳. ۱۴۰۱

استناد به این مقاله:

حسینیان، سید مهدی، صبوری قوچان عتیق، علی، و کریمی پور، مهران، ۱۴۰۲. تحلیل ردپای آب آبی و خاکستری ساخت سازه‌های بومی با تأکید بر مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران: یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۵۳-۶۴. DOI:10.24200/J30.2023.61517.3177



شکل ۱. مراحل انجام تحقیق.



شکل ۲. ساختمان های بومی ایران.

گروه زیر دسته بندی کرد:

۱. ساختمان های چوبی در منطقه سبز و مرطوب دریای خزر؛
۲. ساختمان های سنگی و خشتی در منطقه کوهستانی در غرب؛
۳. ساختمان های آجری در منطقه خشک و نیمه خشک در شمال شرقی؛
۴. ساختمان های خشتی در منطقه گرم و کویری در مرکز ایران.

در این تحقیق، ملاک طبقه بندی سازه ها، مصالح قالب در ساخت آن ها است. هرچند تقسیم بندی های دیگری نیز می توان ارائه داد. مطالعاتی به ساختمان های بومی ایران توجه کرده اند [۲۹، ۲۸، ۲۷]، اما چنین تقسیم بندی خاصی ارائه نشده است. برای تجزیه و تحلیل ردپای آب سازه های بومی، نمونه هایی از ساختمان های بومی هر منطقه شامل ۸ ساختمان سنگی و ۸ ساختمان خشتی در مناطق کوهستانی غرب ایران، ۴ ساختمان خشتی در منطقه گرم و کویری مرکز ایران، ۸ ساختمان آجری در منطقه خشک و نیمه خشک شمال شرق ایران و ۶ ساختمان چوبی در منطقه سبز و مرطوب سواحل دریای خزر انتخاب شده اند. این ساختمان ها با مشورت کارشناسان میراث فرهنگی هر منطقه و در مناطق بومی انتخاب شدند تا به بهترین شکل نمایانگر ساخت بومی اقلیم های مختلف باشند. شکل ۲ نمونه هایی از ساختمان ها را نشان می دهد. جهت مقایسه، ۸ ساختمان نوین نیز به صورت تصادفی از میان کارهای

علی رغم کمبود آب جهانی، مصرف آب در ایران و سراسر جهان همچنان در حال افزایش است. ساختمان های بومی راه حل خوبی برای مشکلات زیست محیطی صنعت ساخت به نظر می رسند. [۹] گذشتگان ما، در منطقه خاورمیانه سازه هایی را ساخته اند که اولویت اصلی آن ها جنبه های اجتماعی و زیست محیطی سازه ها بوده است. [۸] به نظر می رسد قبل از انقلاب صنعتی، انسان با ایده پایداری بیشتر آشنا بوده است. معماری بومی ایرانی، الگویی ارزشمند برای ایجاد بناهای دوستدار محیط زیست در ایران و شاید هم در دنیای مدرن است. این معماری با توجه به اقلیم محلی، با سازه، محیط و ساکنین تعادل ایجاد می کند. [۱۰] درون گرایی، هدفمندی، حریم خصوصی، انطباق با محیط و استفاده از مصالح محلی، از مزیت های اصلی بناهای بومی ایران است. [۱۱] متأسفانه، امروزه معماری بومی بیشتر در خانه های روستایی دیده می شود.

مطالعات خوبی در زمینه مرابای زیست محیطی ساختمان های بومی (در مقایسه با ساختمان های نوین) صورت گرفته است. [۱۲] با این حال، اطلاعات کمی در زمینه ردپای آب این ساختمان ها وجود دارد. کاهش منابع آبی ایران موجب حساسیت عمومی و نارضایتی اجتماعی در مناطق کم آب شده است. [۱۳] این امر باعث می شود که صنایع (از جمله صنعت ساخت) مسئولیت سهم خود در منابع آب را بر عهده گرفته و اقداماتی را برای کاهش مصرف آب انجام دهند.

مجموعه ای از نوشته ها، در زمینه ردپای آب مصالح ساختمانی مانند سیمان [۱۳، ۱۴] فولاد [۱۳، ۱۴] و بتن [۱۴] وجود دارد. علاوه بر این، تلاش های جهانی قابل قبولی برای ارزیابی سهم صنعت ساخت در منابع آب در کشورهای مختلف مانند استرالیا [۱۵-۱۷]، هند [۱۸-۲۰]، چین [۲۱-۲۳]، اسپانیا [۲۴] و ایران [۲۵، ۲۶] اختصاص داده شده است. با این حال، دانش کمی در زمینه ردپای آب آبی ساختمان های بومی وجود دارد. [۲۷] همچنین، تنها در مرجع [۱۳] در زمینه ردپای آب خاکستری صنعت ساخت تحقیقاتی صورت گرفته است. با توجه به این که درصد قابل توجهی (حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد) از ساختمان های احداث شده در جهان همچنان بومی هستند [۲۷]، توجه به ردپای آب این ساختمان ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برخی از محققان، صرفه جویی در انرژی و آسایش حرارتی ساختمان های بومی ایرانی را بیشتر در منطقه خشک مرکزی مطالعه کرده اند. [۸] با این حال، بر اساس دانش نویسندگان، مطالعه ای ردپای آب چنین ساختمان هایی را به ویژه در مناطق مختلف آب و هوایی ایران تجزیه و تحلیل نکرده است. هدف از این تحقیق، ارائه تحلیلی از ردپای آب آبی و خاکستری سازه های بومی با تأکید بر مناطق مختلف آب و هوایی ایران است و در همین راستا، ایده هایی از شبکه ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات اعمال می شود. نمونه ای از ۱۱ کارخانه تولید مصالح ساختمانی بررسی شده و ۳۴ ساختمان بومی شامل خشتی، آجری، سنگی و چوبی که هر کدام مربوط به منطقه ای خاص از ایران است، مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. نتایج با ساختمان های نوین (فولاد و بتنی) مقایسه می شوند. ردپای آب خاکستری و آبی در طول زنجیره مورد بررسی قرار گرفته و حجم آب در هر مترمربع ساختمان در نظر گرفته می شود. ردپای آب تولید و استخراج مصالح، حمل و نقل (مربوط به مصالح و نیروی انسانی) و کارگاه ساخت ارزیابی می شوند. شکل ۱ ساختار این تحقیق را نشان می دهد.

۲. ساختمان های بومی

بناهای بومی ایران به طور گسترده در سراسر کشور بسته به آب و هوا، در دسترس بودن مصالح و فرهنگ محلی مورد استفاده قرار می گیرند. این بناها را می توان در چهار

برای دیوارهای خارجی ساختمان‌های نوین استفاده می‌شود. داده‌های مربوط به تولیدی بلوک‌های یونولیتی از تحقیق^[۷] گرفته شد. این بلوک‌ها به عنوان پرکننده در سقف سازه‌های بتنی (تیرچه و بلوک) کاربرد دارند. اطلاعات مربوط به ردپای آب خاکستری تولید فولاد و سیمان از تحقیق^[۱۳] گرفته شدند. از آنجایی که تحقیق^[۱۳] ردپای آب خاکستری غذای کارکنان را در نظر نگرفته، تعداد کارکنان مشغول در کارخانه‌های فولاد و سیمان از تحقیقات^[۶،۵] گرفته شد.

برای ارزیابی ردپای آب مصالح ساخت بومی، پنج تولیدی مصالح ساخت بومی از جمله خشت، سنگ، الوار، آجر فشاری و آجر سفال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. کارخانه‌ها چندین بار بازدید و داده‌های اولیه با صحبت با کارکنان جمع‌آوری شدند. برای تأیید اطلاعات جمع‌آوری شده، مصاحبه‌های حضوری با مدیران تولیدی‌ها انجام شد. مصاحبه‌ها چندین بار انجام و ساختار بندی شده بود تا اطمینان حاصل شود که پارامترهای مهم مربوط به ردپای آب در فرایند تولید مصالح در نظر گرفته شده‌اند. کارخانه الوار انتخابی دارای ظرفیت تولید سالانه ۲/۶۵۵ تن (۴/۴۲۵ مترمکعب) چوب می‌باشد. چوب‌ها عمدتاً صنوبر با چگالی ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. برای تأمین چوب مورد نیاز، از کامیون‌هایی با ظرفیت ۱۰ تن استفاده می‌شود. مسافت طی شده کامیون‌ها (رفت و برگشتی) حدود ۱۹/۴۴۰ کیلومتر در سال است. اگر متوسط مصرف گازوئیل در هر کیلومتر ۰/۳۵ لیتر در نظر گرفته شود^[۳۳]، مصرف گازوئیل کامیون‌ها ۵/۵۸۶ لیتر در سال برآورد می‌شود. مصرف آب برای شست‌وشوی ماشین‌آلات، نظافت و آشامیدن کارکنان ۸۰۰ مترمکعب در سال است. انرژی مورد نیاز توسط برق و با مصرف ۲۷/۲۹۶ مگاوات ساعت در سال تأمین می‌شود. کارکنان محلی هستند و از همین رو، مصرف آب برای حمل‌ونقل کارکنان در نظر گرفته نمی‌شود. تعداد کارکنان ۱۰ نفر در روز و ساعات کار معمول آنان ۸ ساعت در روز است. تعداد روزهای کاری تولیدی ۲۹۵ روز در سال است که در مجموع به ۲/۹۵۰ وعده غذایی نیاز است. ردپای آب چوب خام نادیده گرفته می‌شود؛ زیرا مربوط به ردپای آب سبز است.

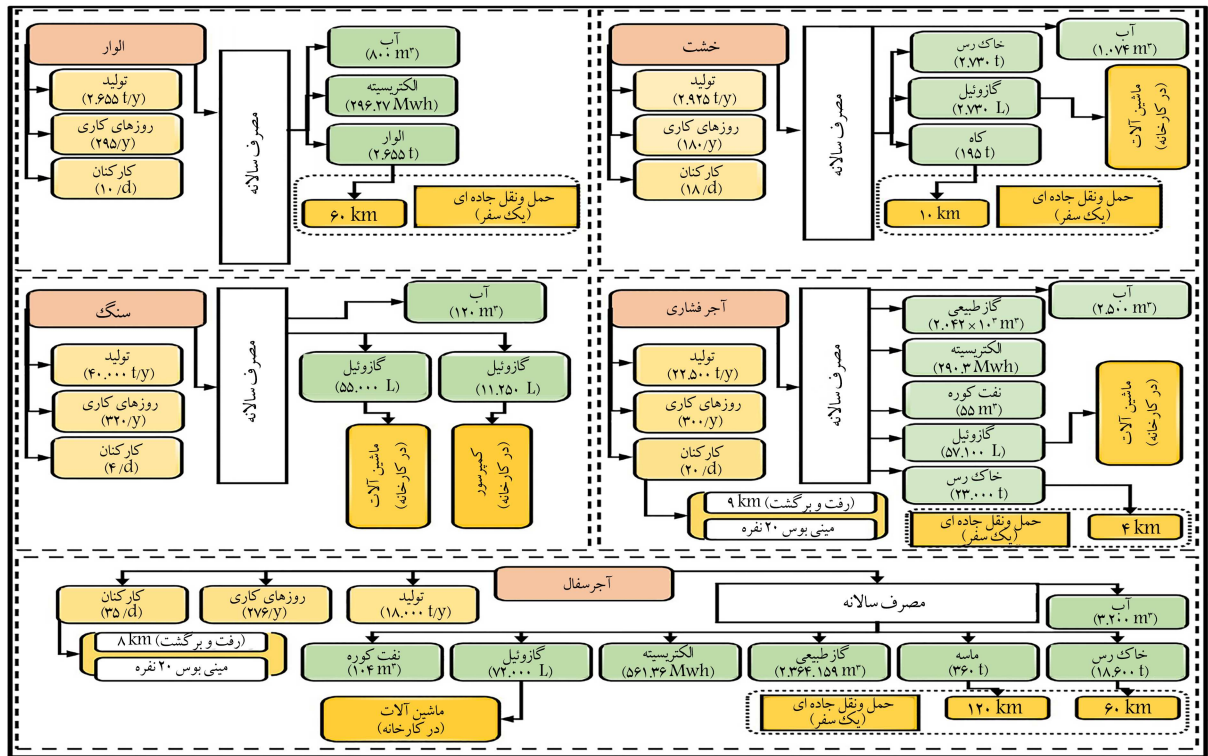
کارخانه خشت در نظر گرفته شده، یک تولیدکننده بلوک خشت خشک شده در آفتاب با ظرفیت ۲/۹۲۵ تن در سال است. در این تولیدی، میزان مصرف مستقیم آب ۱/۰۷۴ مترمکعب در سال و مصرف سالانه خاک رس و کاه به ترتیب ۲/۷۳۰ و ۱۹۵ تن می‌باشد. خاک رس در اطراف تولیدی و کاه از فاصله حدود ۵ کیلومتری تأمین می‌شود. برای حمل کاه از کامیون‌هایی با ظرفیت ۱۰ تن استفاده می‌شود که هر کامیون حدود ۷ تن کاه حمل می‌کند. مسافت طی شده کامیون‌های کاه (رفت و برگشتی) ۲۸۰ کیلومتر است. میزان گازوئیل مصرفی کامیون‌ها ۹۸ لیتر در سال است.^[۳۳] برای بارگیری و حمل خاک رس در کارخانه از یک لودر و یک کامیون استفاده می‌شود که حدود ۲/۷۳۰ لیتر در سال گازوئیل مصرف می‌کنند. تعداد کارکنان ۱۸ نفر در روز و ساعات کاری آنان ۸ ساعت در روز می‌باشد. تعداد روزهای کاری کارخانه ۱۸۰ روز در سال است که در مجموع به ۳/۲۴۰ وعده غذایی نیاز است.

معدن سنگ انتخابی، سنگ آهک تولید می‌کند. در میان انواع سنگ‌های طبیعی، سنگ‌های آهکی در ایران کاربرد بیشتری دارد، هرچند از گرانیت و مرمر نیز برای تزئین استفاده می‌شود. این کارخانه، حدود ۴۰ تن در سال سنگ استخراج می‌کند و حدود ۱۰ درصد از آن به ضایعات تبدیل می‌شود. مصرف آب برای شست‌وشوی ماشین‌آلات، نظافت و آشامیدن کارکنان، ۱۲۰ مترمکعب در سال است. برای سوراخ‌کاری جهت آنتباری و شکستن سنگ‌های منفجر شده و بارگیری، به ترتیب از یک کمپرسور، یک بیل مکانیکی مجهز به پیکور و یک لودر استفاده

می‌شود. کمپرسور حدود ۲۵۰ لیتر در روز گازوئیل مصرف می‌کند و ۴۵ روز در سال برای عملیات سوراخ‌کاری استفاده می‌شود. بیل مکانیکی و لودر حدود ۲۰۰ لیتر در روز گازوئیل مصرف می‌کنند و ۲۷۵ روز در سال کار می‌کنند. تعداد کارکنان کارخانه ۴ نفر در روز و ساعات کار آنان ۸ ساعت در روز است. تعداد روزهای کاری ۳۲۰ روز در سال است که در مجموع به ۱/۲۸۰ وعده غذایی نیاز است. به دلیل بومی بودن کارکنان، مصرف آب برای حمل‌ونقل کارکنان در نظر گرفته نمی‌شود.

کارخانه آجر انتخابی، آجر فشاری به ابعاد ۲۲ × ۱۱ × ۵ سانتی‌متر و وزن ۲/۷ کیلوگرم تولید می‌کند. این‌گونه آجرها بیش‌ترین کاربرد را در ساختمان‌های بومی دارند، هرچند از انواع دیگر آجر نیز استفاده می‌شود. ظرفیت تولید این کارخانه ۲۲/۵ تن در سال است. مقدار آب مستقیم مصرفی در کارخانه از جمله برای ساخت گل، شست‌وشوی تجهیزات، سرویس بهداشتی و آشامیدن کارکنان، ۲/۵ مترمکعب در سال است. میزان خاک رس مصرفی ۲۳ تن در سال است که از فاصله ۲ کیلومتری با کامیون‌هایی با ظرفیت ۱۰ تن تأمین می‌شود. مسافت طی شده کامیون‌ها (رفت و برگشت) ۹/۲ کیلومتر در سال است. مصرف گازوئیل کامیون‌ها ۳/۲۲۰ لیتر در سال است.^[۳۳] نوع انرژی مورد استفاده در کارخانه، گاز طبیعی، برق و نفت کوره، و برای ماشین‌آلات گازوئیل است. میزان گاز طبیعی مصرفی ۱۰^۲ × ۲/۰۴۲ مترمکعب، برق ۳/۲۹۰ مگاوات ساعت، نفت کوره ۵۵ مترمکعب و گازوئیل ۵۷/۱ مترمکعب در سال است. تعداد کارکنان این کارخانه ۲۰ نفر در روز و ساعات کاری آنان ۸ ساعت در روز می‌باشد. تعداد روزهای کاری کارخانه ۳۰۰ روز در سال است. بنابراین، در مجموع ۶/۰۰۰ وعده غذایی مورد نیاز است. برای جابجایی کارکنان از خودرویی با ظرفیت ۲۰ نفر استفاده می‌شود. فاصله کارکنان از کارخانه ۹ کیلومتر (رفت و برگشت) می‌باشد. بنابراین، میزان گازوئیل مصرفی آن ۷۵۶ لیتر در سال است.^[۳۳]

کارخانه آجر سفال، دو نوع آجر تولید می‌کند: یکی به وزن ۲/۴۳ کیلوگرم و ابعاد ۱۹ × ۱۹ × ۱۴ سانتی‌متر و دیگری با وزن ۱/۵۶ کیلوگرم و ابعاد ۱۹ × ۱۹ × ۸ سانتی‌متر. این کارخانه حدود ۱۰^۳ × ۱۸ تن در سال آجر تولید می‌کند. برای تولید آجر از خاک رس و ماسه بادی استفاده می‌شود. میزان آب مصرفی در خط تولید، شست‌وشوی تجهیزات، سرویس بهداشتی و آشامیدن کارکنان ۳/۲ مترمکعب در سال است. میزان خاک رس و ماسه مصرفی در کارخانه، به ترتیب ۱۸/۶ و ۳۶۰ تن در سال است. خاک رس و ماسه، به ترتیب، از فاصله ۳۰ و ۶۰ کیلومتری تأمین می‌شوند. از کامیون‌هایی با ظرفیت ۱۰ تن برای تأمین خاک رس و ماسه استفاده می‌شوند. مسافت طی شده کامیون‌ها (رفت و برگشت) ۱۱۵/۹۲۰ کیلومتر در سال است. مصرف گازوئیل کامیون‌ها ۵/۷۲۲ × ۴۰ لیتر در سال محاسبه می‌شود.^[۳۳] نوع انرژی مورد استفاده در کارخانه عبارت است از گاز طبیعی، برق، نفت کوره، سوخت ماشین‌آلات و گازوئیل. میزان مصرف گاز طبیعی ۲/۳۶۴ × ۱۰^۳ مترمکعب، برق ۳۶/۱۵۶ مگاوات ساعت، نفت کوره ۱۰^۴ مترمکعب و گازوئیل ۷۲ مترمکعب در سال است. تعداد کارکنان ۳۵ نفر در روز و ساعات کاری کارخانه ۸ ساعت در روز است. تعداد روزهای کاری کارخانه ۲۷۶ روز در سال است. بنابراین، در مجموع به ۹/۶۶ وعده غذایی نیاز است. برای جابجایی کارکنان از دو خودرو با ظرفیت ۲۰ نفر در روز استفاده می‌شود و مسافت طی شده ۸ کیلومتر (رفت و برگشت) می‌باشد. بدین ترتیب، میزان گازوئیل مصرفی خودروها ۶۱۸ لیتر در سال است.^[۳۳] شکل ۴، داده‌های جمع‌آوری شده در تولیدی‌های مصالح را نشان می‌دهد. همچنین، جدول ۱ فرضیات نحوه محاسبه ردپای آب سازه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴. داده‌های ردپای آب مصالح ساختمانی.

جدول ۱. فرضیات نحوه محاسبه ردپای آب سازه‌ها.

منابع	فرضیات
[۳۰]	استفاده از ایده چرخه حیات
[۳۱]	استفاده از ایده شبکه ردپای آب
[۲۵]	انجام تحلیل‌ها در مرحله ساخت
[۶۵]	در نظر گرفتن غذای کارکنان
[۳۲]	صرف‌نظر کردن از ردپای آب آبی تولید کاه به عنوان محصول جانبی گندم
[۱۳]	صرف‌نظر کردن از ردپای آب خاکستری حمل‌ونقل

جدول ۲. شدت ردپای آب آبی انرژی‌های مختلف.

منابع	شدت ردپای آب	پارامترها
[۲۸]	۹/۲۵۱	گاز طبیعی (لیتر بر مترمکعب)
[۲۷]	۲/۸۱ - ۵/۶۲	گازوئیل (لیتر بر لیتر)
[۲۷]	۳۰/۷۵ - ۶۲/۵۰	نفت کوره (لیتر بر لیتر)
[۲۸]	۱/۸	الکتریسیته (مترمکعب بر مگاوات ساعت)

ردپای آب انرژی‌های مصرفی را نشان می‌دهد. در مواقعی که بازه وجود دارد، از میانگین استفاده شده است.

۳.۳. ردپای آب غذا

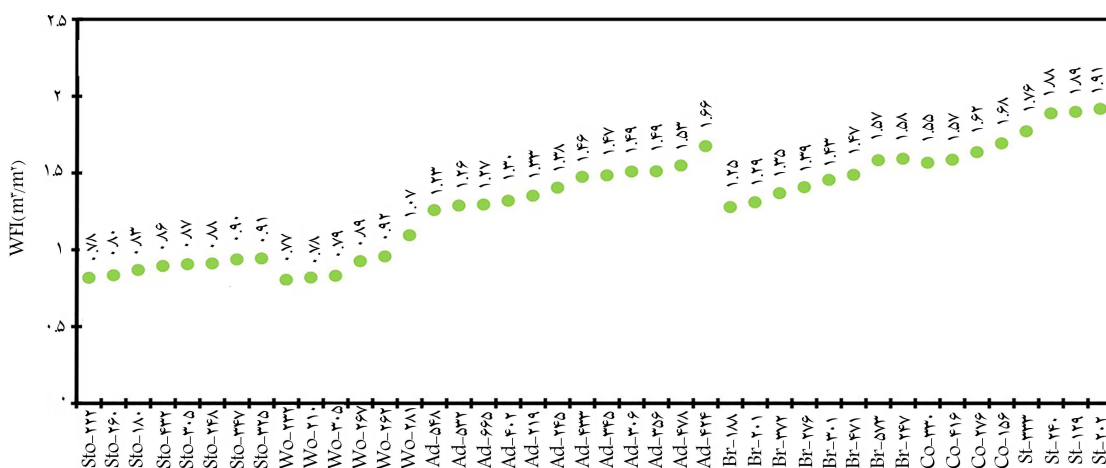
عمده ردپای آب مجازی انسان مربوط به غذا است.^[۶] ردپای آب غذای کارکنان حاوی حجم آب مصرفی برای تولید و فرآوری مواد غذایی است. بخش تولید (کشاورزی) سهم بزرگی از ردپای آب مواد غذایی را به خود اختصاص می‌دهد. درحالی که بخش فرآوری، سهم کوچکی دارد که می‌توان نادیده گرفت.^[۳۴] اطلاعات ۱۲ وعده غذایی کارکنان مشغول به کار در تولیدی‌های مصالح جمع‌آوری شدند. برای محاسبه ردپای آب یک وعده غذایی از روش ارائه شده در تحقیق^[۵] استفاده شد. ردپای آب اجزای تشکیل‌دهنده وعده‌های غذایی از مراجع^[۳۵،۳۶] گرفته شد. ردپای آب آبی و خاکستری هر وعده غذایی به‌طور میانگین به ترتیب ۰/۳۹۱ و ۰/۳۴۱ مترمکعب محاسبه گردید.

۴.۳. ردپای آب انرژی

جهت محاسبه ردپای آب انرژی از نتایج مراجع^[۳۷،۳۶] استفاده شد. جدول ۲ شدت

۵.۳. تحلیل ساختمان‌ها

با بازدید از ساختمان‌های انتخابی، داده‌های مربوط به جزئیات هندسی و احداث ساختمان‌ها جمع‌آوری شد. همچنین، اطلاعات مربوط به منابع مورد نیاز (نیروی انسانی، نفر-روز و نوع ماشین‌آلات) برای هر یک از فعالیت‌های ساختمانی و تأمین مصالح نیز با مصاحبه با پیمانکاران محلی جمع‌آوری شد. پلان ساختمان‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار اتوکد ترسیم و به‌صورت دستی میزان مصالح مصرفی محاسبه شد. در ساختمان‌های بومی، دیوارها باربر هستند؛ بنابراین، مصالح به‌کار رفته در دیوارهای داخلی و خارجی نیز در محاسبات لحاظ شدند. تمامی مصالح به‌کار رفته در سازه ساختمان‌ها شامل سنگ، الوار، خشت، آجر و غیره در تحلیل‌ها در نظر گرفته شدند. شکل ۱ در پیوست، میزان مصالح مصرفی در احداث ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، شکل ۲ در پیوست نمونه‌ای از پلان‌های ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. اطلاعاتی در مورد بازسازی و یا ضایعات مصالح ساختمانی‌های بومی وجود نداشت و بنابراین در نظر گرفته نشدند. برای ساختمان‌های نوین از ترسیمات



شکل ۵. شدت ردپای آب آبی ساختمان‌ها.

لیتر برای هر نفر در یک نوبت کاری ۸ ساعته) از مرجع^[۵] برداشته شد. همچنین، داده مربوط به آب مستقیم مورد نیاز برای عمل‌آوری بتن (۳۵ لیتر برای هر مترمربع سطح - در ۷ شبانه روز) از مرجع^[۵] استخراج شد.

۴. نتایج

۴.۱. ردپای آب آبی احداث سازه‌ها

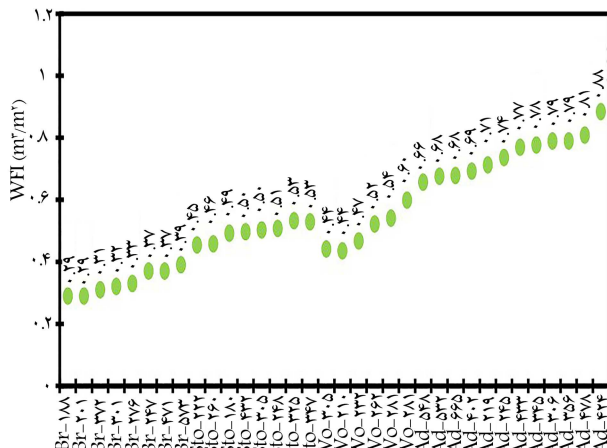
شکل ۵ سهم مقادیر مختلف در شدت ردپای آب آبی سازه‌های بومی و نوین را نشان می‌دهد. شدت ردپای آب آبی سازه‌های بومی در بازه ۰/۷۸ الی ۱/۵۸ مترمکعب بر مترمربع زیربنا متغیر است. همچنین، شدت ردپای آب آبی سازه‌های نوین در بازه ۱/۵۵ الی ۱/۹۱ مترمکعب بر مترمربع تغییر می‌کند. سازه‌های فولادی دارای بیشترین ردپای آب آبی هستند. این سازه‌ها دارای ردپای آب آبی دو برابر بزرگ‌تر از ردپای آب آبی سازه‌های سنگی هستند. ردپای آب آبی سازه‌های سنگی و چوبی تقریباً یکسان هستند. ردپای آب آبی سازه‌های خشتی و آجری در میان حداقل ردپای آب آبی سازه‌های بومی و حداکثر ردپای آب آبی سازه‌های نوین قرار دارند. ردپای آب آبی سازه‌های بتنی تقریباً ۸۶ درصد ردپای آب آبی سازه‌های فولادی و ۱۳ درصد بیشتر از ردپای آب آبی سازه‌های خشتی و آجری است.

شکل‌های ۶ و ۷ سهم پارامترهای مختلف در ردپای آب آبی ساختمان‌ها را نشان می‌دهند. ردپای آب آبی مصالح سازه‌ای قابل توجه و برای حمل‌ونقل به نسبت کوچک است. شدت ردپای آب آبی کارگاه‌های ساخت بومی ۳/۳۳ درصد (۰/۴۱ مترمکعب بر مترمربع) بیشتر از شدت ردپای آب آبی کارگاه‌های ساخت نوین (۰/۳۱ مترمکعب بر مترمربع) است. این به دلیل مشارکت بیشتر نیروی انسانی نسبت به ماشین‌آلات در ساخت بومی و مصرف بیشتر آب مجازی مربوط به انسان است. از سوی دیگر، شدت ردپای آب آبی مربوط به مصالح در ساخت نوین (۱/۴۲ مترمکعب بر مترمربع)، ۹۷/۲ درصد بزرگ‌تر از شدت ردپای آب مربوط به مصالح ساخت بومی (۰/۷۲ مترمکعب بر مترمربع) است. میلگرد و بتن به ترتیب ۴۱/۸۵ (۰/۶۷ مترمکعب بر مترمربع) و ۲۸/۲۵ درصد (۰/۴۵ مترمکعب بر مترمربع) از ردپای آب آبی سازه‌های بتنی را تشکیل می‌دهند. در مقایسه، فولاد و بتن به ترتیب مرتبط با ۵۸/۰۶ (۱/۰۸ مترمکعب بر مترمربع) و ۱۴/۷۳ درصد (۰/۲۷ مترمکعب بر مترمربع) از ردپای آب آبی سازه‌های فولادی هستند. برای سازه‌های

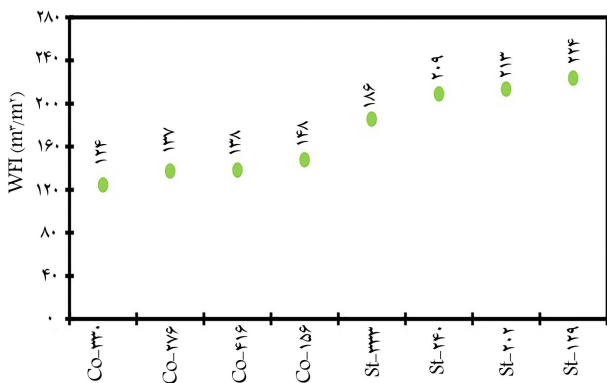
جدول ۳. مسافت حمل‌ونقل مصالح (رفت و برگشت).

مصالح	مسافت (Km)
کاه، خشت، خاک، چوب و سنگ	۱۰
آجر فشاری	۱۰۰
بتن آماده	۲۰
بلوک یونولیتی	۱۰۰
بلوک بتنی	۲۰
آجر سفال	۲۰۰
فولاد	۱/۰۶۰
سیمان	۲۰۰
سنگدانه	۸۰

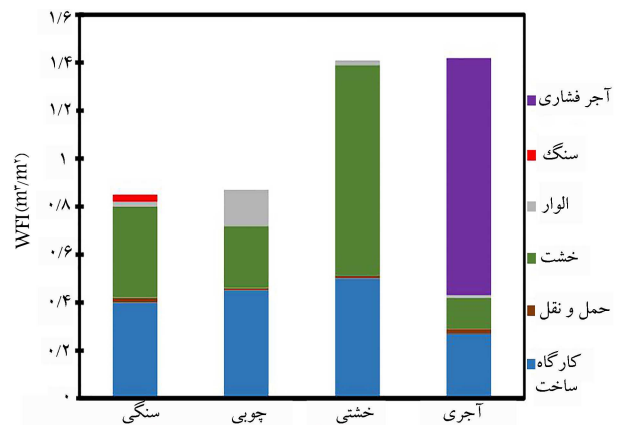
سازه‌ای و معماری جهت محاسبه مصالح مصرفی استفاده شد. محاسبات با کمک نرم‌افزارهای ایتبس (CSI ETABS) و سازه ۹۰ انجام شد. اطلاعات ماشین‌آلات مورد استفاده و زمان کار آن‌ها از تحقیق^[۷] برداشت شد. بیل مکانیکی با ظرفیت ۰/۸ مترمکعب و متوسط خاک‌برداری ۶۴ مترمکعب در ساعت، به طور معمول در عملیات خاک‌برداری استفاده می‌شود. برای حمل مصالح به کارگاه‌های ساختمانی، فاصله کارخانه‌های مصالح و ظرفیت کامیون‌ها از مصالحه‌های میدانی با پیمانکاران محلی جمع‌آوری شد. مسافت حمل‌ونقل مصالح به صورت رفت و برگشت در نظر گرفته شد.^[۲۵] جهت محاسبه مسافت حمل مصالح بومی (شامل کاه، خشت، خاک، چوب و سنگ)، ۱۰ کیلومتر (رفت و برگشت) در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه بتن آماده و کارگاه‌های ساخت بلوک‌های بتنی در نزدیکی شهرها هستند، ۲۰ کیلومتر فاصله حمل (رفت و برگشت) لحاظ شد. برای آجر فشاری با توجه به دوری محل تولید از شهرها، فاصله ۱۰۰ کیلومتر (رفت و برگشت) در نظر گرفته شد. برای سایر مصالح سازه‌ای نوین مانند سیمان و فولاد، از آنجا که محل بررسی سازه‌های نوین شهر همدان است، فاصله کارخانه‌های میلگرد، آجر سفال، بلوک یونولیتی، سنگدانه و سیمان برای این شهر (مرکز شهر) محاسبه شد. داده‌ها در جدول ۳ خلاصه می‌شوند. جرقیل سیار ۲۰ تنی و دستگاه جوش دیزلی ۲۰ کیلوولت آمپر برای جوشکاری سازه‌های فولادی در نظر گرفته شد. پمپ بتنی قابل حمل با ظرفیت حدود ۲۴ مترمکعب در ساعت برای پمپ بتن در سازه‌های نوین در نظر گرفته شد. مصرف آب مستقیم افراد مشغول در کارگاه‌های ساخت (۳۰



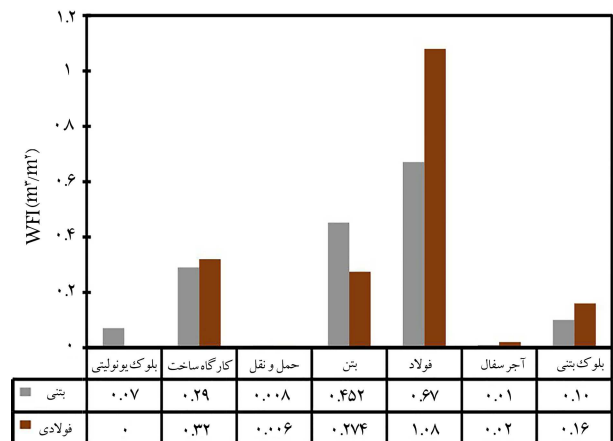
شکل ۸. شدت ردپای آب خاکستری ساختمان‌های بومی.



شکل ۹. شدت ردپای آب خاکستری ساختمان‌های نوین.



شکل ۶. سهم پارامترهای مختلف در ردپای آب آبی ساختمان‌های بومی.



شکل ۷. سهم پارامترهای مختلف در ردپای آب آبی ساختمان‌های نوین.

آب آبی کارگاه‌ساخت (۱۹ درصد) و ردپای آب آبی تولید خشت (۹/۲ درصد) است.

۲.۴. ردپای آب خاکستری احداث سازه‌ها

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب شدت ردپای آب خاکستری سازه‌های بومی و نوین را نشان می‌دهند. بسته به نوع سازه، شدت ردپای آب خاکستری سازه‌های بومی از ۲۹/۰ الی ۸۸/۰ مترمکعب بر مترمربع و سازه‌های نوین از ۱۲۴ الی ۲۲۴ مترمکعب بر مترمربع است. گفتنی است که ردپای آب خاکستری سازه‌های بومی، برابر کوچک‌تر از ردپای آب خاکستری سازه‌های نوین است. این به دلیل ردپای آب خاکستری زیاد مصالح نوین است. ردپای آب خاکستری برای سازه‌های فولادی بزرگ‌ترین و برای سازه‌های آجری کوچک‌ترین است. ردپای آب خاکستری سازه‌های بتنی، ۶۵ درصد ردپای آب خاکستری سازه‌های فولادی است. ردپای آب خاکستری سازه‌های فولادی و بتنی بسیار بزرگ‌تر از ردپای آب آبی است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ سهم پارامترهای مختلف در شدت ردپای آب خاکستری ساختمان‌ها را نشان می‌دهند. برای سازه‌های بومی، ردپای آب خاکستری در بازه ۲۹/۰ الی ۸۸/۰ مترمکعب بر مترمربع است که تا حد زیادی به ردپای آب خاکستری وعده‌های غذایی کارکنان (۴۳/۲ - ۶۲/۴ درصد) و تولید مصالح (۳۷/۶ - ۵۶/۸ درصد) وابسته است. برای سازه‌های بتنی، شدت ردپای آب خاکستری ۱۳۶/۹ مترمکعب بر مترمربع و به‌طور عمده مربوط به ردپای آب خاکستری تولید میلگرد (۷۵ درصد) و پس از آن ردپای آب خاکستری سیمان مورد

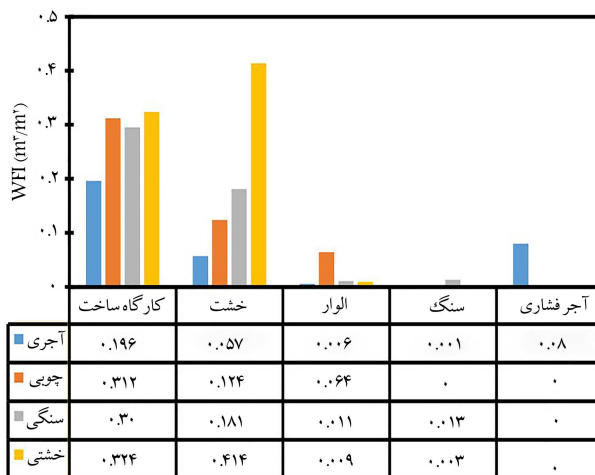
چوبی، ردپای آب آبی مصالح (۴۳/۰ مترمکعب بر مترمربع) تنها حدود یک چهارم ردپای آب آبی مصالح سازه‌های فولادی (۵۳/۱ مترمکعب بر مترمربع) است. شدت ردپای آب آبی سازه‌های بتنی (۶/۱ مترمکعب بر مترمربع)، تحت اثر آب مستقیم موردنیاز برای خط تولید فولاد (۶/۲۶ درصد) و به دنبال آن ردپای آب آبی غذای کارکنان در کارگاه‌های ساخت (۵/۱۲ درصد) است. برای سازه‌های فولادی، ردپای آب آبی ۱/۸۶ مترمکعب بر مترمربع و عمدتاً (۹/۳۶ درصد) تحت اثر آب مستقیم موردنیاز برای خط تولید کارخانه فولاد است. به دنبال آن، ردپای آب آبی انرژی مصرف شده در تولید فولاد (۵/۱۸ درصد) و ردپای آب آبی وعده‌های غذایی کارکنان کارگاه‌های ساخت (۹/۱۲ درصد) قرار می‌گیرند. برای سازه‌های سنگی، شدت ردپای آب آبی ۰/۸۵ مترمکعب بر مترمربع و عمدتاً تحت تأثیر ردپای آب آبی کارگاه‌های ساخت (۱/۴۷ درصد) و به دنبال آن ردپای آب آبی تولید خشت (۷/۴۴ درصد) و ردپای آب آبی تولید سنگ (۵/۳ درصد) قرار دارند. برای سازه‌های چوبی، ردپای آب آبی ۰/۸۷ مترمکعب بر مترمربع، عمدتاً تحت اثر ردپای آب آبی کارگاه‌های ساخت (۷/۵۱ درصد) و به دنبال آن ردپای آب آبی تولید خشت (۹/۲۹ درصد) و ردپای آب آبی کارخانه چوب (۲/۱۷ درصد) قرار دارند. برای سازه‌های خشتی، شدت ردپای آب آبی ۱/۴۱ مترمکعب بر مترمربع، عمدتاً تحت اثر ردپای آب آبی تولید خشت (۴/۶۲ درصد) و به دنبال آن، ردپای آب آبی کارگاه ساخت (۵/۳۵ درصد) و کارخانه چوب (۲۲/۱ درصد) قرار دارند. برای سازه‌های آجری، ردپای آب آبی ۱/۴۲ مترمکعب بر مترمربع تا حد زیادی تحت تأثیر ردپای آب آبی کارخانه آجر (۷/۶۹ درصد) است و به دنبال آن ردپای

تحلیل ردپای آب، متفاوت است. تحقیقات میدانی بیشتری برای ایجاد یک پایگاه داده محلی در زمینه ردپای آب سازه‌های بومی و نوین مورد نیاز است.

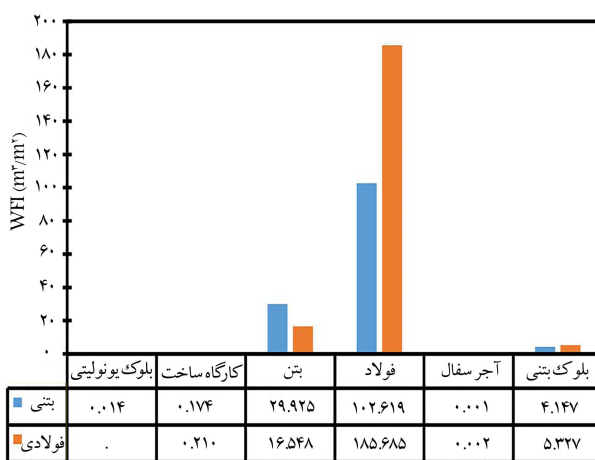
ردپای آب خاکستری انرژی به دلیل نبود داده‌های قابل اعتماد محاسبه نشد. هرچند، انرژی مورد نیاز برای حمل و نقل در مقایسه با تولید مصالح ناچیز است. کارگاه‌های ساخت و کارخانه‌های مصالح، منابع مهمی برای جمع‌آوری داده‌های ردپای آب هستند. هنگام کار با داده‌های واقعی، شرایط محلی به احتمال زیاد حذف نمی‌شوند. به عنوان مثال، کارخانه فولاد منتخب بخشی از نیروی الکتریکی خود را در نیروگاه‌های گازی داخل کارخانه تولید می‌کند، اما کارخانه‌های دیگر فولاد ممکن است از انرژی‌های مختلفی برای تولید برق استفاده کنند. این ممکن است ردپای آب محاسبه شده را تحت تأثیر قرار دهد. از آنجا که چنین داده‌هایی در ایران در دسترس نیست، میانگین جهانی ردپای آب آبی انرژی از تحقیق‌های [۳۷، ۳۶] استخراج شدند. با این حال، میانگین جهانی ردپای آب برای انرژی ممکن است در یک منطقه خاص متفاوت باشد. برخی از نیروگاه‌ها از آب‌شور به جای آب شیرین برای خنک‌سازی استفاده می‌کنند که بر اساس تعریف، ردپای آب آن صفر در نظر گرفته می‌شود. برخی از اشکال انرژی (به عنوان مثال انرژی تجدیدپذیر نظیر خورشیدی یا بادی) دارای ردپای آب بسیار پایین‌تری نسبت به سایرین (سوخت‌های فسیلی) هستند. [۳۷] داده‌های ردپای آب خاکستری برای تولید فولاد و سیمان از تحقیق [۱۳]، به دست آمد. همچنین، اطلاعات وعده‌های غذایی به دلیل کمبود داده در ایران از مراجع [۳۵، ۳۴] استخراج شدند.

فاضلاب‌رها شده در محیط زیست اکثر اوقات شناسایی نمی‌شود. بنابراین، نتایج ردپاهای آب خاکستری باید با احتیاط تفسیر شوند. برای ارزیابی ردپای آب خاکستری کارخانه‌های فولاد و سیمان از تحقیق [۱۳] استفاده شد. پژوهشگران این تحقیق، نتایج را بر اساس پایگاه داده جهانی به دست آوردند. با این حال، مشخص نیست که آیا پایگاه داده جهانی آلاینده‌های واقعی وارد شده به محیط زیست، یعنی آلاینده فاضلاب را پس از تصفیه یا قبل از تصفیه گزارش می‌دهد. اگر آلاینده ارائه شده توسط پایگاه داده جهانی در عمل خیلی زیاد باشد، ردپای آب خاکستری در اینجا بیش از حد برآورد شده است. علاوه بر این، استفاده از مفهوم ردپای آب خاکستری نشان می‌دهد که این تحقیق حجم آب مورد نیاز برای رقیق کردن مقدار آلاینده‌هایی شیمیایی وارد شده به آب برای دستیابی به کیفیت آب قابل قبول را تعیین می‌کند. جدول ۴، نتایج ردپای آب محاسبه شده در این تحقیق را با نتایج گزارش شده در تحقیقات دیگران مقایسه می‌کند. مطالعات اندکی در زمینه ردپای آب سازه‌ها انجام شده است. تحقیق [۱۵]، ردپای آب ۱۷ سازه در استرالیا را در محدوده (۲/۵ الی ۹ مترمکعب بر مترمربع) محاسبه کرده است که این مقدار بزرگ‌تر از مقادیر به دست آمده در این تحقیق (۱/۵۵ الی ۱/۶۸ مترمکعب بر مترمربع) است. این ممکن است به دلیل زیربنا و طبقات ساختمان‌های انتخاب شده (تا ۱۳۰ مترمربع و ۵۲ طبقه) و کاربری آن‌ها (تفریحی، صنعتی و مسکونی) باشد. [۱۵] در مقایسه، در این تحقیق، ساختمان‌ها مسکونی، دوطبقه و مساحت آن‌ها ۱۲۹ الی ۶۶۵ مترمربع می‌باشد.

چانگ و همکاران، شدت ردپای آب سازه‌های مسکونی فولادی و چوبی را در چین ارزیابی کردند. [۲۱] آن‌ها شدت ردپای آب سازه‌های چوبی را ۱/۵ مترمکعب بر مترمربع و سازه‌های فولادی را ۲ مترمکعب بر مترمربع گزارش کردند که تطابق خوبی با نتایج این تحقیق دارد. با این حال، آن‌ها مصالح ساختمانی دیگری (مانند شیشه و سرامیک) را نیز در نظر گرفتند. حسینیان و قهاری، ردپای آب سازه‌های بتنی و فولادی مسکونی سه تا هشت طبقه را در ایران بررسی کردند. [۲۵] آن‌ها شدت ردپای آب سازه‌ها را بالاتر از نتایج به دست آمده در این تحقیق گزارش کردند. این امر به این دلیل است که آن‌ها مصرف آب سبز را نیز در نظر گرفتند که برای غذای کارکنان



شکل ۱۰. سهم پارامترهای مختلف در ردپای آب خاکستری ساختمان‌های بومی.



شکل ۱۱. سهم پارامترهای مختلف در ردپای آب خاکستری ساختمان‌های بومی.

نیاز برای بتن (۲۱/۸ درصد) است. به‌طور مشابه، برای سازه‌های فولادی، ردپای آب خاکستری ۲۵۷/۸ مترمکعب بر مترمربع و به‌طور عمده مربوط به ردپای آب خاکستری تولید فولاد (۸۹/۴ درصد) و پس از آن ردپای آب خاکستری سیمان مورد نیاز برای بتن (۷/۹۶ درصد) است. غلظت جیوه، ردپای آب خاکستری سیمان را تعیین می‌کند و برای فولاد، کادمیوم آلاینده مهم است. [۱۳] برای وعده‌های غذایی، آلاینده‌ها به‌طور کلی شامل کودهای شیمیایی (نیترژن، فسفر و غیره)، حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها هستند. [۳۵]

۳.۴ بحث

ساختمان‌های انتخاب شده دو طبقه با مساحت زیربنای در بازه ۱۲۹ الی ۶۶۵ مترمربع و در مناطق مختلف ایران قرار داشتند. بنابراین، در مورد تفسیر نتایج با در نظر گرفتن محدوده تحقیق باید احتیاط کرد. با این حال، یک تحلیل جامع برای نتیجه‌گیری کلی در مورد مزایای یک نوع ساختمان نسبت به سایرین مورد نیاز است. سایر مشخصات پروژه مانند مدیریت، برنامه‌ریزی و کنترل، مهارت‌های کارکنان و نوع ماشین‌آلات مورد استفاده نیز ممکن است بر نتایج تأثیر بگذارند. علاوه بر این، ردپای آب تولید مصالح ساختمانی، از کارخانه‌ای به کارخانه دیگر به دلیل میزان نوع انرژی مصرف شده، فرایند تولید، فناوری‌های محلی و حتی روش انتخاب شده

جدول ۴. شدت ردپای آب احداث ساختمان‌ها در کشورهای مختلف.

کشور	تعداد طبقات	مساحت (m ²)	شدت ردپای آب (m ³ /m ²)		
			بتنی	فولادی	چوبی
چین	-	-	-	۲	۱/۵
استرالیا	۲-۵۲	۱۸۰-۱۳۰,۰۰۰	۲/۵-۹	-	-
ایران	۳-۸	۶۶۵-۲,۷۰۳	۳/۳۰-۴/۶۹	۴/۰۸-۵/۶۰	-
ایران	۲	۱۲۹-۶۶۵	۱/۵۵-۱/۶۸	۱/۷۶-۱/۹۱	۱/۰۷-۰/۷۷

این تحقیق

برابر کاهش می‌یابد. همچنین، اگر انرژی برق با انواع کم آب زمین گرمایی، بادی و خورشیدی جایگزین شود، ردپای آب سازه‌های نوین می‌تواند به میزان قابل توجهی کاهش یابد. مدیریت مؤثر منابع انسانی در کارگاه‌های ساخت و تولید مصالح می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد و این امر به نوبه خود می‌تواند ردپای آب مربوط به کارکنان را کاهش دهد.

این تحقیق، برای اولین بار تحلیل ردپای آب آبی و خاکستری سازه‌های بومی را ارائه و عملکرد آن‌ها را با سازه‌های نوین مقایسه کرد. چنین تحلیلی کمک می‌کند که زنجیره‌های مرتبط با بیش‌ترین آلودگی و مصرف آب شیرین شناسایی شوند. یافته‌های حاضر حاکی از آن است که عدم احداث ساختمان‌های بومی منجر به مصرف غیرضروری آب و آلودگی آن می‌شود. امید است این تحقیق در افزایش پایداری در صنعت ساختمان سودمند باشد. می‌توان نتیجه گرفت که احداث ساختمان‌های بومی، الگوهایی را برای صنعت ساخت فراهم می‌کند تا به جای آسیب رساندن به طبیعت، با آن تعامل داشته و در نتیجه مصرف آب و آلودگی آن را به حداقل رساند. این تحقیق، به اهمیت ساخت بومی در ایران کمک می‌کند که می‌تواند به عنوان مرجعی برای توسعه و انطباق بیشتر در طراحی ساختمان‌های نوین مورد استفاده قرار گیرد. متأسفانه، ساختمان‌های نوین در ایران بر اساس مد روز و یا گاهی الگوهایی از کشورهای ثروتمند در آب ساخته می‌شوند. ایران دارای تجربه‌ای ارزشمند در ساخت سنتی است. این موضوع به خوبی در بافت‌های قدیمی شهرهایی مانند یزد یا شمال ایران، روستاهای همدان و یا مناطق مختلف کناره خلیج فارس دیده می‌شود. ساخت بومی نسبت به نوین موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع آب و کاهش آلودگی آن‌ها می‌شود. بنابراین، استفاده از الگوهای بومی در روستاها نیاز است تقویت شود. در ساخت خانه‌های شهری یک یا دو طبقه می‌توان از الگوهای بومی متناسب با مصالح در دسترس منطقه استفاده کرد. همچنین، سازه‌های موجود نیاز است حفظ و از تخریب زود هنگام آن‌ها به دلیل نوسازی جلوگیری شود.

قابل توجه است. بدون در نظر گرفتن ردپای آب سبز، نتایج آن‌ها به ۱/۷۹ الی ۳/۱ مترمکعب بر مترمربع کاهش می‌یابد که نزدیک به نتایج این تحقیق (۱/۵۵) الی ۱/۹۱ مترمکعب بر مترمربع است. همچنین، آن‌ها تنها یک نوع وعده غذایی را در نظر گرفتند که باعث عدم قطعیت در محاسبه می‌شود. در این تحقیق، ۱۲ وعده غذایی مختلف در نظر گرفته شده است. برای ردپای آب خاکستری سازه‌ها، طبق دانش نویسندگان، هیچ تحقیقی وجود ندارد که اجازه مقایسه نتایج را بدهد. مساحت کل ساختمان‌های تکمیل شده در ایران در سال ۱۳۹۹ برابر با $۱۰^۶ \times ۷۷/۶$ مترمربع بوده است^[۳۸] که ۲۰/۳ درصد آن بومی، ۱۷/۵ درصد فولادی و باقی آن (۶۲/۲ درصد) بتنی است. با استفاده از شکل ۵، می‌توان کل ردپای آب سازه‌ها در ایران را ($۱۰^۶ \times ۱۲۷/۸$ مترمکعب) به دست آورد. همچنین، مجموع ردپای آب آبی ایران حدود $۱۰^۶ \times ۴۰,۹۱۲/۷۶$ مترمکعب است.^[۵] بنابراین، سهم ردپای آب سازه‌ها به کل ردپای آب ایران حدود ۰/۳۱ درصد است. در مقایسه، سهم ردپای آب تولید فولاد در چین به کل ردپای آب آبی چین حدود ۰/۴ درصد است.^[۳۹] همچنین، سهم ردپای آب آبی تولید سیمان در ایران حدود ۰/۳۹ درصد کل ردپای آب آبی ایران است.^[۵] این نشان می‌دهد که ردپای آب سازه‌های ساختمانی در مقایسه با سایر صنایع قابل توجه است.

۵. نتیجه‌گیری

ردپای آب آبی مصرف انرژی نسبت قابل توجهی از کل ردپای آب آبی سازه‌های بتنی و فولادی است. این در حالی است که برای سازه‌های سنگی، چوبی، خشتی و آجری، غذای کارکنان مهم‌ترین پارامتر است. هنگامی که احداث ساختمان از الگوهای بومی با ردپای آب خاکستری به نسبت کوچک مصالح طبیعی پیروی می‌کند، سهم صنعت ساختمان در آلودگی آب و مصرف منابع آب به ترتیب ۳۲۷/۵ و ۱/۵۲

منابع (References)

- Oikonomou, A., and Bougiatioti, F., 2011. Architectural structure and environmental performance of the traditional buildings in Florina, NW Greece. *Building and Environment*, 46(3), pp.669-689.
- Ahani, F., 2011. Natural light in traditional architecture of Iran: Lessons to remember. *Light in Engineering, Architecture and the Environment*, 121, pp.25-36.

<http://dx.doi.org/10.2495/LIGHT110031>.

- Samuel, D. L., Dharmasastha, K., Nagendra, S. S., and Maiya, M.P. 2017. Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), pp.463-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.08.001>.
- Picuno, P., 2016. Use of traditional material in farm buildings for a sustainable rural environment. *Internationa*

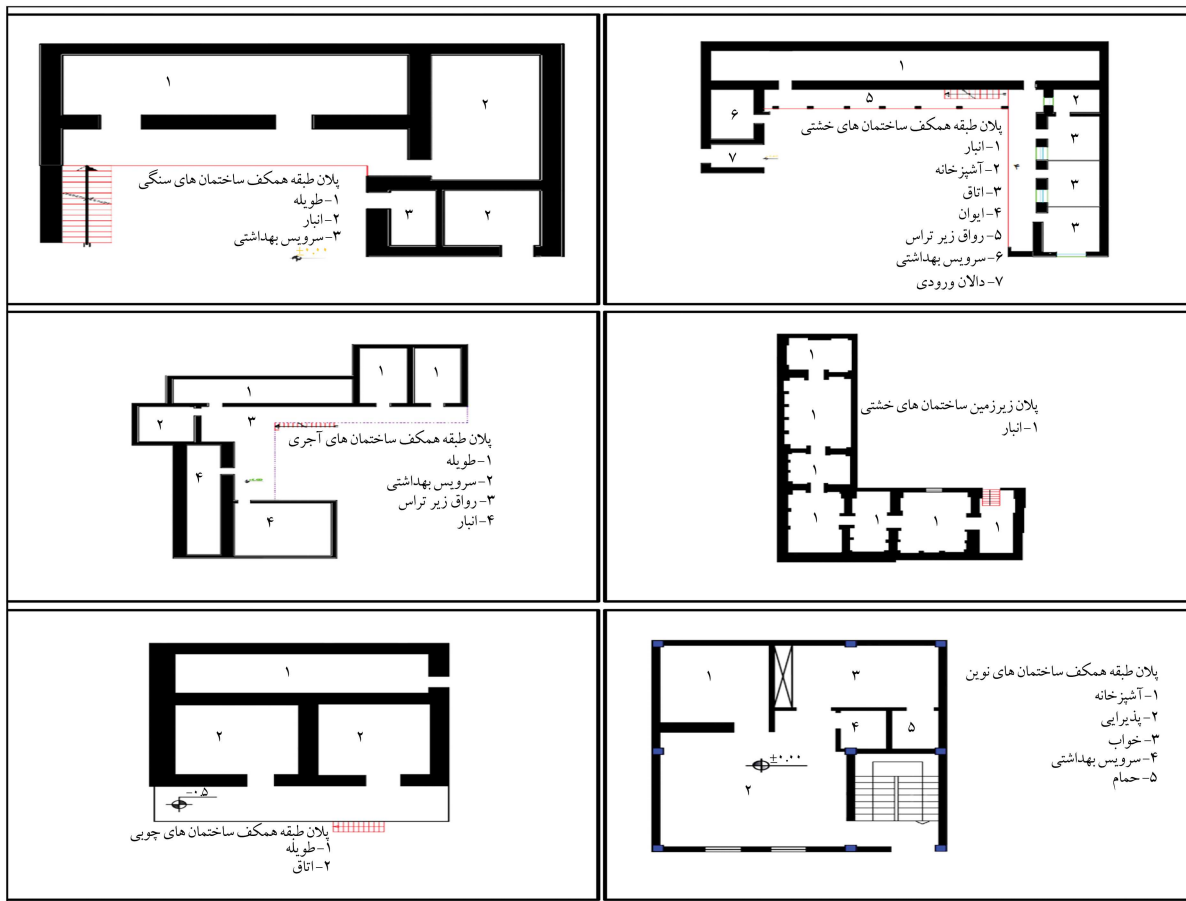
- tional Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), pp.451-460. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.05.005>.
5. Hosseinian, S. M., and Nezamoleslami, R., 2018. Water footprint and virtual water assessment in cement industry: A case study in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 172, pp.2454-2463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.164>.
 6. Nezamoleslami, R., and Hosseinian, S.M., 2020. An improved water footprint model of steel production concerning virtual water of personnel: The case of Iran. *Journal of environmental management*, 260, 110065. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110065>.
 7. Hosseinian, S.M., and Faghani, M. 2021. Assessing the effect of structural parameters and building site in achieving low carbon building materialization using a life-cycle assessment approach. *Journal of Building Engineering*, 44, 103318, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103318>.
 8. Saljoughinejad, S., and Sharifabad, S. R. 2015. Classification of climatic strategies, used in Iranian vernacular residences based on spatial constituent elements. *Building and Environment*, 92, pp.475-493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.005>.
 9. Obafemi, A. O., and Kurt, S., 2016. Environmental impacts of adobe as a building material: The north cyprus traditional building case. *Case Studies in Construction Materials*, 4, pp. 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.001>.
 10. Aram, R., and Alibaba, H.Z., 2018. Investigating sustainability of the traditional buildings in Kermanshah, Iran. *International Journal of Humanities, Arts and Social Sciences*, 4(6), 235-244. <http://dx.doi.org/10.20469/ijhss.4.10002-6>.
 11. Shahamat, H., 2014. Formal sustainability in traditional architecture of Iran according to five principles of traditional architecture of Iran. *Journal of applied environmental and biological sciences*, 4(1), 100-110.
 12. Aryanfar, Y., 2020. A review on the water sector in Iran: Current forecasts, scenario and sustainability issues. *Int J Progres Sci Technol*, 22, pp.13-8. <https://doi.org/10.52155/IJPSAT.V22.1.2011>.
 13. Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., and Bosman, R. 2018. The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water Resources and Industry*, 19, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>.
 14. Hosseinian, S. M, and Nezamoleslami, R., 2019., An Empirical Investigation Into water Footprint of Concrete Industry in Iran. In *Environmental Water Footprints*. Springer, Singapore, pp.47-75.
 15. McCormack, M., Treloar, G.J., Palmowski, L., and Crawford, R., 2007. Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research and Information*, 35(2), pp.156-162, <https://doi.org/10.1080/09613210601125383>.
 16. Crawford, R. H., and Pullen, S., 2011. Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. *Building Research and Information*, 39(6), pp.589-602. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.584212>.
 17. Crawford, R., and Treloar, G., 2005. An assessment of the energy and water embodied in commercial building construction. In *Australian Life Cycle Assessment Conference (4th: 2005: Novotel, Sydney, NSW) (pp.1-10)*. Australian Life Cycle Assessment Society.
 18. Bardhan, S., 2011. Assessment of water resource consumption in building construction in India. *WIT Trans. Ecol. Environ*, 144, pp.93-101. <http://dx.doi.org/10.2495/ECO110081>.
 19. Bardhan, S., 2015. Baseline studies on embodied water footprint of a RC frame constructed building in urban India *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(6), pp.171-4.
 20. Bardhan, S., and Choudhuri, I. R., 2016. Studies on virtual water content of urban buildings in India. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(6), 01-08. <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i6/87671>.
 21. Chang, Y., Huang, Z., Ries, R. J., and Masanet, E., 2016. The embodied air pollutant emissions and water footprints of buildings in China: A quantification using disaggregated input-output life cycle inventory model. *Journal of Cleaner Production*, 113, 274-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.014>.
 22. Meng, J., Chen, G.Q., Shao, L., Li, J.S., Tang, H.S., Hayat, T. and Alsaadi, F., 2013. Virtual water accounting for building: case study for E-town, Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 68, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.045>.
 23. Han, M. Y., Chen, G. Q., Meng, J., Wu, X. D., Alsaedi, A., and Ahmad, B., 2016. Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: a case in E-town, Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4691-4700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.048>.
 24. Rivero-Camacho, C., and Marrero, M., 2022. Water Footprint of the Life Cycle of Buildings: Case Study in Andalusia, Spain. In *Advances of Footprint Family for Sustainable Energy and Industrial Systems* (pp. 135-165). Springer, Cham. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-76441-8-7>.
 25. Hosseinian, S.M., and Ghahari, S.M., 2021. The relationship between structural parameters and water footprint of residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123562, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123562>.
 26. Heravi, G., and Abdolvand, M. M., 2019. Assessment of water consumption during production of material and construction phases of residential building projects. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101785. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101785>.
 27. Jerman, M., Palomar, I., Koci, V., and Cerny, R., 2019. Thermal and hygric properties of biomaterials suitable for interior thermal insulation systems in historical and traditional buildings. *Building and Environment*, 154, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.020>.
 28. Maleki, B.A., 2011. Traditional sustainable solutions in Iranian desert architecture to solve the energy problem. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 6, pp.84-91.
 29. Soflaee, F. and Shokouhian, M., 2005. Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran. In *International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*.
 30. International Organization for Standardization., 2006. ISO 14040. Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework. ISO.
 31. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Routledge.

32. Zhai, Y., Tan, X., Ma, X., An, M., Zhao, Q., Shen, X., and Hong, J., 2019. Water footprint analysis of wheat production. *Ecological Indicators*, 102, pp.95-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.036>.
33. National Iranian Diesel Company., 2021. Iran Transport and Energy Information. In: Persian. <http://www.ifco.ir/images/hamlonagh/untitled folder/untitled folder/TransportationBook.89.pdf>. (Accessed September 2021).
34. Spiess, W.E.L., 2014. Virtual Water and Water Footprint of Food Production and Processing.
35. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., and Mekonnen, M. M., 2009. Water footprint manual: State of the art. Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands, 255.
36. Williams, E., and Simmons, J.E., 2013. Water in the Energy Industry: An introduction. BP International Limited.
37. Mekonnen, M.M., Gerbens-Leenes, P.W., and Hoekstra, A.Y., 2015. The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1(3), pp.285-297. <https://doi.org/10.1039/C5EW00026B>.
38. Iran Center of Statistics., 2020. Information of Building Permits Issued by Municipalities of the Whole Country. In: Persian. <http://www.amar.org.ir/portals/0/News/1399/pars-99.pdf>. (Accessed September 2020).
39. Gu, Y., Xu, J., Keller, A.A., Yuan, D., Li, Y., Zhang, B. and Li, F., 2015. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: A case study in Eastern China. *Journal of Cleaner Production*, 92, pp.274-281.

پیوست

شکل ۱. میزان مصالح مصرفی در احداث ساختمان‌های بومی (ساختمان‌ها همه دو طبقه هستند).

ساختمان‌ها	خاک (m ³)			آجر فشاری (t)		الوار (m ³)		سنگ (t)		خشت (t)			
	پی	دیوار	سقف	ملات	سقف	دیوار	سقف	پی	دیوار	پی	دیوار	سقف	
Sto-۲۲۲	-	۱۴/۶	۸/۲	۳/۳	-	-	۱/۷	۸/۷	-	۲۰۴/۴	-	۵۲/۰	۴۵/۱
Sto-۴۳۲	-	۳۲/۹	۱۱/۲	۷/۴	-	-	۳/۴	۱۳/۷	-	۵۰۳/۸	-	۱۱۷/۶	۹۴/۱
Sto-۲۴۸	-	۱۸/۳	۱۷/۸	۴/۲	-	-	۱/۰	۱۱/۷	-	۲۸۷/۱	-	۶۵/۳	۵۷/۱
Sto-۳۲۵	-	۲۲/۳	۳۷/۳	۵/۲	-	-	۰/۹	۱۷/۵	-	۳۸۴/۹	-	۷۹/۵	۸۴/۲
Sto-۱۸۰	-	۱۲/۴	۶/۴	۲/۸	-	-	۱/۳	۷/۹	-	۱۷۰/۰	-	۴۴/۲	۳۶/۰
Sto-۲۶۰	-	۲۰/۴	۱۰/۴	۴/۴	-	-	۱/۸	۹/۹	-	۲۷۰/۰	-	۷۲/۹	۴۵/۳
Sto-۳۰۵	-	۲۱/۴	۲۱/۴	۵/۰	-	-	۳/۹	۱۲/۴	-	۳۵۷/۱	-	۷۶/۵	۷۵/۵
Sto-۲۴۷	-	۲۳/۶	۲۷/۸	۵/۵	-	-	۴/۹	۱۳/۶	-	۴۰۶/۰	-	۸۴/۴	۸۹/۹
Ad-۵۴۸	۱۲/۵	۱۱۳/۲	۲۴/۰	۹/۵	-	-	۱/۹	۱۷/۵	۴۲/۰	۱۳۱/۰	-	۴۰۴/۱	۷۲/۳
Ad-۲۴۵	۷/۱	۵۴/۲	۱۶/۹	۴/۸	-	-	۱/۷	۷/۴	۲۲/۱	۸۵/۲	-	۱۹۳/۷	۴۴/۹
Ad-۳۴۵	۹/۹	۸۷/۲	۲۴/۸	۷/۷	-	-	۲/۵	۱۵/۸	۳۵/۵	۱۲۰/۴	-	۳۱۱/۳	۴۱/۱
Ad-۴۷۸	۱۴/۴	۱۳۳/۳	۳۴/۰	۱۲/۱	-	-	۱/۸	۱۶/۷	۵۱/۲	۱۴۹/۷	-	۴۷۵/۹	۳۸/۵
Ad-۴۰۲	۱۰/۱	۸۵/۱	۲۴/۵	۸/۴	-	-	۲/۱	۱۳/۲	۳۵/۰	۱۱۲/۵	-	۳۰۳/۸	۵۹/۵
Ad-۲۱۹	۵/۱	۴۶/۱	۱۷/۷	۴/۹	-	-	۱/۵	۷/۸	۱۸/۱	۶۳/۶	-	۱۶۴/۷	۳۸/۲
Ad-۳۰۶	۸/۲	۷۸/۸	۲۰/۶	۷/۷	-	-	۲/۲	۱۶/۱	۲۷/۵	۱۱۰/۴	-	۲۸۱/۴	۳۷/۱
Ad-۴۳۳	۱۲/۱	۱۱۳/۷	۲۷/۵	۹/۰	-	-	۳/۳	۱۹/۰	۴۴/۷	۱۳۲/۷	-	۴۰۶/۱	۳۱/۱
Ad-۳۵۶	۳/۸	۵۲/۸	۲۱/۲	۷/۲	-	-	۹/۱	-	-	-	۲۳/۶	۳۲۹/۹	۱۳۴/۱
Ad-۴۲۴	۴/۸	۷۴/۳	۲۶/۲	۷/۸	-	-	۱۰/۲	-	-	-	۳۰/۴	۴۶۴/۳	۱۵۶/۱
Ad-۵۳۲	۵/۵	۶۲/۴	۳۱/۶	۶/۴	-	-	۱۵/۷	-	-	-	۳۴/۱	۲۹۰/۴	۱۹۶/۲
Ad-۶۶۵	۶/۸	۷۷/۴	۳۹/۴	۷/۷	-	-	۱۸/۵	-	-	-	۴۵/۲	۴۳۸/۸	۲۵۱/۲
Br-۳۷۲	۸/۱	۵/۵	۵/۱	۴/۲	۲۷۰/۸	۲۶/۸	۱/۶	۶/۶	۲۹/۶	-	-	۱۹/۸	۳۰/۳
Br-۵۷۳	۱۰/۱	۱۷/۲	۳۷/۶	۷/۲	۴۶۹/۲	۳۸/۷	۲/۸	۱۴/۳	۳۸/۸	-	-	۶۱/۵	۵۲/۹
Br-۱۸۸	۴/۰	۳/۱	۲/۹	۲/۵	۱۲۴/۸	۱۵/۴	۰/۸	۴/۱	۱۵/۲	-	-	۱۱/۰	۱۰/۲
Br-۲۴۷	۴/۶	۵/۴	۳/۷	۳/۱	۲۱۰/۵	۲۰/۰	۱/۶	۵/۰	۱۶/۸	-	-	۱۹/۳	۱۹/۸
Br-۳۰۱	۴/۹	۴/۲	۱۲/۳	۳/۲	۲۳۹/۵	۲۱/۷	۱/۲	۵/۴	۱۸/۱	-	-	۱۵/۰	۲۵/۴
Br-۴۷۱	۶/۷	۱۳/۱	۲۴/۰	۵/۶	۳۵۶/۹	۳۳/۲	۲/۲	۱۲/۵	۲۶/۰	-	-	۴۶/۹	۴۱/۹
Br-۲۰۱	۴/۷	۳/۸	۶/۸	۲/۵	۱۳۵/۲	۲۰/۷	۱/۰	۳/۳	۱۷/۹	-	-	۱۳/۵	۸/۳
Br-۲۷۶	۴/۲	۶/۲	۹/۱	۳/۵	۲۰۱/۰	۱۹/۰	۱/۲	۴/۶	۱۵/۲	-	-	۲۸/۵	۱۹/۲
Wo-۳۰۵	۴/۸	۲۳/۲	۱/۹	۱/۷	-	-	۳۱/۱	۳۱/۵	-	-	۲۲/۳	۸۹/۷	-
Wo-۲۶۲	۱/۶	۲۷/۸	۲/۳	۲/۳	-	-	۸/۱	۳۷/۴	-	-	-	۱۰۷/۳	-
Wo-۲۶۷	۳۶/۲	۱۲/۱	۱/۵	۳/۳	-	-	۲۵/۶	۱۰۸/۲	-	-	-	۴۸/۸	-
Wo-۲۱۰	۲/۰	۱۶/۶	۲/۱	۱/۴	-	-	۲۵/۱	۲۲/۴	-	-	-	۶۷/۱	-
Wo-۲۸۱	۵/۸	۳۰/۶	۲/۶	۲/۹	-	-	۱۱/۵	۴۳/۲	-	-	۲۸/۰	۱۱۸/۶	-
Wo-۲۲۲	۲۴/۳	۸/۳	۲/۹	۲/۲	-	-	۲۱/۱	۷۰/۲	-	-	-	۳۹/۸	-



شکل ۲. نمونه هایی از پلان طبقات همکف و زیرزمین در ساختمان های بومی و نوین (مقیاس ۱/۱۰۰)