دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران-گرایش محیط‌زیست

ارزیابی زیست‌محیطی بتن حاوی نانوسیلیس (به عنوان ماده سیمانی جایگزین) به روش LCA و مقایسه آن با بتن متعارف

Environmental Life Cycle Assessment of Concrete Containing Nano-Silica (as Supplementary Cementitious Materials) and Comparing with Typical Concrete

استاد راهنما: جناب دکتر محمدرضا صبور

استاد مشاور: جناب مهندس مرتضی نیکروان

دانشجو: مینا یکه‌لر ۸۸۰۱۱۹۴

مهر ۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

به پاس محبت‌های بی دریغ عزیزانم که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه به پدر، مادر و برادرم تقدیم می‌شود،

کسانی که در سایه امنشان نا امیدی به امید می‌گراید.

تشکر و قدردانی

ارتقای علم مرهون تلاش‌ها و زحمات افرادی است که دانش و تخصص خود را صمیمانه و بی‌دریغ به دیگران تقدیم می‌کنند. از این رو نگارنده بر خود می‌داند از همکاری صمیمانه، راهنمایی‌های گرانبها و پیگیری مداوم استاد گرانقدر **جناب دکتر محمد رضا صبور** و همچنین استاد راهنمای محترم **جناب مهندس مرتضی نیکروان** کمال قدردانی را داشته باشد.

همچنین جا دارد از **جناب مهندس مهدی قنبرزاده لک**، به دلیل تحلیل‌های کارشناسانه ایشان که راهگشای اینجانب بوده است، قدردانی نمایم.

و در پایان از **پدر، مادر و برادر عزیزم** که هر آنچه در زندگی دارم از سر محبت آنهاست بی‌نهایت سپاسگزارم.

اگر فضیلت دانشمندان کشف و تدوین قانونمندی‌های جهان محیط بر انسان و جوامع انسانی است، منزلت و وظیفه مهندسان، بکار گرفتن این قانونمندی‌ها برای تغییر و بهبود شرایط زیست و کار انسان و تلاش مستمر برای حل مشکلات جوامع انسانی می‌باشد و این تلاش است که حرکت جوامع انسانی را به سوی تعالی میسر می‌سازد .

با عنایت به این وظیفه سنگین، حال که این حرفه انسان محور را برگزیده‌ام، در مقام یک مهندس، آگاهانه سوگند یاد می‌کنم که در هر قدم و اقدام:

□ زمین را که زادگاه و گورگاه انسان‌ها و ولی نعمت آن‌هاست، فراموش نکرده و کاری انجام ندهم که ذره‌ای از امکانات آن بیهوده مصرف شود و خدشه‌ای به محیط‌زیست وارد آید.

□ میهنم، ایران را، لحظه‌ای از خاطر دور نداشته و حراست از فرهنگ، منابع مادی و معنوی آن و کوشش برای تأمین آبادانی، توسعه پایدار و سرافرازی آن را در همه ساحه‌ها سرلوحه کار خود قرار دهم.

□ شهروندان خود را، دلیل وجود خویش و حرفه خویش دانسته، خود را کارگزار امین و مورد اعتماد آن‌ها تلقی کرده و از منافع آنان چون مردمک چشم مراقبت کنم و در هیچ شرایطی از موازین شرف، منزلت انسانی و اخلاق حرفه‌ای عدول ننمایم و منافع جمع را بر منافع فردی خود مقدم بدارم.

□ برای این که با وجدانی آگاه قادر به انجام این وظایف باشم، لحظه‌ای از آموختن و آموزش دادن فروگذار نکنم.

باشد که با پایمردی و پایبندی به سوگند خویش بتوانم به عنوان حرفه‌مندی وظیفه‌شناس احساس غرور کنم.

مرحوم استاد دکتر مهدی قالیبافیان

چکیده

به هر میزان که مقاومت و دوام سازه‌های بتنی افزایش یابد، از یک سو شاهد کاهش مصرف انرژی و مواد خام بوده و از سوی دیگر افزایش عمر مفید سازه موجب کاهش حجم ضایعات ساختمانی در بازه‌های زمانی طولانی خواهد گردید. پوزولان‌ها از جمله موادی می‌باشند که با کاهش نفوذپذیری بتن، دوام آن را افزایش می‌دهند. در این میان نانوسیلیس یکی از متداول‌ترین موادی است که با توجه به خاصیت پوزولانی بالای آن باعث کاهش عیار سیمان و افزایش مقاومت و دوام بتن می‌شود. از آنجا که استفاده از نانوسیلیس در بتن در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است، لازم است تحقیقاتی در زمینه چرخه عمر بتن‌های حاوی نانوسیلیس صورت گیرد. در این مطالعه به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی بتن حاوی نانوسیلیس و مقایسه آن با بتن متعارف، از روش ارزیابی زیست‌محیطی چرخه عمر (LCA) استفاده شده است. در این روش ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم، متناسب با چرخه عمر محصولات از مرحله استخراج مواد خام تا مراحل تولید، استفاده و در نهایت دور ریز آن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی اقتصادی نیز با توجه به توصیه‌های ASTM جهت مدل کردن اثرات اقتصادی، از روش ارزیابی اقتصادی چرخه عمر (LCC) بهره گرفته شده است. در پایان نیز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADA) نتایج ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی به منظور نتیجه‌گیری نهایی با یکدیگر تلفیق می‌شوند.

نتایج حاصل از مطالعه اثرات زیست‌محیطی مصرف ۱/۵٪ نانوسیلیس جایگزین سیمان در بتن حاکی از کاهش اثرات سوء زیست‌محیطی در شاخص گرمایش جهانی و شاخص مصرف سوخت‌های فسیلی به ترتیب به میزان ۲۶/۰۵ و ۱۰/۸۸ درصد بود. بر اساس نتایج ارزیابی اقتصادی نیز، مصرف ۱/۵٪ نانوسیلیس در بتن، هزینه یک متر مکعب بتن در دوران بهره‌برداری ۵۰ ساله را به میزان ۱۰ درصد کاهش داد. نمرات حاصل از ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی نیز در سناریوی اول و دوم به ترتیب برابر ۵۲/۸ و ۴۷/۶ بدست آمد. بدین ترتیب با توجه به نتایج حاصل، مصرف نانوسیلیس با در نظر گرفتن توأم منافع فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی به عنوان جایگزین مواد سیمانی در بتن به تصمیم‌گیران صنعت ساختمان پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، بتن، نانوسیلیس، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه عمر، ارزیابی اقتصادی چرخه عمر، روش تصمیم‌گیری چند شاخصه

فهرست عناوین **صفحه**

فصل اول – مقدمه

۱.۱. پیشگفتار ۱
۲.۱. ساختار پایان‌نامه..... ۵

فصل دوم – مبانی تئوری و مروری بر کارهای انجام شده

۱.۲. نگاهی به صنعت ساختمان ۶
۱.۱.۲ . کلیات ۶
۲.۱.۲. اجزاء تشکیل دهنده بتن ۷
۱.۲.۱.۲. سیمان..... ۷
۲.۲.۱.۲. سنگدانه..... ۸
۳.۲.۱.۲. افزودنی‌ها..... ۹
۳.۲.۱.۲. آب..... ۹
۳.۱.۲. منابع استفاده از بتن در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی..... ۹
۴.۱.۲. چالش‌های مطرح در صنعت بتن ۱۲
۲.۲. نگاهی به صنعت سیمان ۱۵
۱.۲.۲. کلیات ۱۵
۲.۲.۲. روش‌های تولید سیمان ۱۵
۳.۲.۲. مواد اولیه و فرآیند تولید سیمان ۱۶
۴.۲.۲. آثار تولید سیمان بر محیط‌زیست ۱۷
۵.۲.۲. اثر گازهای گلخانه‌ای ۲۰
۳.۲. فناوری نانو در صنعت ساختمان ۲۱
۱.۳.۲. معرفی مقیاس نانو ۲۱
۲.۳.۲. ساختار و مفاهیم کلی نانو تکنولوژی ۲۱
۳.۳.۲. خواص نانوذرات ۲۲
۴.۳.۲. رویکردهای عمده در تولید نانوذرات ۲۳
۱.۴.۳.۲. چگالش گاز خنثی (IGC) ۲۳
۲.۴.۳.۲. فرآیندهای حالت جامد ۲۴
۳.۴.۳.۲. سنتز شیمیایی ۲۴
۵.۳.۲. فناوری نانو در بتن ۲۵

فهرست عناوین **صفحه**

۶.۳.۲. بتن حاوی نانو سیلیس ($Nano\text{-}SiO_2$) ۲۶
۷.۳.۲. موارد کاربرد بتن حاوی نانوسیلیس ۲۸
۴.۲. ارزیابی چرخه عمر LCA ۲۹
۱.۴.۲. کلیات ۲۹
۲.۴.۲. تعاریف ۲۹
۳.۴.۲. روش‌های ارزیابی چرخه عمر ۳۰
۴.۴.۲. مراحل چرخه عمر یک محصول ۳۲
۵.۴.۲. دستورالعمل‌های ارزیابی چرخه عمر یک محصول ۳۳
۱.۵.۴.۲. تعیین هدف، محدوده یا مرزهای سیستم و واحد عملکردی ۳۴
۲.۵.۴.۲. فهرست استخراج و انتشار ۳۵
۳.۵.۴.۲. ارزیابی اثرات ۳۵
۴.۵.۴.۲. تفسیر نتایج ۳۶
۶.۴.۲. کاربرد ارزیابی چرخه عمر و محدودیت‌های آن در زمینه فناوری نانو ۳۷
۵.۲. ارزیابی اقتصادی ۳۹
۶.۲. مروری بر مطالعات انجام گرفته ۴۰

فصل سوم – روش انجام تحقیق

۱.۳. مقدمه ۴۳
۲.۳. مراحل انجام ارزیابی LCA ۴۴
۱.۲.۳. تعریف اهداف و قلمرو مطالعات ۴۵
۲.۲.۳. تهیه فهرست چرخه عمر ۴۵
۳.۲.۳. ارزیابی آثار چرخه عمر ۴۷
۳. تفسیر نتایج ۵۱
۳.۳. ارزیابی اقتصادی ۵۲
۴.۳. ارزیابی تلفیقی اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی (نتیجه‌گیری) ۵۲
۵.۳. روش‌های برآورد انتشارات گازهای گلخانه‌ای از صنعت سیمان ۵۴
۱.۵.۳. روش آنالیز مستقیم از دودکش ۵۴
۲.۵.۳. روش محاسبات فرمولی هئیت بین المللی تغییر اقلیم (IPCC) ۵۵

فهرست عناوین **صفحه**

فصل چهارم – نتایج و تحلیل آن‌ها

۱.۴. مقدمه ۵۷
۲.۴. معرفی سناریوها و کاربرد روش ارزیابی چرخه عمر ۵۷
۳.۴. تولید سیمان: محاسبه انرژی مصرفی و انتشارات ناشی از تولید سیمان..... ۵۸
۱.۳.۴. برآورد میزان انتشارات ناشی از مصرف انرژی..... ۵۸
۲.۳.۴. برآورد انتشارات NO_x, CO, CO_2 به روش آنالیز مستقیم از دودکش ۵۹
۳.۳.۴. برآورد انتشار CO_2 به روش محاسبات فرمولی هئیت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) ۶۱
۴.۳.۴. برآورد میزان انتشارات ناشی از استخراج مواد اولیه ۶۲
۴.۴. تولید نانوسیلیس: محاسبه انرژی مصرفی و انتشارات ناشی از تولید نانوسیلیس ۶۳
۵.۴. سناریوی اول: ساخت بتن با سیمان پرتلند ۶۵
۶.۴. سناریوی دوم: ساخت بتن با سیمان پرتلند و نانوسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان ۶۶
۱.۶.۴. ارزیابی زیست‌محیطی در فرآیند تولید نانوسیلیس ۶۶
۲.۶.۴. تأثیر مصرف نانوسیلیس در کاهش میزان بتن مورد نیاز در طراحی ۶۸
۳.۶.۴. ارزیابی زیست‌محیطی بتن تولیدی در دوران بهره‌برداری و پایان عمر مفید سازه ۶۹
۷.۴. ارزیابی دو سناریوی محتمل به عنوان مطالعات موردی ۷۱
۱.۷.۴. مشخصات طرح و نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و دوام ۷۱
۲.۷.۴. مطالعه موردی سناریوی اول ۷۲
۳.۷.۴. مطالعه موردی سناریوی دوم ۷۵
۸.۴. جمع‌بندی و مقایسه ارزیابی زیست‌محیطی سناریوهای مورد مطالعه ۷۹
۹.۴. ارزیابی اقتصادی ۸۲
۱۰.۴. جمع‌بندی و مقایسه ارزیابی اقتصادی سناریوهای مورد مطالعه ۸۳
۱۱.۴. ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی و اقتصادی (نتیجه‌گیری) ۸۳
۱۲.۴. جمع‌بندی و مقایسه ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی و اقتصادی سناریوهای مورد مطالعه ۸۵

فصل پنجم – نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱.۵. مقدمه ۸۶

فهرست عناوین **صفحه**

۲.۵. نتیجه‌گیری ۸۶
۳.۵. پیشنهادات ۸۹

فهرست منابع و مراجع ۹۱

فهرست تصاویر **صفحه**

شکل ۱.۲: چرخه بتن مسلح از تولید تا تخریب..... ۱۳
شکل ۲.۲: خط تولید سیمان..... ۱۷
شکل ۳.۲: مراحل چرخه عمر یک محصول یا سیستم خدماتی ۳۳
شکل ۴.۲: مراحل یک ارزیابی چرخه عمر بر حسب ایزو ۱۴۰۴۰ ..... ۳۳
شکل ۱.۳: مراحل مختلف چرخه عمر ساختمان ۴۳
شکل ۲.۳: مرزها و ورودی/خروجی سیستم مورد مطالعه در ارزیابی زیست‌محیطی ۴۵
شکل ۳.۳. مقطع عرضی دودکش دایره‌ای تقسیم شده به ۱۲ نقطه عرضی ۵۴
شکل ۱.۴: مرزبندی مورد مطالعه در ارزیابی زیست‌محیطی سناریوی اول و دوم ۵۷
نمودار ۱.۴: مقاومت فشاری ۲۸ روزه در دو طرح اختلاط مورد مطالعه ۷۲
شکل ۲.۴: نمای شماتیک از یک تیر و ستون ۷۶
شکل ۳.۴: ابعاد مقاطع در سناریوی اول ۷۷
شکل ۴.۴: ابعاد مقاطع در سناریوی دوم ۷۷
نمودار ۲.۴: مقایسه ارزیابی زیست‌محیطی سناریو اول و دوم در شاخص گرمایش جهانی ۸۰
نمودار ۳.۴: مقایسه ارزیابی زیست‌محیطی سناریو اول و دوم در شاخص کاهش سوخت فسیلی ۸۰

فهرست جداول **صفحه**

جدول ۱.۲: اجزا تشکیل دهنده یک بتن متعارف ۷
جدول ۲.۲: آثار اجزا تشکیل دهنده بتن در مصرف انرژی و میزان انتشار گازها (٪) ۸
جدول ۳.۲: تأثیر حجم سیمان مصرفی در بتن بر روی آثار زیست محیطی تولید بتن ۸
جدول ۴.۲: انرژی مورد استفاده در استخراج شن (٪) ۹
جدول ۵.۲: انرژی مورد استفاده در تولید شن (٪) ۹
جدول ۶.۲: انرژی مورد نیاز برای تولید بتن ۱۰
جدول ۷.۲: فهرست عوارض زیست‌محیطی تولید هر تن سیمان ۱۷
جدول ۸.۲: انتشار CO_2 در فرآیند تولید سیمان ۱۹
جدول ۹.۲: عملکرد بتن حاوی نانوسیلیس در مقایسه با بتن معمول ۲۷
جدول ۱.۳: دسته‌های اثرات به همراه آلاینده‌های مربوطه و اثرات محتمل ۴۷
جدول ۲.۳: پتانسیل گرمایش جهانی جریان‌های مختلف ۴۹
جدول ۳.۳:توانایی در کاهش سوخت‌های فسیلی ۵۰
جدول ۴.۳:مقادیر ضرایب نرمال سازی اثرات مختلف زیست‌محیطی ۵۰
جدول ۵.۳: نتایج مطالعات دانشگاه هاروارد در مورد وزن‌دهی به اثرات زیست‌محیطی در حال و آینده ۵۱
جدول ۱.۴: انتشارات ناشی از انرژی الکتریکی مصرفی در تولید سیمان ۵۹
جدول ۲.۴: انتشارات ناشی از انرژی حرارتی مصرفی در تولید سیمان ۵۹
جدول ۳.۴: آنالیز گاز خروجی از دودکش ۶۰
جدول ۴.۴: آنالیز ترکیبات سیمان (٪) ۶۳
جدول۵.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازای استخراج و حمل مواد اولیه ۶۳
جدول ۶.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازاء سیمان تولیدی به روش آنالیز مستقیم ۶۳
جدول ۷.۴: آثار زیست‌محیطی تولید نانوسیلیس در شرکت اکزو نوبل ۶۴
جدول۸.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازاء تولید یک تن نانوسیلیس (kg) ۶۵
جدول ۹.۴: میزان انرژی مصرفی به ازاء تولید C تن سیمان ۶۵
جدول ۱۰.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازاء C تن سیمان (kg) ۶۵
جدول ۱۱.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازاء حمل سیمان به کارخانه بتن (kg) ۶۵
جدول ۱۲.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای به ازاء تولید و حمل C تن سیمان (kg) ۶۶
جدول ۱۳.۴: میزان انرژی مصرفی در دوره ۵۰ ساله بهره‌برداری در سناریوی اول ۶۶
جدول ۱۴.۴: میزان انتشارات در دوره ۵۰ ساله بهره‌برداری در سناریوی اول ۶۶

فهرست جداول **صفحه**

جدول ۱۵.۴: مطالعات انجام شده در زمینه میزان مصرف نانوسیلیس در بتن و اثر آن در رفتار بتن ۶۷
جدول ۱۶.۴: میزان انرژی مصرفی با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید ۶۸
جدول ۱۷.۴: میزان انتشارات با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید (kg) ۶۸
جدول ۱۸.۴: میزان انرژی مصرفی با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید و طراحی ۶۹
جدول ۱۹.۴: میزان انتشارات با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید و طراحی..... ۶۹
جدول ۲۰.۴: میزان انرژی مصرفی با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید، طراحی و بهره‌برداری .. ۷۰
جدول ۲۱.۴: میزان انتشارات با جایگزینی x درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید، طراحی و بهره‌برداری ۷۰
جدول ۲۲.۴: طرح اختلاط‌های مورد استفاده در دو سناریو ۷۱
جدول ۲۳.۴: نتایج آزمایش نفوذ یون کلر و مقادیر عمر مفید سازه متناظر با هر یک از مخلوط‌های بتنی ۷۲
جدول ۲۴.۴: میزان انرژی مصرفی در سال مبدأ در سناریوی اول ۷۳
جدول ۲۵.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در سال مبدأ در سناریوی اول ۷۳
جدول ۲۶.۴: میزان انرژی مصرفی در یک دوره ۵۰ ساله در سناریوی اول ۷۴
جدول ۲۷.۴: میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در سناریوی اول ۷۴
جدول ۲۸.۴: میزان انرژی مصرفی در فرآیند تولید در سال مبدأ در سناریوی دوم ۷۵
جدول ۲۹.۴: میزان انتشارات در فرآیند تولید در سال مبدأ در سناریوی دوم ۷۵
جدول ۳۰.۴: نتایج حاصل از تحلیل قاب با استفاده از نرم افزار ETABS ۷۶
جدول ۳۱.۴: میزان انرژی مصرفی با جایگزینی ۱/۵ درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید و طراحی ۷۷
جدول ۳۲.۴: میزان انتشارات با جایگزینی ۱/۵ درصد نانوسیلیس در فرآیند تولید و طراحی ۷۸
جدول ۳۳.۴: میزان انرژی مصرفی در فرآیند تولید، طراحی و بهره‌برداری در سناریوی دوم ۷۸
جدول ۳۴.۴: میزان انتشارات در فرآیند تولید، طراحی و بهره‌برداری ۷۸
جدول ۳۵.۴: مقایسه اثرات زیست‌محیطی در سناریوی اول و دوم ۷۹
جدول۳۶.۴: قیمت واحد اجزاء موجود در عمر سازه ۸۲
جدول۳۷.۴: نتایج ارزیابی اقتصادی سناریوها ۸۴

فصل اول

مقدمه

۱.۱. پیشگفتار

در اواخر قرن بیستم میلادی بر اثر توسعه سریع صنعت و رشد تصاعدی گستره ساخت و ساز، به تدریج تبعات دخالت‌های بی حد و مرز انسان در محیط‌زیست، به صورت تغییرات غیر متعارف در آب و هوای مناطق مختلف، گرم و آلوده شدن هوا، تغییر در میزان بارندگی و گسترش مناطق بیابانی، آلوده شدن آب رودخانه‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و در نتیجه شور و غیر قابل استفاده شدن منابع آب شیرین ساحلی، افزایش سوانح طبیعی همچون سیل و طوفان و گردباد و در نهایت روند سریع از دست رفتن تنوع زیستی، نمایان گردید [۱].

متعاقب آن تلاش برای حفظ شرایط زندگی بر روی کره زمین آغاز گردید. در راستای این تلاش‌ها، مفهوم "توسعه پایدار[1]" از سوی کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه[2] به معنای برآورده کردن احتیاجات نسل حاضر بدون وارد ساختن لطمه به توانایی‌های نسل آتی در تأمین نیازهای خود، مورد توجه قرار گرفت [۲]. توسعه پایدار نیازمند مدیریتی برنامه‌ریزی شده به منظور بهره‌برداری از منابع طبیعی با هدف جلوگیری از آلودگی، تخریب و استثمار منابع، به گونه‌ای است که استفاده از منابع قابلِ تجدید بیش از نرخ تجدید شدن آن نباشد.

روند رو به رشد ساختمان‌سازی کشور و مصرف بالای انرژی در این بخش از یک سو و اهمیت موضوع محیط‌زیست و توسعه پایدار و نقش اساسی مصالح ساختمانی در این زمینه از دیگر سو، ضرورت تأمل بیش از پیش در انتخاب مصالح ساختمانی مناسب را یادآور می‌شود.

اثرات زیست‌محیطی از جمله گرم شدن جهانی هوا، آلودگی آب‌ها و کاهش منابع طبیعی اثرات مهم اقتصادی نیز محسوب می‌شوند. بنابراین هزینه واقعی مصالح ساختمانی چیزی جزء آن است که در بازار خرید و فروش می‌شود، چرا که هزینه مقابله با اثرات زیست‌محیطی فوق‌الذکر در بهای آن‌ها در نظر گرفته نشده است. حتی اگر امروزه حکم و دستوری مبنی بر پرداخت هزینه به علت اثرات منفی زیست‌محیطی (آلودگی هوا، آب و خاک) وجود داشته باشد، تعیین هزینه پرداختی برای این اثرات به آسانی امکان‌پذیر نخواهد بود. چگونه می‌توان برای آب و یا هوای پاک ارزشی تعیین کرد؟ و یا ارزش سلامتی انسان چقدر است؟ جوامع مختلف دهه‌های زیادی بر روی این موضوعات بحث و مجادله کرده‌اند و این گونه که به نظر می‌رسد به تفاهمی نرسیده‌اند.

اما در هر حال، نتایج چنین ملاحظاتی ظهور نگرشی بود که به موجب آن در یک جامعه مدرن، طبیعت نیز یک فاکتور اصلی در تولید محسوب شود. تا جایی که در آن انتخاب مصالح با در نظر گرفتن سازگاری با

[1] Sustainable Development
[2] World Commission on Environment and Development

محیط‌زیست صورت بگیرد و روند تصمیم‌گیری‌های گذشته که بر اساس نگرش کوتاه مدت و اهداف محدود و بدون در نظر گرفتن تمام پیامدهای استفاده از تکنولوژی سرمایه‌گذاری شده بود، بهبود یابد.

هم اکنون نیز تحقیقاتی وسیع در خصوص بهبود هر چه بیشتر خواص بتن از دیدگاه زیست‌محیطی در کشورهای مختلف جهان در حال انجام می‌باشد. از آنجا که ایران کشوری در حال توسعه است، اجرای پروژه‌های متعدد عمرانی امری اجتناب‌ناپذیر بوده که بدون شک بتن به عنوان یکی از اساسی‌ترین مصالح ساختمانی در این پروژه‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از این رو لازم است مطالعات گسترده‌ای در راستای هر چه سازگارتر نمودن این مصالح با محیط‌زیست انجام شود.

اولین قدم برای ارزیابی زیست‌محیطی هر صنعت، شناخت مناسب عوارض آن صنعت می‌باشد. از جمله مهم‌ترین عوارض زیست‌محیطی صنعت بتن مربوط به تولید سیمان می‌باشد. کارخانه‌های سیمان از انتشار دهندگان عمده CO_2 محسوب می‌شوند. به ازاء هر تن سیمان تولیدی حدود یک تن گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. با توجه به میزان سیمان تولید شده در جهان، سهم صنعت سیمان در متصاعد نمودن گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، در حدود ۷ درصد می‌باشد [۲]. گازهای گلخانه‌ای به عنوان مهم‌ترین عامل گرم شدن زمین شناخته شده‌اند. از سوی دیگر برای تولید یک تن سیمان لازم است تقریباً ۱/۶ تن مواد خام طبیعی به مصرف برسد. میزان دقیق مصرف انرژی برای تولید سیمان نیز به پارامترهای متعددی نظیر نوع فرآیند تولید، نوع سوخت و عوامل متعدد دیگری بستگی دارد. علاوه بر این در اثر تولید هر تن سیمان، ۳ کیلوگرم اکسیدهای نیتروژن و ۰/۴ کیلوگرم ذرات معلق تولید می‌گردد که آثار مخرب زیست‌محیطی این مواد نیز کاملاً آشکار است [۲].

از سوی دیگر در صنعت بتن، کاهش عیار سیمان و افزایش دوام دو موضوع اساسی است که از سرفصل‌های مهم بحث "بتن و توسعه پایدار" تلقی می‌گردد [۲]. با نگاه دقیق‌تر به آثار مخرب زیست‌محیطی تولید سیمان به راحتی می‌توان مزایای ناشی از کاهش تولید آن را ارزیابی نمود. افزایش دوام موضوعی است که امروزه در ارزیابی‌های زیست‌محیطی نقش مهمی را ایفا می‌نماید. به هر میزان که مقاومت و دوام سازه‌های بتنی افزایش یابد، از یک سو مصرف مواد خام و منابع طبیعی کاهش خواهد یافت و از سوی دیگر سبب کاهش حجم نخاله‌ها و ضایعات ساختمانی در بازه‌های زمانی طولانی خواهد گردید. دلیل این امر واضح است چرا که پس از سپری شدن عمر مفید سازه نیاز به تخریب و نوسازی مجدد آن می‌باشد و لذا حجم مصالح تخریب شده به عنوان پارامتری که باید به چگونگی دفع آن اندیشید، خود چالشی زیست‌محیطی می‌باشد. علاوه بر این، نوسازی سازه نیز مستلزم تولید مجدد مصالحی از جمله سیمان خواهد بود.

بنابراین یکی از مهم‌ترین راهکارهای تقویت جنبه‌های مثبت زیست‌محیطی بتن، تلاش به منظور دستیابی به طرح اختلاط بتنی است که با کمترین میزان سیمان قادر به ارضای الزامات مورد نیاز به ویژه مقاومت و دوام باشند. در این راستا هم اکنون تحقیقات وسیعی در خصوص بهبود هر چه بیشتر خواص بتن از دیدگاه زیست‌محیطی در کشورهای مختلف جهان در حال انجام است. یکی از بهترین راهکارها، یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان مصرفی در بتن است.

در این میان، پوزولان‌ها که از دیر باز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توانند مشکلات مربوط به محدودیت تولید را تا حد زیادی حل نمایند. این مواد که به صورت طبیعی و مصنوعی قابل حصول می‌باشند، توانسته‌اند با جایگزینی با سیمان ضمن صرفه‌جویی در سوخت مورد نیاز برای تولید سیمان و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، در خواص بتن نیز مؤثر بوده و مقاومت و دوام آن‌ها را به ویژه در محیط خورنده افزایش دهند.

از سوی دیگر، با ظهور فناوری نانو در سال‌های اخیر، تلاشی گسترده برای استفاده از نانو ذرات در بتن انجام شده است تا با استفاده از آن بتوان در جهت کاهش عیار سیمان در بتن گام مؤثری برداشت. در این میان نانوسیلیس به عنوان یکی از مهم‌ترین نانوذرات با خاصیت پوزولانی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج چنین مطالعاتی بهبود چشمگیر خصوصیات مقاومتی و دوام بتن بوده که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

در کنار بهبود مشخصات فنی بتن حاوی نانوسیلیس در مقایسه با بتن‌های متعارف[1] ساخته شده از سیمان پرتلند، اظهار نظراتی در ارتباط با کاهش آثار زیست‌محیطی تولید بتن حاوی این نانوذرات، به دلیل افزایش مقاومت و دوام چنین بتنی از یک سو و کاهش نیاز به تولید و مصرف سیمان از سوی دیگر، شده است [۱۳]. اما زمانی می‌توان ادعا کرد که مصرف نانوسیلیس در بتن نقشی مؤثر در کاهش اثرات سوء زیست‌محیطی داشته و مصرف آن را در مقیاس انبوه توصیه کرد که کمیت و کیفیت عملکرد زیست‌محیطی، با در نظر گرفتن فرآیند تولید نانوسیلیس مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت بهبود عملکرد زیست‌محیطی حاصل قابل توجه باشد، چرا که فرض بر این است که خطرات سمی بالقوه، امری است که توسط سایر مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی جبران نمی‌شود [۲۴]. هدف این مطالعه نیز مقایسه ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی بتن‌های متعارف و بتن‌های حاوی نانوذرات سیلیس به عنوان جایگزین بخشی از مواد سیمانی در بتن، قرار داده شده است.

[1] Typical Concrete

روش انتخاب شده جهت انجام ارزیابی زیست‌محیطی مصرف نانوسیلیس در بتن، روش ارزیابی زیست‌محیطی چرخه عمر (LCA[1]) می‌باشد که از مبانی مهندسی شیمی و آنالیز جرم و انرژی محسوب می‌گردد. این روش امروزه به عنوان یک روش استاندارد بین‌المللی که قادر است ورودی‌ها و خروجی‌های بالادستی و پایین‌دستی یک سیستم را متناسب با چرخه عمر محصولات یا فرآیندها مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد [۲۶]، مورد توجه متخصصان زیست‌محیطی قرار گرفته است. در ارزیابی‌های مبتنی بر چرخه عمر، تمام چرخه عمر یک محصول از مرحله استخراج مواد خام اولیه تا مراحل تولید، استفاده و در نهایت دور ریز آن مد نظر بوده و آثار سوء بالقوه متناسب با این مراحل، به صورت کمی بیان می‌گردد.

بعلاوه در کنار ارزیابی‌های زیست‌محیطی، معمولاً یک ارزیابی اقتصادی نیز هر چند به صورت اجمالی انجام می‌شود. روش انتخاب شده جهت انجام ارزیابی اثرات اقتصادی، روش ارزیابی اقتصادی چرخه عمر (LCC[2]) می‌باشد. در این روش کل هزینه‌ها در چرخه عمر محصول به سال مبدأ تبدیل شده و با هم جمع می‌شوند تا نتیجه به عنوان معیار اقتصادی در نظر گرفته شود.

در این مطالعه ابتدا آثار زیست‌محیطی تولید و مصرف بتن و استفاده از فناوری نانو در این صنعت مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از روش‌های LCA و LCC به ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی و همچنین ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی کاربرد نانوسیلیس در بتن پرداخته خواهد شد. در پایان نیز نتایج حاصل، با ارزیابی‌های مشابه در مورد بتن‌های متعارف مقایسه خواهند شد.

[1] Life Cycle Assessment
[2] Life Cycle Cost

۲.۱. ساختار پایان‌نامه

پس از ذکر مقدمه‌ای کلی در ارتباط با مطالعه صورت گرفته، شرح مختصری از بخش‌های اصلی پایان‌نامه داده می‌شود. پایان‌نامه حاضر در پنج فصل تنظیم و ارائه شده است:

در فصل اول چنانچه از نظر گذشت به کلیاتی پیرامون موضوع پایان‌نامه، اهمیت و لزوم آن پرداخته شد.

فصل دوم تحت عنوان "مبانی تئوری و مروری بر مطالعات انجام شده"، شامل اطلاعاتی تئوری در رابطه با پژوهش صورت گرفته و همچنین توضیحاتی در زمینه پیشینه کارهای تحقیقاتی انجام گرفته و یا پژوهش‌های در حال انجام در سطح جهان، در ارتباط با موضوع مورد مطالعه می‌باشد.

فصل سوم به تشریح روش ارزیابی چرخه عمر، روش ارزیابی اقتصادی و روش ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی-اقتصادی پرداخته خواهد شد. در ادامه نیز به روش‌های مورد استفاده در محاسبه گازهای گلخانه‌ای و انرژی مصرفی به عنوان دسته آثار جهانی در ارزیابی چرخه عمر بتن اشاره خواهد شد.

در فصل چهارم که بخش اصلی این پژوهش را در بر می‌گیرد، اطلاعات بدست آمده گردآوری شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند و به داده‌های قابل تحلیل تبدیل می‌گردند. چگونگی ارتباط نتایج بدست آمده و تفسیر هرکدام از آن‌ها، به همراه بررسی میزان تغییر در میزان عوارض زیست‌محیطی در این فصل خواهد آمد.

در فصل پنجم به نتیجه‌گیری از یافته‌های اصلی پژوهش پرداخته خواهد شد. در ادامه نیز به منظور تکمیل و توسعه پژوهش حاضر پیشنهاداتی ارائه می‌گردد. این پیشنهادات در راستای برنامه‌ریزی و هدف‌گذاری دقیق‌تر در مطالعات آتی عنوان می‌گردد.

به عنوان بخش پایانی نیز فهرست منابع و مراجع مورد استفاده آورده شده است.

فصل دوم

مبانی تئوری و مروری بر کارهای انجام‌شده