

EXTENDED ABSTRACT

Service Life Prediction and Life Cycle Assessment of Pozzolanic Concretes

Shahrokh Shoaie^a, Armaghan Shoaie^b, Ali Danandeh Mehr^{c,*}

^a Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tabriz Branch, Iran & Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Iran

^b Architecture and Art Faculty, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Iran

^c Civil Engineering Department, Antalya Bilim University, Turkey

Received: 28 March 2024; **Reviewed:** 15 April 2024; **Accepted:** 29 April 2024

Keywords:

Concrete, Pozzolans, Environment, Life cycle, Service life.

1. Introduction

Due to the increase in urbanization and the rapid growth of the construction industry around the world, cement has become one of the most widely used construction materials. It has been widely reported that the production and consumption of Portland cement is one of the main factors of global warming and greenhouse gas emissions. Recent studies have shown that cement production is responsible for 12-15% of total energy consumption in industry and approximately 5% of carbon dioxide emissions from human activity. The Portland Cement Association showed that the production of one ton of cement produces 0.9 tons of carbon dioxide gas. Reducing the harmful effects of rapid consumption of cement, which has an adverse effect on global warming, is an alarming concern.

In a study conducted by Pakmezgi et al (2004), the effects of pozzolan on the properties of concrete with different types and volumes of pozzolan were investigated. In this study, the effect of a natural pozzolan on concrete properties was investigated. For this purpose, concrete mix was produced in three series with control mixes with cement content of 300, 350 and 400kg. These control mixes were modified to have a combination of 250, 300 and 350 kg of cement and 40, 50, 75 and 100kg of pozzolan for 1 cubic meter of concrete. Pozzolan efficiency was obtained by using Bloomy and Fert resistance equations on 28-day concretes. The maximum amount of pozzolan with optimal efficiency was determined. This study shows that the efficiency obtained from each resistance equation is similar and these values decrease with increasing pozzolan-cement ratio.

2. Methodology

2.1. Experimental study

In this research, three types of pozzolans, including slag, fly ash, and silica fume, have been investigated as a partial replacement of cement. In terms of different weight percentages of these materials, four separate designs of concrete mix and a basic design without the use of concrete additives have been defined. Then, the service life and the life cycle of the produced concrete slab and wall have been evaluated using the life-365 model. In this section, the pozzolanic materials used are explained first, then the different designs of the

concrete mix are introduced. In the end, the technical and environmental basics related to the life cycle assessment model are examined.

In this research, to achieve the optimal mixing plan, four concrete mixtures have been tested. The first mixing plan is related to the weights of fly ash and slag 20 and silica fume 10kg/m³. This mixing scheme has the lowest weight percentage for using pozzolanic materials (i.e. 12.5%). The second mixing plan is related to the weights of fly ash and slag equal to 40kg/m³ and silica fume 20kg/m³. In this design, pozzolanic materials account for a total of 25% of the weight of cement. Mixing plan number 3 is related to the weights of fly ash 20, slag 80 and silica fume 60kg/m³, which in total, pozzolanic materials in this plan account for 40% of the weight of cement. In the fourth mixing plan, fly ash is not used. The weight of slag is 100 and silica fume is 60kg/m³, and in total, pozzolanic materials account for 40% of the weight of cement used in this project. In all these plans, 900kg/m³ of sand and 1000kg/m³ of coarse stone materials with a diameter of 5-10mm have been used. The water used is drinking water and its amount is 160kg/m³.

3. Results and discussion

The results show that when these amounts are used as additives in concrete, in the first mixing plan, it shows a very low percentage of materials for environmentally friendly conditions (8.5%). When these values are used as additives in concrete, according to Table 2, it shows a better ratio than the first mixing of materials for environmentally friendly conditions (17%). With changes in the amount of fly ash and on the one hand the decrease of this amount and the increase of other compounds it was observed that the environmental parameters are up to 2 times higher than when more cement is used and on the other hand with the decrease of the amount of fly ash this percentage It has improved and advanced to 34%. The fourth mixing plan has resulted in an excellent improvement of 35.9% in environmental conditions.

Fig. 2 summarizes the concrete life prediction results for the four designs compared to the base design. This figure shows that the useful life of the concrete slab of the basic plan, which does not add any additives to the concrete, is equal to 11.9 years. Also, in the first design, the useful life of concrete is about 16 years, which is almost 1.34 times the useful life of the base. Also, these data showed that the life of the concrete made in the second design is about 23.5 years, which shows an almost 2-fold increase in useful life, which is a better growth compared to the initial mixing design.

Using the results, the balance of useful life for mixing plans 1 to 4 will be equal to 1.34, 2.0, 8.91 and 8.45, respectively. Therefore, plans 3 and 4 have higher efficiency in terms of increasing the useful life of concrete. On the other hand, considering the figures obtained from the calculation of the potential of reducing harmful environmental effects, the fourth mixing plan is introduced as the optimal plan of this research. In this plan, the amount of slag is about 100 kg per cubic meter and silica fume is about 60kg. Due to the limitation in the percentage of additives, ash was not used instead of cement (about 40%).

4. Conclusions

The results of this research show that by replacing slag additives, fly ash, and silica fume as a part of the cement used in reinforced concrete structures, not only will there be a significant increase in the useful life of concrete, but also by reducing the amount of cement. Carbon footprint is also reduced and the compatibility of concrete with the environment increases. The results of the first and second mixing plans showed that by doubling the materials compared to the initial mixing, the life and environmental compatibility of concrete is almost doubled. The results of the third and fourth mixings showed that this diagram is not linear with the increase in the number of additives, and with the increase in the amount of fly ash, although the life of the concrete increases, on the other hand, the environmental percentage of the concrete does not increase much, and it advances to almost 34%. slow the experiments of the third mixing showed that with the increase in the amount of silica ash in the concrete sample and the decrease in slag, the life of the concrete increases, but on the other hand, it reduces the compatibility with the environment. For example, when fly ash accounts for 5% of the weight of cement, silica fume is 15%, and slag is 20% of the weight of cement, although the life of concrete increases to 106 years, on the other hand, its compatibility with the environment increases to 2.33. The percentage reaches or when the amount of fly ash reaches 10%, silica fume 10%, and slag reaches 20% of the weight of cement, the life of concrete will reach 65 years, and on the other hand, its compatibility with the environment will decrease to 30%. This data shows that the increase in fly ash is not always the reason for the high life of concrete, but silica fumes in its highest amount, i.e. 15%, has the best answer for increasing the life and compatibility with the environment. which was clear in the fourth mixing. The fourth mixing showed that by removing fly ash and increasing the amount of soot and slag by 40% of cement weight, it has provided the best performance in terms of compatibility with the environment and resistance. The table shows that by mixing plan 4, it is possible to achieve 35.9% productivity in environmental systems. Therefore, it can be

definitively concluded that if the amount of carbon black is 15% and slag is 25%, the permeability can be reduced and the life of concrete can be increased in chlorine corrosive environments, and as a result, chlorine ions can be prevented from reaching the rebar surface in a large amount.

پیش‌بینی طول عمر مفید و ارزیابی چرخه حیات بتن‌های پوزولانی

شاهرخ شعاعی¹، ارمان شعاعی²، علی داندنهمهر^{3*}

¹ مربی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور تبریز و مدرس گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

² دانشجوی کارشناسی ارشد فن‌آوری معماری- معماری دیجیتال، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز

³ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و علوم طبیعی، دانشگاه آنتالیا بیلیم، آنتالیا، ترکیه

دریافت: 1403/1/9، بازنگری: 1403/1/27، پذیرش: 1403/2/10، نشر آنلاین: 1403/2/10

چکیده

امروزه، الزامات مربوط به حفظ محیط‌زیست و میل به توسعه پایدار سبب شده است تا اغلب محققین علوم مواد، شیمی و محیط‌زیست و همچنین مهندسان عمران و معماری درصدد باشند تا در ساخت بتن و سازه‌های بتنی از مواد پسماندی استفاده کنند. یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی سازه‌های بتنی مصرف سیمان می‌باشد. افزایش دمای کره زمین و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، محققان را بر آن داشته تا به‌منظور کاهش سمیان مصرفی و ردپای کربن ناشی از تولید بتن، از پرکننده‌ها و افزودنی‌های بتن با استفاده از مواد جدید نظیر پلیمرها و یا پوزولان‌ها، به‌عنوان گزینه زیست‌محیطی اقدام نمایند. هدف اصلی این مقاله معرفی بتن دوستدار محیط زیست با استفاده از پوزولان‌ها (سرباره، دوده سیلیس و خاکستر بادی) می‌باشد. بدین‌منظور، آزمایش‌های متفاوتی با چهار طرح اختلاط متفاوت انجام گرفت و پارامترهای گوناگونی از جمله طول عمر مفید بتن و سازگاری با محیط‌زیست با استفاده از نرم‌افزار Life-365 محاسبه گردید. نتایج حاکی از آن است که استفاده از پوزولان‌ها اگر به‌مقدار 40% وزن سیمان باشد به‌طوری که مقدار دوده 15% و سرباره 25% باشد، بهترین عملکرد را از نظر سازگاری با محیط زیست خواهد داشت. در این صورت نفوذپذیری کاهش و طول عمر بتن در محیط‌های خورنده کلراید افزایش یافته و در نتیجه از رسیدن یون کلر به سطح میلگرد به‌مقدار زیادی جلوگیری می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بتن، پوزولان‌ها، محیط زیست، چرخه حیات، عمر مفید.

1- مقدمه

سیمان که تأثیر نامطلوبی بر اقلیم دارد، یک نگرانی هشداردهنده است (Benhelal و همکاران، 2013).

پوزولان‌ها خواص مهندسی بلندمدت بتن را به‌دلیل مصرف هیدروکسید کلسیم و در نتیجه تشکیل ژل‌های کلسیم- سیلیکات- هیدرات در ماتریس سیمان افزایش می‌دهد (Ince و همکاران، 2015).

این مواد با منشاء طبیعی یا مصنوعی هستند که به خودی خود سیمانی نیستند، اما به‌دلیل ترکیب آلومینوسیلیسی که با هیدرات آهک مخلوط می‌شوند، سیمان هیدرولیکی را تشکیل می‌دهند. واکنش پوزولان با آهک موجود در سیمان در طی فرآیند هیدراتاسیون، برخی از خواص سیمان و بتن حاصل را تغییر می‌دهد. استفاده از پوزولان در 20 درصد وزن سیمان بیشترین

با توجه به افزایش شهرنشینی و رشد سریع صنعت ساخت- و ساز در سراسر جهان، سیمان به یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی تبدیل شده است (Lgo و همکاران، 2022). به‌طور گسترده گزارش شده است که تولید و مصرف سیمان پرتلند یکی از عوامل اصلی گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مطالعات اخیر نشان داده است که تولید سیمان مسئول 12 تا 15 درصد کل مصرف انرژی در صنعت و تقریباً 5 درصد از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از فعالیت انسان است. انجمن سیمان پرتلند نشان داد که تولید یک تن سیمان منجر به تولید 0/9 تن گاز دی‌اکسیدکربن می‌شود. اثرات مضر مصرف



حجم زیاد خاکستر بادی کم کلسیم و سرباره کوره بلند دانه بندی شده نیز برای مقاصد مقایسه تهیه شد. علاوه بر این، مخلوط بتن سیمان پرتلند معمولی به عنوان مرجع تهیه شد. درصد مواد پوزولانی مورد نیاز برای یک مخلوط بتن با اسلامپ معین، محتوای هوا، زمان گیرش، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در مخلوطها تعیین گردید. نتایج حاکی از آن بود که مخلوطهای بتن پوزولان طبیعی با حجم بالا مورد مطالعه برای کاربردهای سازه‌ای با مقاومت فشاری 3 روزه 12 تا 14 مگاپاسکال و 28 روزه 29 تا 38 مگاپاسکال مناسب هستند.

در مطالعه‌ای که Akyüz و Pekmezci (2004) انجام داده‌اند اثرات پوزولان بر خواص بتن با نوع و حجم پوزولان متفاوت بررسی گردید. در این مطالعه، اثر یک پوزولان طبیعی بر خواص بتن بررسی شد. بدین منظور مخلوط بتن در سه سری با مخلوطهای کنترلی با محتوای سیمان 300، 350 و 400 کیلوگرم تولید شد. این مخلوطهای کنترل به گونه‌ای اصلاح شدند که ترکیبی از 250، 300 و 350 کیلوگرم سیمان و 40، 50، 75 و 100 کیلوگرم پوزولان برای یک مترمکعب بتن داشته باشند. کارایی پوزولان با استفاده از معادلات مقاومت بلومی¹ و فرت² بر روی بتن‌های 28 روزه به دست آمد. حداکثر مقدار پوزولان با راندمان بهینه تعیین شد. این مطالعه نشان می‌دهد که راندمان به دست آمده از هر معادله مقاومت مشابه است و این مقادیر با افزایش نسبت پوزولان به سیمان کاهش می‌یابد (ACI، 1993).

تحقیق دیگری در عربستان سعودی که توسط Khan و Alhozaimy (2011) انجام شده حاکی از آن است که مواد پوزولانی طبیعی محلی، پتانسیل استفاده در بتن دوستدار محیط زیست را به عنوان جایگزینی جزئی سیمان دارد. پوزولان طبیعی محلی در بتن به عنوان یک جایگزین بخشی از سیمان برای مطالعه اثر سطح جایگزینی، ظرافت طبیعی پوزولان و منبع آن در بتن گنجانده شده است. خواص شیمیایی و فیزیکی پوزولان طبیعی محلی، خواص بتن تازه، توسعه مقاومت فشاری، نفوذپذیری کلرید، و تخلخل بتن حاوی مواد پوزولانی طبیعی محلی به عنوان جایگزین جزئی سیمان ارائه شده است. تأثیر عمل‌آوری بر خواص بتن حاوی پوزولان طبیعی و تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس گزارش شده نشان‌دهنده آن است که صرف‌نظر از منابع مختلف آن، خواص شیمیایی و فیزیکی پوزولان طبیعی محلی مشابه و مطابق با الزامات ASTM C 618، کلاس N است. خواص بتن حاوی حداکثر 15 درصد پوزولان طبیعی با مخلوط حاوی 20 درصد خاکستر بادی مطابقت دارد، که بسیار نزدیک به بتن معمولی است. مقادیر بالاتر این پوزولان طبیعی را می‌توان برای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار داد.

افزایش مقاومت را در مخلوطهای آزمایش شده ایجاد می‌کند (Mouli و Khelafi، 2008).

جایگزینی جزئی سیمان پرتلند با سایر مواد سیمانی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند دانه بندی شده، دود سیلیس و غیره یکی از موارد سازگار با محیط زیست است. استفاده از پوزولان‌ها که محصول جانبی فرآیندهای صنعتی است دارای مزایای دوگانه است. زیرا این مواد علاوه بر این که به عنوان جایگزین جزئی سیمان عمل می‌کنند، در عین حال، مانع از دفن انبوهی از پسماندها در زمین می‌شوند (Meyer، 2009).

نتایج تحقیق Ghrici و همکاران (2007) نشان داد که استفاده وسیعی از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلایل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی صورت می‌گیرد، هرچند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد. در بتن‌هایی با مقاومت زیاد، معمولاً میکروسیلیس جزو جدایی‌ناپذیر است و به عنوان جایگزین درصدی از سیمان استفاده می‌شود. این ماده یک پوزولان خیلی فعال است که خاصیت پرکنندگی مؤثری از خود نشان داده است. میکروسیلیس علاوه بر افزایش مقاومت خمیر بتن، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگ دانه، باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود. برخی از محققان دریافته‌اند که میکروسیلیس مقاومت بتن در سنین 7، 28 و 91 روز را بهبود می‌بخشد و اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری بتن، بین 3 تا 28 روز اتفاق می‌افتد (Detwiler و همکاران، 1998؛ Kjellsen و همکاران، 1999).

با توجه به این که برخی از محققین بیان می‌کنند که استفاده از پوزولان موجب افزایش نیاز به آب مخلوط بتن می‌شود، لذا برای ثابت ماندن نسبت آب به سیمان استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها توصیه می‌شود. نتایج آزمایش‌های Maghsoudi و همکاران (2002) نشان می‌دهد که جایگزینی نسبی پوزولان غرب جوپار موجب بهبود کیفیت و خصوصیات مکانیکی بتن شده است. همچنین جایگزینی نسبی پوزولان‌ها همراه با فوق‌روان‌کننده‌ها (برای ثابت ماندن نسبت آب به سیمان) موجب می‌شود که نمونه‌های حاوی پوزولان نسبت به نمونه‌های شاهد، انقباض کمتری از خود نشان دهند. همچنین مدول الاستیسیته بتن حاوی پوزولان نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد. در یک تحقیق دیگر، Uzal و همکاران (2007) مخلوطهای بتنی حاوی حجم بالایی از پوزولان طبیعی (50 درصد جرم کل مواد سیمانی) را برای کاربردهای سازه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، سه نوع پوزولان طبیعی از معادن ترکیه برای تهیه مخلوطهای بتنی پوزولان طبیعی با حجم بالا استفاده شد که دو مخلوط اضافی با

مرتبط با تولید سیمان کمک کند (Dehghan Anari و همکاران، 2022).

سرباره معمولاً در بتن به شکل سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده زمینی استفاده می‌شود. سرباره می‌تواند تا 50 درصد از سیمان در مخلوط بتن جایگزین شود و اغلب همراه با سایر مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی استفاده می‌شود. خاکستر بادی پودری ریز است که هنگام سوزاندن زغال سنگ در نیروگاه‌ها تولید می‌شود. برای بهبود استحکام، دوام و اثرات زیست‌محیطی بتن مورد استفاده قرار گیرد. این پوزولان می‌تواند با هیدروکسید کلسیم (آهک) موجود در سیمان واکنش داده و مواد سیمانی اضافی تولید کند. لذا در صورت جایگزینی خاکستر بادی برای بخشی از سیمان در مخلوط بتن، می‌توان هزینه بتن را کاهش دهد (Habibi و Ahmadvand، 2018).

ازجمله سایر مزایای استفاده از خاکستر بادی در بتن می‌توان به کاهش کاهش ردپای کربن بتن و کاهش میزان زباله‌های صنعتی اشاره نمود (Nath و همکاران، 2018).

دوده سیلیس که به‌عنوان میکروسیلیس نیز شناخته می‌شود، شکل آمورف³ دی‌اکسیدسیلیکون است که که محصول فرعی کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس می‌باشد. دوده سیلیس حاوی 94 تا 96 درصد دی‌اکسیدسیلیسیوم می‌باشد. دانه‌بندی پودر میکروسیلیس در محدوده 5 تا 15 میکرون است و در مقایسه با ذرات سیمان صد برابر ریزتر و نرم‌تر است. افزودن میکروسیلیس به مخلوط بتنی باعث ترکیب دی-اکسیدسیلیسیوم با محلول هیدروکسیدکلسیم آزاد موجود در منافذ مومینه بتن شود و به این ترتیب کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و در نهایت افزایش مقاومت فشاری بتن شود. پودر میکروسیلیس موجب افزایش دانسیته بتن خواهد شد و همچنین کیفیت چسبندگی اجزای بتن را بالاتر خواهد برد.

تحقیقات به‌عمل آمده توسط Bajpai و همکاران (2020) نشان داده است که می‌توان با استفاده از افزایش از دوده سیلیس در بتن ژئوپلیمری، هزینه‌هایی بتن را کاهش و باعث افزایش پایداری عمر بتن گردید. علاوه بر این، مدیریت پسماند را می‌توان به‌طور مؤثر با استفاده از محصولات جانبی صنعتی در بتن انجام داد.

2-2- طرح‌های اختلاط بتن آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر به‌منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه چهار مخلوط بتن مورد آزمایش قرار گرفته است که در جدول (1) ارائه شده است. طرح اختلاط اول مربوط به وزن‌های خاکستر بادی و سرباره 20 و دوده سیلیس 10 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

Habibi و Ahmadvand (2018) در تحقیق اخیر، بتن‌های خودتراکم را مورد بررسی قرار داده و یک روش تحلیلی به‌منظور تعیین نسبت‌های بهینه طرح اختلاط بتن خودتراکم با مقاومت بالای حاوی خاکستر بادی با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای و با حداقل اطلاعات علم بهینه‌سازی را ارائه نموده است.

هدف از تحقیق حاضر معرفی یک مخلوط بتن پایدار با کمترین تأثیر محیطی می‌باشد. بدین منظور از پوزولان‌ها مکمل سازگار با محیط زیست و نرم‌افزارهای Life 365TM و Eco Concrete Calculation Tool V2.01 به‌ترتیب برای شبیه‌سازی طول عمر و محاسبه اثرات زیست‌محیطی استفاده گردید. انواع پوزولان‌های مورد بررسی و نتایج حاصل در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق سه نوع پوزولان شامل سرباره (Slag) خاکستر بادی (Fly ash)، و دوده سیلیس (Silica Fume) به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، مورد بررسی قرار گرفته است. با لحاظ درصد وزنی متفاوت از این مواد، چهار طرح مجزا مخلوط بتن و یک طرح پایه بدون استفاده از افزودنی‌های بتن تعریف شده است. سپس طول عمر مفید و چرخه حیات دال و دیوار بتنی تولید شده با استفاده از مدل life-365 مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بخش ابتدا مواد پوزولانی مورد استفاده توضیح داده شده، سپس طرح مختلف مخلوط بتن معرفی می‌شود. در پایان نیز مبانی فنی و زیست‌محیطی مرتبط با مدل ارزیابی چرخه حیات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2-1- پوزولان‌های مورد استفاده

در این بخش پوزولان‌های مورد بررسی شامل سرباره (Slag) خاکستر بادی (Fly ash) و دوده سیلیس (Silica Fume) معرفی می‌شوند.

سرباره محصول جانبی صنعت فولاد است و به‌عنوان پوزولان مکمل جایگزین بخشی از سیمانی در مخلوط بتن استفاده می‌شود. ازجمله مزایای استفاده از سرباره می‌توان به کاهش هزینه تولید بتن (سرباره معمولاً ارزان‌تر از سیمان است)، افزایش دوام بتن به‌واسطه کاهش نفوذپذیری بتن و ایجاد مقاومت در برابر حملات شیمیایی اشاره نمود (Yahi و Teymuri Mogoui، 2014).

تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از سرباره به‌عنوان جایگزینی برای سیمان می‌تواند به کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی تولید بتن با کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

2-3- پیش‌بینی عمر مفید بتن و ارزیابی چرخه حیات

مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی عمر مفید و ارزیابی چرخه حیات سازه‌های بتنی توسعه یافته و به‌صورت تجاری در دسترس هستند. در این تحقیق از مدل پیش‌بینی عمر مفید Life-365TM استفاده شده است. این مدل یک روش تأییدشده توسط انجمن بتن آمریکا (ACI) بوده و از سال 2000 میلادی برای ارزیابی چرخه حیات و پیش‌بینی عمر مفید بتن با نسبت‌های مخلوط مختلف بتن به‌ویژه به‌منظور حفاظت در برابر خوردگی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به‌طور عمده برای بررسی عمر سازه‌های دریایی و سایر سازه‌هایی که در معرض منابع خارجی کلراید هستند، مانند پارکینگ‌ها، عرشه پل و زیرساخت‌های حمل و نقل مورد استفاده قرار گرفته است (Ehlen و همکاران، 2009).

در سال 2008، نسخه دوم این مدل به صنعت ساخت‌وساز معرفی شد که قابلیت لحاظ عدم قطعیت در خواص مواد بتن، هندسه ساختار، شرایط مرزی، و هزینه‌های پروژه را دارد. نسخه 2009 این مدل (که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است) داده‌های آب و هوایی مناطق مختلف ایالات متحده را به‌صورت پیش‌فرض در خود دارا بوده و این داده‌ها به تخمین شدت و فرکانس عوامل محیطی مؤثر در زوال بتن مانند خوردگی آرماتور، حمله سولفات، واکنش قلیایی-سیلیکا و کربن‌سازی کمک می‌کنند. ولی استفاده‌کنندگان این مدل می‌توانند مقادیر مربوط به محل مورد استفاده نهایی بتن را جایگزین مقادیر پیش‌فرض نمایند (Yang و همکاران، 2020).

اساس مدل‌سازی، معادلات دیفرانسیل انتشار فیک⁴ می‌باشد که بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی توسعه و کالیبره شده است. این مدل قادر به تعیین غلظت کلراید (CS) در سطح تماس با بتن به‌صورت غیراحتمالاتی و همچنین عمر مفید به‌صورت احتمالاتی می‌باشد. این مدل معادله دیفرانسیل انتشار را به‌صورت دوبعدی با در نظر گرفتن ضریب انتشار D به‌عنوان تابعی از زمان t و دما T به‌روش کرانک نیکلسون⁵ حل می‌نماید (Athibaranan و همکاران، 2022).

$$D(t, T) = D_{ns} \times f(t) \times f(T) \quad (1)$$

$$D(t, T) = D_{ref} \times \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \times e^{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (2)$$

که در آن، D_{ref} ، t_{ref} و T_{ref} به‌ترتیب ضریب انتشار مرجع، دوره زمانی مرجع (28 روز) و دمای مرجع (293 درجه کلوین)، m ثابت انتشار پوسیدگی یا عامل پیری، U انرژی فعال‌سازی از فرآیند انتشار و R ثابت گاز می‌باشد.

جدول (1) نشان می‌دهد که این طرح اختلاط، پایین‌ترین درصد وزنی برای استفاده از مواد پوزولانی (یعنی 12/5 درصد) را دارد. طرح اختلاط دوم مربوط به اوزان خاکستر بادی و سرباره برابر با 40 کیلوگرم بر مترمکعب و دوده سیلیس 20 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. در این طرح مواد پوزولانی جمعاً 25 درصد از وزن سیمان را به‌خود اختصاص داده است.

طرح اختلاط شماره 3 مربوط به وزن‌های خاکستر بادی 20، سرباره 80 و دوده سیلیس 60 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که در مجموع مواد پوزولانی در این طرح 40 درصد از وزن سیمان را به‌خود اختصاص داده است. در طرح اختلاط چهارم، خاکستر بادی مورد استفاده قرار نگرفته است. وزن سرباره 100 و دوده سیلیس 60 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که در مجموع مواد پوزولانی در این طرح نیز 40 درصد از وزن سیمان مصرفی را به‌خود اختصاص می‌دهند. در تمامی این طرح‌ها از 900 کیلوگرم بر مترمکعب ماسه و 1000 کیلوگرم بر مترمکعب مصالح سنگی درشت‌دانه با قطر 5 تا 10 میلی‌متر استفاده شده است. آب مصرفی از نوع آب شرب و مقدار آن 160 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

به‌منظور مقایسه سناریوهای فوق، یک طرح پایه (مبنا) نیز در نظر گرفته شده است. در طرح مبنا، هیچ‌گونه ماده افزودنی به بتن اضافه نشده و تنها از سیمان، آب و سنگ‌دانه استفاده شده است. در طرح اختلاط پایه، مقدار سیمان مورد استفاده نزدیک 400 کیلوگرم بر مترمکعب و سنگ‌دانه ریز 900 کیلوگرم بر مترمکعب و سنگ‌دانه درشت‌دانه 1000 کیلوگرم بر مترمکعب است که مقدار آب در این سیستم برابر با 160 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. لذا نسبت آب به سیمان 0/4 و دانسیته وزنی بتن 2460 کیلوگرم بر مترمکعب است که مشابه با درصد‌های طرح‌های اختلاط آزمایشی (جدول (1)) می‌باشد. لذا تنها تفاوت مابین طرح مبنا و طرح‌های آزمایشی در مقادیر سیمان و مواد افزودنی به سیمان می‌باشد.

جدول 1- طرح‌های اختلاط بتن (سیمان نوع اول) مقادیر وزنی

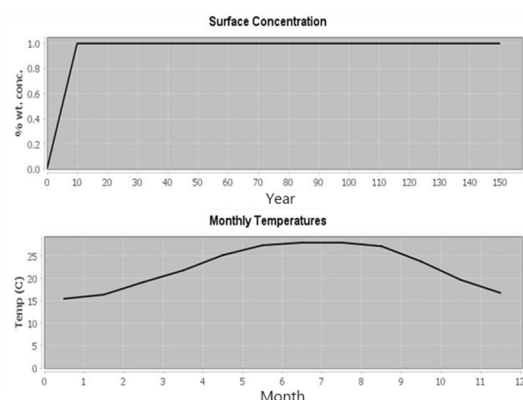
طرح	مقدار	خاکستر بادی	سیمان	سرباره	دوده سیلیس
1	درصد مواد	5	87/5	5	2/5
	وزن (کیلوگرم)	20	350	20	10
2	درصد مواد	10	75	10	5
	وزن (کیلوگرم)	40	300	40	20
3	درصد مواد	20	65	20	15
	وزن (کیلوگرم)	20	240	80	60
4	درصد مواد	0	65	25	15
	وزن (کیلوگرم)	0	240	100	60



شکل 2- ابعاد نمونه دال بتن آرمه آزمایشی

نمودار افزایش غلظت یون کلر و همچنین متوسط تغییرات دمای ماهانه محیط بتن ریزی در شکل (3) ارائه شده است. مقادیر مربوطه از داده‌های مشاهداتی شهر تامپا ایالت فلوریدا اخذ شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود غلظت یون کلر در 10 سال اول پس از ساخت به صورت خطی افزایش و سپس به بالاترین غلظت یون کلر منطقه می‌رسد. جدول (2) خلاصه نتایج ارزیابی زیست‌محیطی و درصد کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی را برای طرح‌های چهارگانه ارائه می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد زمانی که این مقادیر به عنوان مواد افزودنی در بتن استفاده می‌شود، در طرح اختلاط اول درصد بسیار پایینی از مواد را برای شرایط پایدار (سازگاری با محیط زیست 8/52 درصد) نشان می‌دهد. زمانی که این مقادیر به عنوان مواد افزودنی در بتن استفاده می‌شود با توجه به جدول (2) درصد به نسبت بهتری نسبت به اختلاط اولی از مواد را برای شرایط سازگار با محیط زیست (17 درصد) نشان می‌دهد. با تغییرات در مقدار خاکستر بادی و از سویی کاهش این مقدار و همچنین افزایش ترکیبات دیگر (جدول (2)) مشاهده گردید که پارامترهای زیست-محیطی تا 2 برابر نسبت به زمانی که مقدار سیمان بیشتری استفاده شده می‌باشد و از سویی با کاهش مقدار خاکستر بادی این درصد بهبود یافته و تا 34 درصد نیز پیشروی کرده است. طرح اختلاط چهارم سبب بهبود عالی 35/9% در شرایط زیست‌محیطی شده است.

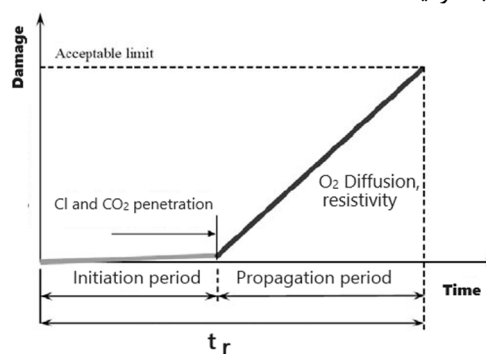


شکل 3- نمودار تغییرات غلظت یون و دمای متوسط ماهانه محیطی بتن

عمر مفید (t_r) برای یک عنصر خاص در یک محیط معین معمولاً به مدت زمان بین ساخت آن عنصر تا اولین تعمیر اطلاق می‌شود. در صنعت بتن، عمر مفید برای پیش‌بینی زمان ترک خوردن (یا آسیب غیرقابل قبول) استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی زمان ترک خوردن، مدل‌های کمی متعددی وجود دارد که اغلب از تئوری مدل عمر مفید دو مرحله‌ای (Tuutti (1982)، استفاده می‌کنند.

همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده است، زوال به دو فاز مجزا تقسیم می‌شود. فاز اول در واقع زمان لازم برای نفوذ کلراید از محیط به درون بتن و فاز دوم، مدت زمان لازم برای ایجاد خوردگی کافی برای ایجاد آسیب در سطح غیرقابل قبول می‌باشد. برای تخمین عمر مفید بتن در Life-365™ از پارامترهای غلظت کلراید، دما، ضریب انتشار، آستانه کلراید قابل حل در بتن و طول دوره پیشروی آسیب استفاده می‌شود. برای جزئیات بیشتر در خصوص محاسبه احتمالاتی عمر مفید بتن، خواننده محترم به مقاله تهیه شده توسط Bentz (2003) ارجاع داده می‌شود.

در تحقیق حاضر برای محاسبه تراز عمر مفید (SLC) از نسبت طول عمر نمونه‌های بتن آزمایشی به طول عمر مفید بتن مبنا (رابطه (3)) استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا عمر مفید بتن مبنا به کمک مدل محاسبه به دست آمد. سپس با لحاظ ترکیبات مختلف پورولانی ارائه شده در جدول (1) عمر مفید هر چهار طرح محاسبه گردید.



شکل 1- مؤلفه‌های محاسبه عمر مفید بتن

$$SLC_i = \frac{t_{ri}}{t_{rb}} \quad (3)$$

3- بحث و نتایج

شکل (2) هندسه نمونه دال بتن آرمه با سطح مقطع 5 متر مربع در معرض کلراید را که در Life-365™ مدل‌سازی شده است نشان می‌دهد. در این تحقیق ضخامت دال برابر 200 میلی‌متر با ضخامت پوشش بتنی روی آرماتور 50 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه‌های و ابعاد مورد تحقیق منطبق با ابعاد پیشنهادی انجمن بتن آمریکا می‌باشد.

25 درصد سرباره و 15 درصد دوده سیلیس و در غیاب خاکستر بادی عمر مفید بتن نزدیک 100 سال می‌باشد.

با استفاده از رابطه (2) و نتایج فوق‌الذکر تراز عمر مفید برای طرح‌های اختلاط 1 الی 4 به‌ترتیب برابر 1/34، 2/0، 8/91 و 8/45 خواهد بود. لذا طرح‌های 3 و 4 از عملکرد بهتری از نظر افزایش طول عمر مفید بتن دارا هستند. از سوی دیگر با ملاحظه ارقام حاصل از محاسبه پتانسیل کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، طرح اختلاط چهارم به‌عنوان طرح بهینه این تحقیق معرفی می‌شود. در این طرح مقدار سرباره نزدیک 100 کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب و دوده سیلیس نزدیک 60 کیلوگرم انتخاب شده است که به‌دلیل محدودیت در درصد مواد افزودنی به‌جای سیمان (نزدیک 40 درصد) از دوده خاکستر استفاده نگردید.

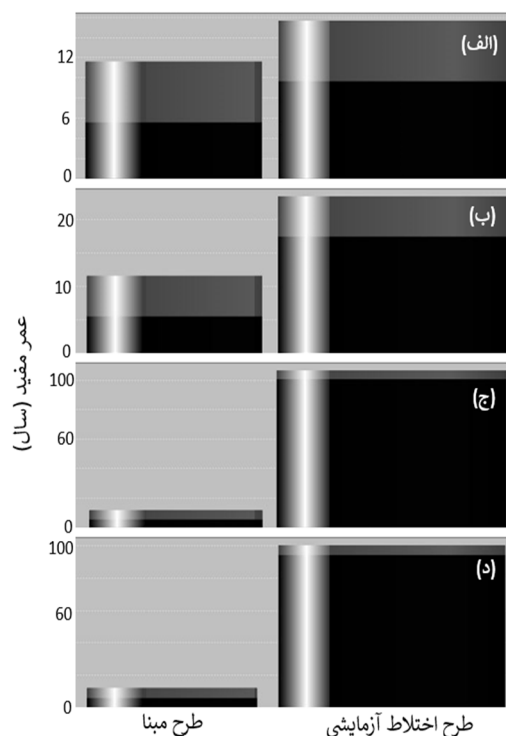
شکل (4) خلاصه نتایج پیش‌بینی عمر بتن را برای طرح‌های چهارگانه در مقایسه با طرح مبنا ارائه می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که عمر مفید دال بتنی طرح مبنا که در آن هیچ‌گونه مواد افزودنی به بتن اضافه نمی‌شود، برابر 11/9 سال می‌باشد. همچنین در طرح اول عمر مفید بتن نزدیک 16 سال است که تقریباً رشد نزدیک 1/34 برابر عمر مفید مبنا می‌باشد. همچنین این داده‌ها نشان داد که عمر بتن ساخته شده در طرح دوم نزدیک 23/5 سال است که تقریباً افزایش 2 برابری عمر مفید را نشان می‌دهد که رشد نسبت بهتری در مقایسه با طرح اختلاط اولیه است. با توجه به شکل (2)، عمر مفید بتن ساخته شده در طرح سوم نزدیک 106 سال است که تقریباً رشد 5 برابری نسبت به طرح اختلاط دوم می‌باشد که عدد بسیار بالایی در مقایسه با طرح اختلاط‌های دیگر است. نتایج حاصل از طرح چهارم نشان می‌دهد که با اضافه کردن

جدول 2- پارامترهای زیستی محیط برای طرح‌های اختلاط چهارگانه

اثرات زیست‌محیطی	واحد	طرح مبنا	طرح اختلاط				درصد کاهش اثر در هر طرح			
			1	2	3	4	1	2	3	4
گرمایش جهانی	kg Co2	368/309	330/832	293/355	231/134	223/294	10/2	20/4	37/2	39/4
سرطان‌زایی	CTUh	-6E 5/22	-6E 4/89	-6E 4/57	-6E 3/72	-6E 3/51	6/3	12/5	28/8	32/8
تخریب لایه ازن	Kg CFC-11	-5E1/59	-5E1/43	-5E1/28	-5E1/03	-6E9/96	9/6	19/2	35/2	37/3
سم‌زایی اکولوژیکی	eq	606/35	568/39	530/43	434/28	411/28	6/3	12/5	28/4	32/2
سوخت های فسیلی	MJ	145/713	130/811	115/908	93/053	90/793	10/2	20/5	36/1	37/7
						میانگین	8/52	17/0	33/2	35/9

4- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با جایگزینی مواد افزودنی سرباره، خاکستر بادی، و دوده سیلیس به‌عنوان بخشی از سیمان مصرفی در سازه‌های بتن آرمه، نه‌تنها افزایش چشم‌گیری در طول عمر مفید بتن صورت می‌گیرد، بلکه به‌واسطه کاهش مقدار سیمان، ردپای کربن نیز کاهش یافته و سازگاری بتن با محیط زیست افزایش می‌یابد. نتایج طرح‌های اختلاط اول و دوم نشان داد که با دو برابر شدن مواد نسبت به اختلاط اولیه عمر و سازگاری محیط زیستی بتن نیز تقریباً دو برابر می‌شود. نتایج اختلاط‌های سوم و چهارم نشان داد که این نمودار با افزایش مقدار مواد افزودنی به‌صورت خطی نبوده و با افزایش مقدار خاکستر بادی اگرچه عمر بتن افزایش می‌یابد، سازگاری زیست‌محیطی بتن خیلی بالاتر نرفته و تقریباً تا 34 درصد پیشروی می‌کند. آزمایشات اختلاط سوم نشان داد که با افزایش مقدار خاکستر سیلیس در نمونه بتن و کاهش سرباره عمر مفید بتن بالاتر می‌رود اما از سویی سازگاری با محیط زیست را کمتر می‌کند. برای مثال، زمانی که خاکستر بادی 5 درصد وزن سیمان و دوده سیلیس، 15 درصد و سرباره 20 درصد وزن سیمان را به‌خود اختصاص دهد با وجود این که عمر بتن به 106 سال افزایش می‌یابد اما از سویی دیگر سازگاری با



شکل 4- عمر مفید بتن تولید شده با طرح‌های مختلف در مقایسه با عمر مفید بتن مبنا

- portland cement association", Research and Development Bulletin RD112T. 1998.
- Ehlen MA, Thomas MD, Bentz EC, "Life-365 service life prediction mode ITM version 2.0. Concrete international", 2009, 31 (5), 41-46.
- Ghrichi M, Kenai S, Said-Mansour M, "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", Cement & Concrete Composites 2007, 29 (7), 542-549.
- Habibi A, Ahmadvand H, "Development of an Analytical Method for Optimization of High Strength Self-Compacting Concrete Mix Design Containing Fly Ash", Ferdowsi Civil Engineering Journal, 2018, 31 (2), 101-117. 10.22067/civil.v31i2.5779
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.008>
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120172>
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.011>
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.04>
<https://doi.org/10.1139/L10-112>
<https://doi.org/10.3390/en15072708>
- Ige, OE, Olanrewaju, OA, Duffy, KJ, Collins, OC, "Environmental impact analysis of Portland cement (CEM1) using the midpoint method", Energies, 2022, 15 (7), 2708.
- Ince C, Derogar S, Michelitsch TM, "Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars", Materiales de Construcción, 2015, 65 (318), e056-e056. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.05214>
- Khan MI, Alhozaimy AM, "Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete", Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38 (1), 71-78.
- Kjellsen KO, Wallevik OH, Hallgren M, "On the compressive strength development of high-performance concrete and paste-effect of silica fume", Materials and Structures, 1999, 32, 63-69.
- Life-365, Service-Life Prediction Model, Version 2.2.3, 2020. Silica Fume Association, Sierra Lane, VA, US 2020.
- Maghsoudi AA, Fazeli A, Negarizadeh A, "Investigation and comparison of mechanical properties of concretes containing and without pozzolan", Modares Technical and Engineering, 2002, 8, 65-79. SID. <https://sid.ir/paper/420578/fa>
- Meyer C, "The greening of the concrete industry", Cement and Concrete Composites, 2009, 31 (8), 601-605.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- Mouli M, Khelafi H, "Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan", Building and Environment, 2008, 43, 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.03>
- Nath P, Sarker PK, Biswas WK, "Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment", Energy and Buildings, 2018, 158, 1694-1702.
- محیط زیستی به 33/2 درصد می‌رسد. و یا زمانی که مقدار خاکستر بادی 10 درصد و دوده سیلیس 10 و سرباره به 20 درصد وزن سیمان برسد عمر بتن به 65 سال می‌رسد و از سویی درصد سازگاری با محیط زیستی آن به مقدار 30 درصد تنزل خواهد کرد. این داده‌ها نشان می‌دهند که افزایش خاکستر بادی همیشه منجر به افزایش عمر بتن نمی‌شود. دوده سیلیس در بالاترین مقدار خود یعنی 15 درصد بهترین جواب را برای افزایش عمر و سازگاری با محیط زیستی داراست. اختلاط چهارم نشان داد که حذف خاکستر بادی و افزایش مقدار دوده و سرباره به میزان 40 درصد وزن سیمان، بهترین عملکرد از نظر سازگاری با محیط زیستی و مقاومت را ارائه داده است. لذا با انجام طرح اختلاط 4 میتوان در سیستم‌های محیط زیستی نزدیک 35/9 درصد بهره‌وری صورت گیرد. با انتخاب و استفاده از پوزولان مناسب، می‌توان به کاهش مصرف سیمان و بهبود ویژگی‌های بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت به خوردگی و مقاومت به حرارت کمک کرد. با این حال، انتخاب پوزولان مناسب باید با توجه به نیازهای خاص هر پروژه و شرایط محلی انجام شود. تحقیق حاضر محدود به بررسی سه نوع پوزولان سرباره، خاکستر بادی و دوده سیلیس می‌باشد. ارزیابی چرخه حیات و پیش‌بینی طول عمر مفید بتن‌های مرکب از سایر پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی می‌تواند در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین استفاده از پوزولان مناسب به‌ویژه خاکستر بادی (با توجه به وجود نیروگاه‌های متعدد حرارتی در کشور)، به‌جای بخشی از سیمان لازم است مورد توجه طراحان، مجریان و تولیدکنندگان بتن و سازه‌های بتنی قرار گیرد.

5- مراجع

- ACI Committee 232.2R-03; "Use of Fly Ash in Concrete", American Concrete Institute, 1993.
- Athibaranan S, Karthikeyan J, Rawat S, "Investigation on service life prediction models of reinforced concrete structures exposed to chloride laden environment", Journal of Building Pathology and Rehabilitation 2022, 7, 16. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00149-8>
- Benhelal E, Zahedi G, Shamsaei E, Bahadori A, "Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry", Journal of Cleaner Production, 2013, 51, 142-161.
- Bentz EC, "Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides", Materials Journal, 2003 100 (5), 391-397.
- Dehghan Anari MM, Yousefi E, Aghapour M, "Steel slag and its applications in cement industry, concrete technology and sustainable development", 11th International Conference on Materials & Metallurgical Engineering (iMat2022), Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1622205>
- Detwiler RJ, Bhatti JI, Bhattacharja S, "Supplementary cementing materials for use in blended cements;

- Pekmezci B, Akyüz S, "Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, 2004, 34 (12), 2175-2179.
- Tuutti K, "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Report No. 4-8, 1982.
- Uzal B, Turanli L, Mehta PK, "High-volume natural pozzolan concrete for structural applications", ACI Materials Journal, 2007, 104, (5), 535.
- Yahi N, Teymuri Mogoui M, "Use of slag as aggregate in the manufacture of high-strength concrete", Sixth Annual National Conference of Iranian Concrete, 2014, Tehran. <https://civilica.com/doc/316368>
- Yang C, Li L, Li J, "Service life of reinforced concrete seawalls suffering from chloride attack: theoretical modelling and analysis", Construction and Building Materials, 2020, 263, 120-172.