



استفاده از روش تاگوچی برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن پلیمری مقاوم در برابر رشد ترک مود I

دین محمد ایمانی^{1*}، محمدرضا محمد علیها²، عاطفه رجبی کفشگر³، محسن شجاعی³

1- استادیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، imananim@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: ...

پذیرش: ...

کلیدواژگان

بتن پلیمری، طرح اختلاط بهینه، روش تاگوچی، چقرمگی شکست و انرژی شکست مود I خالص، قطعه تیر ترک‌دار خمشی

ساخت بتن پلیمری با عملکرد مناسب در برابر ترک‌خوردگی موضوع مهمی برای استفاده از این مواد کامپوزیتی در کاربردهای عملی است. چقرمگی شکست و انرژی شکست چنین سنگ‌دانه‌های توزیع شده تصادفی در داخل زمینه رزین پلیمری تحت تأثیر طراحی مخلوط و درصد مواد تشکیل دهنده بتن پلیمری قرار می‌گیرد. در این تحقیق، ترکیب بهینه مخلوط بتن پلیمری پایه اپوکسی ساخته شده از سه ماده (رزین اپوکسی، سنگدانه ریز و سنگدانه درشت سیلیسی) که بیشترین مقاومت در برابر رشد ترک را داشته باشد، با استفاده از روش طراحی آزمایشی تاگوچی L8 بدست می‌آید. بدین منظور، تعدادی آزمایش چقرمگی شکست مود I (مود کششی بارگذاری) با استفاده از نمونه تیر ترک‌دار خمشی بر اساس طرح آزمایشی پیشنهاد شده به روش تاگوچی، انجام می‌شود. محدوده اولیه برای هر یک از اجزای بتن پلیمری به صورت، 25-31٪ سنگدانه ریز، 21-23٪ رزین اپوکسی، و 46-54٪ سنگدانه درشت، انتخاب شد. با توجه به نتایج حاصله مشخص شد که مخلوط حاوی حداکثر رزین، حداکثر مقدار سنگدانه ریز، و حداقل سنگدانه درشت می‌تواند بالاترین انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست را در شرایط مود کششی بارگذاری فراهم آورد.

The use of Taguchi method for mix-design optimization of polymer concrete with high resistance against mode I crack growth

Din Mohammad Imani^{1*}, Mohammad Reza Mohammad Aliha¹, Atefeh Rajabi Kafshgar¹, Mohsen shojaee¹

1- School of Industrial Engineering, Iran university of science and technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, imananim@iust.ac.ir

Keywords

Abstract

Epoxy polymer concrete, Optimum mix-design, Taguchi method, Mode I fracture toughness and Fracture energy, Single Edge Notched Bending (SENB)

Manufacturing polymer concrete (PC) with suitable performance against cracking is an important issue for using these composite materials in practical applications. Fracture toughness and fracture energy of such randomly distributed aggregates inside the matrix of polymeric resin is affected by the mix design and percentages of PC ingredients. In this research, the optimum composition of epoxy base PC mixture made of four ingredients (epoxy resin, fine and coarse silica aggregate) was obtained using a L8 Taguchi design of experiment method. Some fracture toughness tests under mode I were conducted on Single edge notched bending specimen according to design of experiment suggested by Taguchi method. The initial range for each PC ingredient was selected as: 25-31% fine aggregate, 21-23% epoxy resin, and 46-54% coarse aggregate, and it was found that the mixture containing maximum resin (23%), maximum fine filler, minimum percentages of fiber and coarse aggregate can provide the highest fracture energy and fracture toughness values.

1- مقدمه

اصلی کاربرد گسترده بتن‌ها است. بتن سیمانی پرمصرف‌ترین نوع این مصالح ساختمانی است. اما دارای معایب قابل توجهی از جمله استحکام کششی پایین، تخلخل بالا، حساسیت به چرخه‌های انجماد و ذوب و مواد شیمیایی خورنده و همچنین حساسیت بالای آن به شرایط محیطی است [1,2].

انواع مختلفی از بتن (که عموماً متشکل از مخلوط سنگ‌دانه‌ها، چسباننده‌ها و در برخی موارد مواد تقویت‌کننده هستند) به طور گسترده در ساخت سازه‌ها استفاده می‌شوند. هزینه کم، سهولت استفاده و مقاومت فشاری بالا از دلایل

کلی، خواص شکست و رفتار شکست پس از اوج را افزایش دهد. برای مثال، طبق یافته‌های آن‌ها، الیاف تقویت‌کننده شیشه‌ای می‌تواند چقرمگی شکست و مدول الاستیسیته را به ترتیب تا 13 و 39 درصد بهبود بخشد. ریس [12] همچنین اثر الیاف طبیعی را بر تقویت بتن پلیمری مطالعه کرد. نتایج وی نشان داد که الیاف نارگیل خرد شده و الیاف باگاس نیشکر می‌توانند هم چقرمگی شکست و هم انرژی شکست بتن پلیمری را افزایش دهند، اما الیاف گرفته شده از ساقه موز تأثیر مثبتی بر افزایش چقرمگی شکست بتن پلیمری ندارد و تنها می‌تواند انرژی شکست را افزایش دهد.

ریس و فریرا [13] اثر قرارگرفتن در معرض اتمسفر، چرخه ذوب و یخ و تخریب حرارتی را بر خواص شکست مواد بتن پلیمری ارزیابی کردند. بر اساس یافته‌های آن‌ها، قرارگرفتن بتن پلیمری در محیط‌های گرم‌تر به مدت یک سال منجر به تخریب بیشتر (به دلیل شدت نور خورشید و اشعه ماوراء بنفش) می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که الیاف تقویت‌کننده شیشه‌ای مقاومت بهتری در برابر شرایط در نظر گرفته شده ایجاد می‌کند، به طوری که تقریباً هیچ تخریبی به جز فرسایش سطحی در مواد بتن پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مشاهده نشد. با این حال، تقویت با فیبر کربن تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت بتن پلیمری در برابر شرایط محیطی (مانند قرارگرفتن در معرض مستقیم نور خورشید و تابش فرابنفش) به دلیل از بین رفتن خواص الیاف کربن در چنین شرایطی، نداشت. با افزایش دمای چرخه‌های آزمایش، مقاومت کششی و خمشی کاهش می‌یابد و نوع شکست انعطاف‌پذیرتر می‌شود که منجر به افزایش مقدار چقرمگی شکست می‌شود. همچنین طبق نتایج ریس و فریرا، پس از 100 چرخه خستگی حرارتی در محدوده دمایی بین 20+ تا 100+ درجه سلسیوس، چقرمگی شکست بتن پلیمری اپوکسی تا 33 درصد افزایش می‌یابد.

حیدری رارانی و همکاران [5] دوام یک بتن پلیمری بهینه‌شده را تحت بارگذاری چرخه‌ای حرارتی با استفاده از دیسک برزلی بدون ترک و قطعه تیر ترک‌دار خمشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها تأثیر قابل توجه چرخه‌های حرارتی را بر چقرمگی شکست مود I (مود کششی یا باز شونده لبه‌های ترک) و همچنین مقادیر مقاومت کششی بتن پلیمری با ترکیب ثابت را نشان داد. همچنین مقادیر چقرمگی شکست مود I و مقاومت کششی بتن پلیمری آزمایش شده در آزمایش‌های آن‌ها با افزایش میانگین دمای سیکل‌های حرارتی کاهش یافت. با استفاده از نمونه دیسک برزلی با ترک مرکزی، اسدالله تبار و همکاران [22] تأثیر افزودن خرده‌های درشت و ریز حاصل از بازیافت بطری‌های PET را بر روی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست بتن پلیمری بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که افزودن بطری‌های PET بازیافتی درشت می‌تواند انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست مود I را افزایش دهد. شکریه و حیدری رارانی [19] رفتار گریتنینگ‌های کامپوزیتی ساخته شده از مقاطع پالترود شده را به روش تئوری و آلمان محدود بررسی کرده و سپس این مواد را به‌عنوان تقویت‌کننده بتن و جایگزینی برای آرماتورهای فلزی، به دلیل مقاومت خوردگی بالا، پیشنهاد کردند. علیها و همکاران [20] استحکام کششی و چقرمگی شکست بتن پلیمری را مطالعه کردند. آن‌ها استفاده از نمونه خمشی نیمه دایره‌ای ساخته شده از بتن پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای رشته‌ای خرد شده را برای انجام آزمایش‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها نشان دادند که هر دو نمونه خمشی نیمه دایره‌ای با ترک لبه‌ای و بدون ترک، نمونه‌های مناسبی برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست و مقاومت کششی مواد بتن پلیمری هستند. علاوه بر این، آن‌ها اشاره کردند که نمونه‌های خمشی نیمه دایره‌ای در مقایسه با نمونه تیر

پلیمری که در دهه 1950 در صنعت بتن اختراع شد، از اختلاط رزین‌های پلیمری (چسب یا رزین) با سنگ‌دانه‌های معدنی تولید می‌شود و در مقایسه با سایر مواد بتن سیمانی معمولی، بتن پلیمری نسل نسبتاً جدیدی از مخلوط‌های بتنی به حساب می‌آید [3]. در مقایسه با مواد بتن سیمانی معمولی، بتن پلیمری دارای مزایایی مانند خواص مکانیکی و مقاومتی بالاتر، مقاومت بالاتر در برابر سایش و عوامل شیمیایی، مقاومت برشی بالاتر بین بتن پلیمری و فولاد یا بتن است [1,2]. دستیابی به چنین ویژگی‌های عالی عمدتاً به دلیل جایگزینی سیمان و آب با رزین به‌عنوان اتصال‌دهنده مخلوط ناهمگن سنگ‌دانه‌ها در داخل زمینه رزین‌های پلیمری است؛ بنابراین یک بتن پلیمری از سنگ‌دانه‌های درشت و ریز (با معمولاً 70-80 درصد وزن مخلوط) و رزین پلیمری (مانند پلی‌استر یا اپوکسی با معمولاً 20-30 درصد وزن مخلوط) تشکیل شده است. گاهی اوقات، برخی از مواد افزودنی مانند پرکننده‌های میکرو، الیاف تقویت‌کننده نظیر الیاف شیشه یا حتی مواد زائد کشاورزی و صنعتی برای پر کردن فضاهای خالی هوا و افزایش عملکرد و خواص مکانیکی به مخلوط بتن پلیمری اضافه می‌شود.

با در نظر گرفتن برخی عوامل مانند هزینه، دردسترس بودن مواد و خواص فیزیکی و مکانیکی ذاتی موردنیاز نظیر (استحکام، تغییر شکل و مقاومت شیمیایی)، معمولاً از تعدادی رزین پلیمری برای ساخت مواد بتن پلیمری استفاده می‌شود [4,5]. بتن پلیمری تقویت شده با الیاف، یک ماده کامپوزیتی است که از یک زمینه پلیمری تشکیل شده و با الیاف کوتاه که به صورت تصادفی توزیع شده، تقویت می‌شود. در واقع، بتن پلیمری تقویت شده با الیاف به‌طور کلی شامل الیاف مقاوم و پر استحکام است که در زمینه رزین تعبیه شده است. الیاف توزیع شده تصادفی عموماً باعث افزایش استحکام و سفتی کامپوزیت می‌گردند. بتن پلیمری ماده‌ای مستحکم و بادوام است که دارای مقاومت کششی، خمشی و فشاری بسیار بالاتری نسبت به مصالح بتن سیمانی و آسفالتی رایج است [6]. این امر منجر به مصرف مواد کمتری برای ساخت سازه‌های ساخته شده از بتن پلیمری و در نتیجه سبک‌تر بودن آن‌ها نسبت به سازه‌های سیمانی مشابه می‌شود. همچنین بر خلاف بتن سیمانی، بتن پلیمری چسبندگی بسیار خوبی به اکثر سطوح دارد و از این رو این ماده مناسبی برای تعمیر بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند سازه‌های هیدرولیکی یا حتی روسازی و روکش‌های جاده است [7,8]. رزین نقش ماده چسبنده را در بتن پلیمری ایفا می‌کند به طوری که پس از سخت شدن، رزین زمینه سختی ایجاد می‌کند و سبب پیوند عالی بین سنگ‌دانه‌ها می‌شود. پایداری ساختاری، انقباض ناچیز و چسبندگی با سطوح صاف برخی از مزایای مهم رزین است [9,10]. به‌طور کلی، رزین اپوکسی، رزین پلی‌استر، رزین متاکریلات و رزین پلی‌اورتان از جمله پلیمرهای متداول مورد استفاده برای تولید مواد بتن پلیمری هستند [11].

پدیده رشد ترک و شکست یکی از مدهای عمده و آماندگی در بتن‌های پلیمری است که به دلیل ماهیت ترد و شبه ترد عمومی چنین موادی در شرایط بارگذاری واقعی و عمر سرویس‌دهی رخ می‌دهد. تعدادی از محققین رفتار شکست مواد بتن پلیمری را با استفاده از آزمایش‌ها تجربی بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، ریس و فریرا به طور تجربی رفتار شکست مواد مختلف بتن پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را مورد مطالعه قرار دادند [3]. آن‌ها دریافتند که خواص شکست را می‌توان با افزودن الیاف کوتاه شیشه یا کربن بهبود بخشید. بر خلاف ملات‌های سیمان معمولی و حتی مواد بتن پلیمری معمولی (که کاهش مقاومت سریع بلافاصله پس از اوج بار رخ می‌دهد)، تقویت مواد بتن پلیمری با الیاف شیشه‌ای می‌تواند گاهی اوقات استحکام

طراحی خاصی از آرایه‌های متعامد برای شناسایی شرایط آزمایشی بهینه و ارزیابی تغییرات در پاسخ استفاده می‌کنند [43,44]. محبی و همکاران [31] مقاومت سایشی بتن حاوی سرباره فعال قلیایی را با استفاده از روش تاگوچی بررسی کردند و کاربرد این روش را برای طراحی مناسب آزمایش و بهینه‌سازی پارامترهای این ترکیب برای به حداکثر رساندن مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش تأیید کردند. روش تاگوچی توسط یلدیزل و کالیس [32] نیز برای بهینه‌سازی نتایج تجربی مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و خواص مقاومت سولفات استفاده شد. جعفری و همکاران [33] از روش‌های تاگوچی و آنالیز واریانس برای بهینه‌سازی مخلوط مواد بتن پلیمری استفاده کردند. همچنین تانیلدیزی [34] خواص مکانیکی طولانی‌مدت و ریزساختار بتن پلیمری-فسفازنی را که در معرض چرخه‌های انجماد و ذوب قرار می‌گیرد، بررسی کرد.

استفاده از رویکردهای تاگوچی و آنالیز واریانس برای بهینه‌سازی خواص مواد کامپوزیتی با توزیع تصادفی اخیراً توسط محققان مختلف نیز گسترش یافته است [35-39,47]. با این حال، بررسی و مرور منابع فوق‌الذکر نشان می‌دهد که تحقیق جامعی در مورد بهینه‌سازی طرح اختلاط، مخلوط‌های بتن پلیمری برای به دست آوردن بهترین مقادیر مقاومت در برابر رشد ترک وجود ندارد؛ بنابراین، هدف اصلی این مقاله بررسی اثر ترکیب مخلوط و تأثیر مواد بر چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط‌های بتن پلیمری مختلف است. در واقع درصد بهینه اجزای بتن پلیمری برای دستیابی به چقرمگی شکست بالا و مقادیر انرژی شکست بالا در مود I به صورت تجربی با استفاده از روش تاگوچی تعیین می‌گردد.

2- نمونه آزمایش چقرمگی شکست مود I

قطعه تیر ترک‌دار خمشی برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I خالص بر روی مخلوط‌های بتن پلیمری انتخاب شد. این نمونه یک تیر با ابعاد L (طول)، W (عرض) و t (ضخامت) است که با بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای و با فاصله تکیه‌گاهی S که در شکل 1 نشان داده شده، بارگذاری می‌شود. یک ترک لبه به طول a در وسط تیر ایجاد شده است. مقدار بحرانی ضریب شدت تنش مود I که به عنوان چقرمگی شکست شناخته می‌شود با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$K_{Ic} = \frac{3P_f S}{BW^2} \sqrt{\pi a} Y_I \left(\frac{a}{W}, \frac{S}{L} \right) \quad (1)$$

که در آن P_f بار شکست و Y_I ضریب هندسی است که تابعی از S/L و a/W می‌باشد، و با استفاده از حل تحلیلی این قطعه که در منابع مکانیک شکست موجود است از رابطه 2 [45] و یا شبیه‌سازی‌های عددی مانند روش اجزای محدود قابل تعیین است.

$$Y_I = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1.99 - a/W (1 - a/W)(2.15 - 3.93 a/W + 2.7(a/W)^2)}{(1 + 2 a/W)(1 - a/W)^{3/2}} \quad (2)$$

جهت تعیین ضریب هندسی قطعه با طول ترک و تکیه‌گاه ذکر شده، مدل اجزاء محدود تیر متشکل از 26880 المان مکعبی بیست گرهی در نرم‌افزار آباکوس 14.6 ایجاد شد. الگوی مش استفاده شده در مدل اجزاء محدود، مطابق شکل 2 قابل مشاهده است. با توجه سینگلاریتی میدان تنش در ناحیه اطراف نوک ترک، جهت پایش دقیق تنش در این ناحیه از المان‌های فروریخته¹ استفاده شده و فاصله نقاط میانی در المان‌های محاط

خمشی مستطیلی به مواد کمتری نیاز دارند. شکرپه و محبی [21] به تخمین مدول ارتجاعی مؤثر بتن پلیمری با استفاده از یک مدل میکرومکانیکی (موری-تاناکا) جدید پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها، این مدل در حالی که ناخالصی‌های درون ماده مرکب دوفازی هم راستا بوده و درصد حجمی آن‌ها کم تا متوسط باشد، قادر به تخمین تانسور سختی بادقت مناسبی است.

در کار تحقیقاتی دیگر، اوچی و همکاران [22] چقرمگی شکست مود ترکیبی I/III بتن پلیمری الیاف شیشه را بررسی کردند. آن‌ها از نمونه تیر خمشی سه نقطه‌ای برای تغییر مود بارگذاری با تغییر زاویه پیش ترک نسبت به جهت بارگذاری تکیه‌گاه‌ها استفاده کردند. شکرپه و همکاران [23] جهت صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت بتن پلیمری از رزین پلی‌استر به‌عنوان یکی از ترکیبات بتن استفاده کردند. نتایج بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری پیشنهادی نشان می‌دهد که افزودن این ماده سبب بهبود استحکام کششی و فشاری بتن می‌شود. مطالعه دیگر بر روی بتن پلیمری که اخیراً توسط علیها و همکاران [24] با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی فراوان بر روی مخلوط‌های مختلف بتن پلیمری انجام شده است، به بررسی اثر طرح اختلاط بتن پلیمری با ترکیب‌های متنوع مخلوط بر رفتار شکست و ترک‌خوردگی در شرایط مود I بارگذاری و با استفاده از قطعه نیمه دیسک ترک‌دار خمشی پرداخته شده است.

از آنجایی که یک بتن پلیمری از حداقل 3 یا 4 جزء (مانند رزین، سنگ‌دانه‌های ریز، سنگدانه‌های درشت و گاهی اوقات الیاف یا مواد افزودنی) ساخته شده است، درصد حجمی هر یک از مواد ممکن است بر مقاومت و خواص مکانیکی چنین مواد کامپوزیتی که به طور تصادفی در داخل مخلوط توزیع شده‌اند، تأثیر بگذارد. در واقع، افزایش یا کاهش درصد ترکیب هر یک از اجزاء می‌تواند شکل‌پذیری یا شاخص تردی مخلوط بتن پلیمری را تغییر دهد و به طور قابل توجهی بر مقاومت ترک‌خوردگی یا چقرمگی شکست آن تأثیر بگذارد. با این حال، در اکثر مقالات چاپ شده قبلی، یک ترکیب ثابت یا طرح‌های ترکیبی محدود از مواد بتن پلیمری برای توصیف خواص مکانیکی و انجام آزمایش‌های تجربی بر روی بتن پلیمری انتخاب شده است. به‌عنوان یک ماده شبه شکننده، شکست ناگهانی یکی از حالت‌های شکست اصلی در مخلوط‌های بتن پلیمری مبتنی بر اپوکسی است. اگرچه چنین مواد کامپوزیتی چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را در مقایسه با سایر انواع مصالح بتن (مانند بتن سیمانی، بتن آسفالتی و کامپوزیت‌های الیاف طبیعی [18-5]) به طور قابل توجهی بهبود بخشیده‌اند، اما همچنان مطالعات بیشتر برای افزایش چقرمگی شکست بتن پلیمری مبتنی بر اپوکسی ضروری است. مقدار چقرمگی شکست در این مواد به ترکیب مخلوط بتن پلیمری و مواد مورد استفاده برای ساخت آن بستگی دارد. با این حال، در مقایسه با خواص مکانیکی رایج از جمله مقاومت خمشی فشاری و خمشی، در مطالعات بسیار کمی به بررسی رفتار شکست بتن پلیمری و ارتباط آن با ترکیب مخلوط پرداخته شده است [25-28].

از سوی دیگر، با توجه به طیف گسترده‌ای از متغیرها و طرح‌های اختلاط متنوع ممکن برای ساخت بتن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای دستیابی به طرح‌های ترکیبی مناسب، ضروری به نظر می‌رسد [40,46]. عوامل مؤثر در ساخت مخلوط‌های بتن پلیمری بهینه را می‌توان با روش‌های بهینه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها شناسایی کرد. در میان روش‌های شناخته شده در طراحی آزمایش، روش تاگوچی بر اصل انجام حداقل تعداد آزمایش تکیه دارد و قادر به تعیین عوامل کنترل برجسته است [41,42]. آزمایش‌های طراحی شده توسط تاگوچی می‌توانند شرایط کاری بهینه را ارائه دهند، زیرا از

¹ Collapsed elements

جدول 1 خواص مکانیکی رزین [48]

Table 1. Mechanical properties of resin

استاندارد	واحد	مقدار	خصوصیات مکانیکی
M695 ASTM D	Kgf/cm ²	974	مقاومت فشاری
M695 ASTM D	Kgf/cm ²	9371	مدول فشاری
M790 ASTM D	Kgf/cm ²	960	مقاومت خمشی
M790 ASTM D	Kgf/cm ²	36454	مدول خمشی
M638 ASTM D	Kgf/cm ²	761	استحکام کششی
M638 ASTM D	Kgf/cm ²	27890	مدول کششی
2240 ASTM D	Shore D	82	سختی
256 ASTM D	Kj/m ²	7850	مقاومت ضربه‌ای
1002 ASTM D	Kgf/cm ²	548	مقاومت چسبندگی (در مقابل نیروی برشی)

جدول 2 مواد تشکیل‌دهنده مصالح سنگی [48]

Table 2 Ingredients of aggregate.

مواد تشکیل‌دهنده	درصد
SiO ₂	96-98.11
Fe ₂ O ₃	0.2-0.7
Al ₂ O ₃	0.51-1.65
CaO	0.4-0.7
Na ₂ O	0.03-0.08
K ₂ O	0.09-0.15

با توجه به درصد حجمی و تنوع مواد ذکر شده در بالا، می‌توان طرح‌های اختلاط زیادی را برای ساخت مخلوط به دست آورد. در این تحقیق، جهت تعیین درصد بهینه مواد تشکیل‌دهنده و دستیابی به بالاترین ویژگی‌های مقاومت در برابر شکست تحت بارگذاری مود I از روش تاگوچی استفاده شد. همچنان که ذکر گردید، این روش از آرایه‌های عمود بر هم برای طراحی تعداد آزمایش‌ها و بهینه‌سازی نتایج استفاده می‌کند. در این راستا، تعداد فاکتورهای کنترلی و سطوح آن‌ها نقش مهمی در انتخاب آرایه مناسب دارند. با توجه به اینکه جمع عدد بیان شده در سطوح عامل‌ها برای هر آزمایش باید برابر 100 درصد باشد (درصد وزنی رزین + درصد وزنی ریزدانه + درصد وزنی سنگدانه درشت = 100٪)، از آرایه L8 جهت تعیین سطوح عامل‌های رزین و پرکننده ریزدانه استفاده شد و درصد سنگدانه درشت با توجه به سطوح رزین و پرکننده ریز تعیین شد. طراحی تاگوچی و تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. جدول 3 محدوده و سطح هر عامل را نشان می‌دهد. ترکیب‌های پیشنهادی برای انجام آزمایش L8 تاگوچی نیز در جدول 4 ارائه شده است که از میان آزمایش این ترکیب‌ها و تحلیل نتایج آزمایش چقرمگی شکست این 8 مخلوط ترکیب بهینه مخلوط بتن پلیمری مقاوم در برابر رشد ترک تعیین می‌گردد.

4- ساخت نمونه و انجام آزمایش چقرمگی شکست

به‌منظور انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست، چندین نمونه تیر خمشی ترک‌دار با ترکیب‌های متنوع مخلوط بتن پلیمری پیشنهاد شده با روش تاگوچی (جدول 4) ساخته شد.

جدول 3 آرایه‌ها سطوح انتخاب شده برای انجام بهینه‌سازی تاگوچی

Table 3 Arrays and selected levels for performing the Taguchi optimization of PC mixture.

پارامترهای مؤثر	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
رزین (%)	21	23	--	--
ریزدانه (%)	25	28	29	31
سنگدانه درشت (%)	بر حسب دو پارامتر دیگر			

نوک ترک، به $\frac{1}{4}$ طول المان منتقل شد. همچنین شرایط تکیه‌گاهی بین تکیه‌گاه و قطعه به صورت تکیه‌گاه جسم صلب تعریف شده است و جابجایی قطعه در جهت بارگذاری مقید شده ولی در جهات دیگر آزاد می‌باشد. همچنین بعنوان مثال مقدار ضریب هندسی برای حالت $a/W=0.3$ و $S/L=0.8$ با استفاده از مدل‌سازی قطعه تیر ترک‌دار با ترک لبه‌ای در نرم‌افزار آباکوس معادل 1.06 محاسبه گردید.

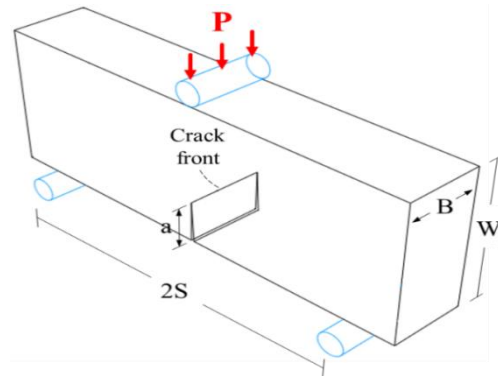


Fig. 1 Single edge notched bending (SENB) sample used to test mode I fracture on polymer concrete mixtures.

شکل 1 نمونه تیر ترک‌دار خمشی استفاده شده برای آزمایش شکست مود I بر روی مخلوط‌های بتن پلیمری.

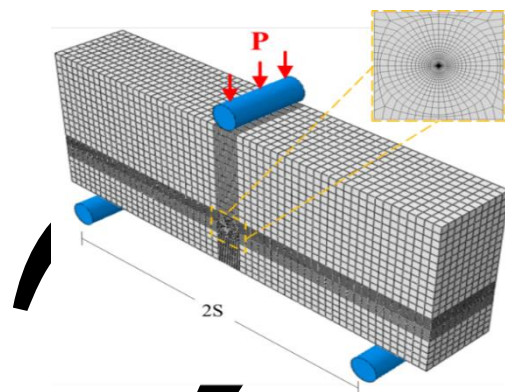


Fig. 2 Finite element model of SENB specimen created in ABAQUS software.

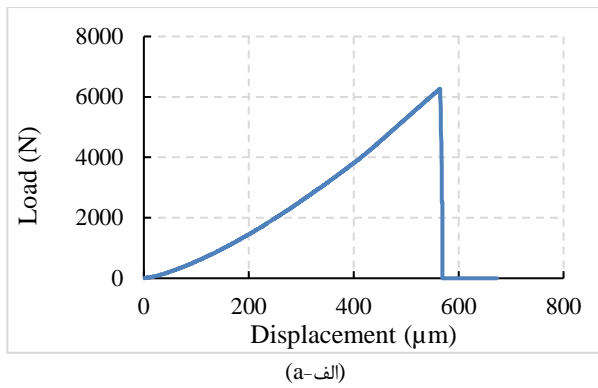
شکل 2 مدل المان محدود قطعه تیر ترک‌دار خمشی ساخته شده در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس.

3- طراحی ترکیبی بتن پلیمری بهینه تاگوچی

سه ماده شامل، رزین اپوکسی بر پایه بیس‌فول اف با هاردنر پلی امین با کد تجاری ام ال-506، سنگدانه سیلیس درشت با اندازه ذرات متوسط 3 میلی‌متر تهیه شده از شرکت صنعت و سنگ کاویان (ایران) و پرکننده سیلیس ماسه ریز با اندازه متوسط ذرات 5.0 میلی‌متر برای ساخت مخلوط بتن پلیمری استفاده شد. خواص مکانیکی رزین و نیز مواد تشکیل‌دهنده مصالح سنگی به ترتیب در جداول 1 و 2 آورده شده است. درصد وزنی این اجزا در محدوده‌های زیر متفاوت است: رزین اپوکسی (15 تا 25 درصد)، سنگدانه‌های درشت (45 تا 55 درصد) و دانه‌های پرکننده ریز (25 تا 35 درصد).

1 Bisphenol F

2 HA-11 hardener



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)



Figure 3 (a) An example of a load-displacement curve, (b) SENB testing setup for conducting fracture test on PC mixture, and (c) the failure path and crack growth

شکل 3 (الف) نمونه‌ای از منحنی بار-جابجایی، (ب) نحوه بارگذاری قطعه تیر ترک‌دار با ترک لبه‌ای ساخته شده از بتن پلیمری و (ج) مسیر شکست و رشد ترک

جدول 5 طراحی آزمایش‌ها تاگوچی L8 و چقرمگی شکست و مقادیر انرژی شکست مود I.

Table 5 Design of Taguchi L8 experiments and fracture toughness and fracture energy values of mode I.

اجرا	رزین اپوکسی (%)	سنگ‌دانه ریز (%)	سنگ‌دانه درشت (%)	نتایج تجربی	
				چقرمگی شکست (MPa.m ^{0.5})	انرژی شکست (J)
1	21	25	54	3.02	2.81
2	21	27	52	4.19	5.12
3	21	29	50	2.28	2.47
4	21	31	48	3.48	3.26
5	23	25	52	2.25	1.91
6	23	27	50	2.06	3.38
7	23	29	48	4.43	5.63
8	23	31	46	4.55	7.09

جدول 4 جدول پیشنهادی روش تاگوچی L8 برای طرح اختلاط بتن پلیمری

Table 4 Design of Taguchi L8 experiments and fracture toughness and fracture energy values of mode I.

اجرا	رزین اپوکسی (%)	سنگ‌دانه ریز (%)	سنگ‌دانه درشت (%)
1	21	25	54
2	21	27	52
3	21	29	50
4	21	31	48
5	23	25	52
6	23	27	50
7	23	29	48
8	23	31	46

مخلوط‌های مختلف بتن پلیمری در داخل قالب‌های مکعب مستطیلی شکل ریخته شده و پس از زمان لازم برای خشک‌شدن و تکمیل فرایند ساخت نمونه (حدود 12 ساعت) از داخل قالب خارج گردیدند. ابعاد کلی نمونه‌های آزمایشی تیر ترک‌دار به شرح زیر است. $L = 200 \text{ mm}$ ، $t = 35 \text{ mm}$ ، $W = 75 \text{ mm}$ ، $S = 160 \text{ mm}$ و $a = 22 \text{ mm}$ برای ایجاد ترک در نمونه‌ها، از یک دستگاه برش با تیغه دورانی از جنس الماس استفاده شد. نمونه‌های آزمایشی تولید شده از جنس بتن پلیمری با استفاده از دستگاه آزمون فشار سروو هیدرولیک با نرخ بارگذاری ثابت 1 میلی‌متر در دقیقه آزمایش شدند. منحنی‌های بار-جابجایی در طول آزمایش‌ها تا شکست نهایی مخلوط‌ها ثبت شد. بار اوج هر منحنی برای تعیین مقدار چقرمگی شکست مود I در معادله (1) قرار داده شد. همچنین سطح زیر منحنی بار-جابجایی تا شکست نهایی نمونه‌ها به‌عنوان شاخص انرژی شکست در نظر گرفته شد. شکل 3 نحوه انجام آزمایش، نمونه‌ای از منحنی‌های بار-جابجایی و مسیر رشد ترک نمونه‌های شکسته شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 3 (ب) مشخص است، ماده بتن پلیمری آزمایش شده رفتار ترد از خود نشان می‌دهد و در نتیجه چقرمگی شکست ماده با استفاده از روش مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) و قراردادن مقدار نیروی بیشینه در معادله 1 قابل محاسبه است. همچنین مسیر شکست نمونه‌ها در حالت کلی یک مسیر مستقیم و در راستای ترک اولیه را دنبال می‌کند اما انحرافات جزئی در مسیر شکست به سبب دوزدن دانه‌های درشت واقع در مسیر رشد ترک نیز مشاهده می‌شود.

5- نتایج و بحث

مقادیر مربوط به چقرمگی شکست و انرژی شکست به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مود I در ترکیب‌های مختلف بتن پلیمری پیشنهاد شده، در جدول 5 نشان داده شده است. در اینجا، تابع هدف "بزرگ‌تر بهتر است" استفاده شد زیرا سطوح بالای انرژی شکست و چقرمگی شکست ترجیح داده می‌شود. تأثیر پارامترهای اصلی و نتایج رتبه‌بندی عوامل به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 و نیز جدول 6 ارائه شده است.

با توجه به مدل انتخاب شده، درصد عوامل مختلف با در نظر گرفتن نسبت بزرگ‌تر به‌عنوان کمیت بهینه انتخاب شد. بر اساس شکل‌های 4 و 5 افزودن رزین انرژی شکست و چقرمگی شکست را افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از سنگ‌دانه ریز با درصد وزنی 31٪ سهم بیشتری در افزایش انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست دارد. این نشان می‌دهد که این سطح مواد پرکننده ریز انتخاب مناسبی برای به حداکثر رساندن مقاومت ترک‌خوردگی در بتن‌های پلیمری مورد بررسی است.

البته باید توجه نمود که جمع سطوح اعلام شده جهت ماکزیمم کردن متغیر خروجی در این پژوهش به صورت اتفاقی 100 شده است و این امکان وجود دارد که با انتخاب سطوح پیشنهادی نتوان به یک مخلوط واقعی دست یافت. در صورت مواجهه با این حالت می‌توان از رتبه‌بندی استفاده کرد. به این معنی که ابتدا سطح متغیرها با رتبه بالاتر تعیین و سپس سطح متغیر با کمترین اهمیت طبق سطوح انتخابی دیگر عامل‌های با رتبه بالاتر تعیین شود.

جدول 6 رتبه‌بندی عوامل اصلی با توجه به میانگین مقادیر ارائه شده در جدول 4 را نشان می‌دهد. میانگین متغیر پاسخ برای هر کدام از سطوح عامل اصلی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{y}_k = \frac{1}{n_k} \sum_i y_{ijk}, \quad j = 1, 2, \dots, m_k \quad (3)$$

که در آن y_{ijk} مقدار متغیر پاسخ i در سطح j و عامل k و n_k نشان‌دهنده تعداد متغیر پاسخ در سطح j و عامل اصلی k و m_k تعداد سطوح عامل اصلی k است. برای مثال رزین اپوکسی دارای 2 سطح است. هر سطح دارای 4 مقدار برای متغیر پاسخ است. میانگین سطح اول برای این عامل (سطح 21 درصد) حاصل میانگین 4 عدد اول متغیرهای پاسخ ارائه شده در جدول 4 می‌باشد.

رتبه‌بندی بر اساس مقدار دلتا صورت می‌گیرد. دلتا نشان‌دهنده دامنه تغییرات میانگین متغیر پاسخ در صورت تغییر سطوح عامل موردنظر است.

$$\Delta = \text{Max} \bar{y}_k - \text{Min} \bar{y}_k \quad (4)$$

بنابراین مقدار دلتای بیشتر نشان می‌دهد، در صورت تغییر سطح عامل موردنظر متغیر پاسخ تغییرات زیادی خواهد داشت و آن عامل تأثیرگذاری بیشتری بر متغیر پاسخ دارد. بر اساس این نتایج، مؤثرترین عامل‌ها بر انرژی شکست در مود I، به ترتیب به صورت درصد سنگ‌دانه درشت، درصد دانه‌های ریز و رزین قرار می‌باشد. در مورد چقرمگی شکست نیز، نتایج به همین صورت می‌باشد. به‌طور کلی بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، درصد دانه‌های درشت مؤثرترین پارامترها بر روی انرژی شکست و چقرمگی شکست بتن پلیمری با رزین اپوکسی هستند.

جدول 6 نتایج رتبه‌بندی بر اساس میانگین برای (الف) انرژی شکست و (ب) چقرمگی شکست مخلوط‌های بتن پلیمری آزمایش شده در مود I

Table 6 Ranking with the mean of means for (a) fracture energy and (b) Fracture toughness of tested PC mixtures under mode I.

ب) انرژی شکست در مود I				الف) چقرمگی شکست در مود I			
سطح	رزین	سنگ‌دانه	سنگ‌دانه	سطح	رزین	سنگ‌دانه	سنگ‌دانه
	اپوکسی	ریز	درشت		اپوکسی	ریز	درشت
1	3.416	2.362	7.087	1	3.242	2.638	4.549
2	4.5	4.247	4.444	2	3.573	3.626	3.954
3	-	4.047	2.922	3	-	3.352	2.67
4	-	5.175	3.516	4	-	4.014	3.219
5	-	-	2.813	5	-	-	3.024
دلتا	1.084	2.813	4.275	دلتا	0.332	1.376	1.879
رتبه	3	2	1	رتبه	3	2	1

6- نتیجه‌گیری

مخلوط بهینه مواد بتن پلیمری ساخته شده از سه جزء (رزین اپوکسی، سنگ‌دانه‌های ریز و دانه درشت) با استفاده از طراحی آزمایشی جهت

مخلوط‌های بتن پلیمری حاوی حداکثر مقدار رزین و حداقل درصد سنگ‌دانه‌های درشت، بالاترین انرژی شکست و چقرمگی شکست را نشان دادند. علت این موضوع می‌تواند به ترشوندگی و اتصال کامل بین رزین و عوامل چسبنده نظیر سنگ‌دانه‌های درشت باشد. به عبارت دیگر وقتی که میزان رزین زیاد و میزان سنگ‌دانه‌ها کم باشد، رزین موجود در مخلوط توانایی آغشته کردن و احاطه کردن پیرامون سنگ‌دانه‌ها را به خوبی پیدا می‌کند و از شکل‌گیری فضای خالی و یا محل‌های عدم اتصال و پیوستگی در مرز دانه‌ها ممانعت به عمل می‌آورد. عدم وجود عوامل مذکور که به نوعی عامل تمرکز تنش و یا ضعف مادی محسوب می‌شوند باعث افزایش مقاومت مخلوط حاصل در برابر رشد ترک می‌گردد. به عنوان نتیجه، به منظور به دست آوردن یک مخلوط با مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی مود I، ترکیب بهینه برای مخلوط ساخته شده از مقدار 31٪ پرکننده‌های ریز، 23٪ رزین، و 46٪ سنگ‌دانه‌های درشت حاصل می‌گردد. همچنین با توجه به تغییرات ارائه شده در شکل‌های 4 و 5 تغییرات سنگ‌دانه درشت بیشترین تأثیر را بر انرژی شکست و چقرمگی شکست دارد. پس از سنگ‌دانه درشت، به ترتیب تغییرات سنگ‌دانه ریز و رزین بر روی چقرمگی شکست مؤثر هستند. به عبارت دیگر بر اساس نتایج حاصله شرایط بهینه و بالاترین میزان پارامتر چقرمگی شکست و انرژی شکست هم‌زمان در یک طرح اختلاط به دست می‌آید و اثر پارامترهای ورودی مخلوط (درصد عناصر تشکیل‌دهنده) بر هر دو خروجی تحقیق حاضر (چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مود I) یکسان است.

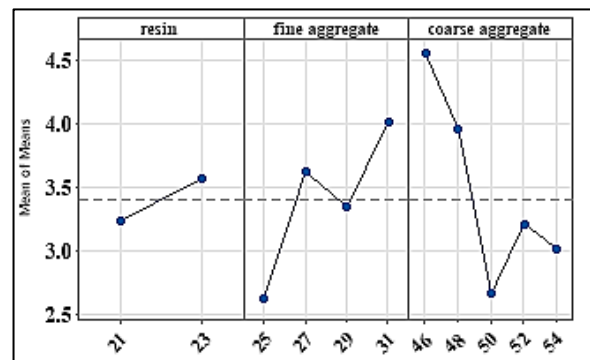


Fig 4 Effects of the main parameters obtained from the Taguchi method on mode I fracture toughness.

شکل 4 اثرات پارامترهای اصلی به دست آمده از روش تاگوچی بر مقدار چقرمگی شکست مود I بتن پلیمری حاصل از آزمایش تیر ترک‌دار خمشی

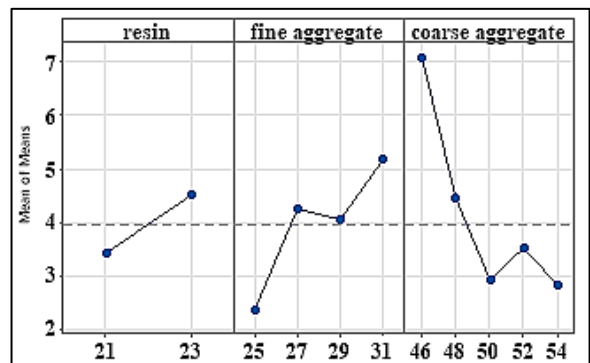


Fig 5 Effects of the main parameters obtained from the Taguchi method on mode I fracture energy.

شکل 5 اثرات پارامترهای اصلی به دست آمده از روش تاگوچی بر مقدار انرژی شکست مود I بتن پلیمری حاصل از آزمایش تیر ترک‌دار خمشی

[14] Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M.R.M., "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology," *Construction and Building Materials*, Vol. 159, pp. 517-529, 2018.

[15] Fakhri, M., Amoosoltani, E. and Aliha, M.R.M., "Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 180, pp. 43-59, 2017.

[16] Chen, G. and Luo, H., "Asymmetric flexural process and fracture behaviors of natural bamboo node with gradient discontinuous fibers," *Composites Communications*, Vol. 24, pp. 100647, 2021.

[17] Mansourian, A., Hashemi, S. and Aliha, M.R.M., "Evaluation of pure and mixed modes (I/III) fracture toughness of Portland cement concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement," *Construction and Building Materials*, Vol. 178, pp. 10-18, 2018.

[18] Li, S., Zheng, T., Li, Q., Hu, Y. and Wang, B., "Flexural and energy absorption properties of natural-fiber reinforced composites with a novel fabrication technique," *Composites Communications*, Vol. 16, pp. 124-131, 2019.

[19] Shokrieh M. M., Heidari-Rarani M., "Investigation of the behavior of reinforced concrete slabs with steel rebar and Pultruded composite grating," In Persian, *Journal of Structure & Steel*, pp. 18-27, 2009.

[20] Aliha, M.R.M., Heidari-Rarani, M., Shokrieh, M.M. and Ayatollahi, M.R., "Experimental determination of tensile strength and K (IC) of polymer concretes using semi-circular bend (SCB) specimens," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 43, No. 6, pp. 823, 2012.

[21] Shokrieh M. M. and Elahi M., "A New Model for Estimating the Yang Modulus of Polymer Concrete Using Micromechanical Relationships," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, pp. 153-162, 2012.

[22] Avci, A., Akdemir, A., & Arikan, H., "Mixed-mode fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 243-247, 2005.

[23] Shokrieh M. M., Rezvani S., Muslimani R., "Mechanical behavior of polyester resin and polymer concrete in static and dynamic loads" In Persian, *Sharif Mechanical Engineering*, pp. 97-105, 2016.

[24] Aliha, M.R.M., "On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 99, pp. 36-43, 2019.

[25] Afroughsabet, V., Biolzi, L. and Ozbakkaloglu, T., "High-performance fiber-reinforced concrete: a review," *Journal of materials science*, Vol. 51, No. 14, pp. 6517-6551, 2016.

[26] Krause, R.F. and Fuller, E.R., "Fracture Toughness of Polymer Concrete Materials Using Various Chevron-Notched Configurations, Chevron-Notched Specimens: Testing and Stress Analysis," *ASTM International*, 1984.

[27] Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M. and Aliha, M.R.M., "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete," *Composites Communications*, pp. 100684, 2021.

[28] Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Nunes, L.C.S., Reis, J.M.L. and da Costa Mattos, H.S., "Mixed mode fracture analysis in a polymer mortar using the Brazilian disk test," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 154, pp. 140-151, 2016.

[29] Roy, R.K., "Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement," *John Wiley & Sons*, 2001.

[30] Kafshgar, A. R., Rostami, S., Aliha, M. R. M., & Berto, F., "Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies," *Procedia Structural Integrity*, Vol. 34, pp. 71-77, 2021.

[31] Mohebi, R., Behfarnia, K. and Shojaei, M., "Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method," *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 792-798, 2015.

دستیابی به بالاترین مقادیر چقرمگی شکست و انرژی شکست تحت بارگذاری مود I بررسی شد. از طرح ترکیبی L8 برای تعیین سطوح رزین و سنگدانه ریز استفاده شد. مقدار سنگدانه درشت با توجه به مقادیر دیگر عوامل تعیین شد. نتایج آزمایش‌ها بر اساس مدل «بزرگ‌تر بهتر» بر روی انرژی شکست و چقرمگی شکست در مود I با در نظر گرفتن عوامل مؤثر ارائه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مخلوط پلیمر بتنی حاوی حداکثر رزین (23٪)، پرکننده ریز (31٪)، سنگدانه درشت (46٪) می‌تواند هم‌زمان بالاترین ویژگی‌های مقاومت به شکست (هم بیشترین چقرمگی شکست و هم بیشترین انرژی شکست) را ارائه دهد. همچنین بر اساس میانگین مقادیر متغیرهای پاسخ، عوامل اصلی رتبه‌بندی شد.

7- منابع

[1] Ferreira, A. J., Tavares, C., & Ribeiro, C., "Flexural properties of polyester resin concretes," *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 459-468, 2000.

[2] Naser, M.Z., Hawileh, R.A. and Abdalla, J.A., "Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review," *Engineering Structures*, Vol. 198, pp. 109542, 2019.

[3] Fowler, D.W., "Polymers in concrete: a vision for the 21st century," *Cement and concrete composites*, Vol. 21, No. 5-6, pp. 449-452, 1999.

[4] San Jose, J.T. and Ramirez Ortiz, J.L., "A study of the mechanical properties of polyester concrete," In *Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction: a vision for the next millennium*, pp. 477-486, 1999.

[5] Heidari-Rarani, M., Aliha, M.R.M., Shokrieh, M.M. and Ayatollahi, M.R., "Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings—An experimental study," *Construction and Building Materials*, Vol. 64, pp. 308-315, 2014.

[6] Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M.R.M., "Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack," *Construction and Building Materials*, Vol. 187, pp. 248-256, 2018.

[7] Najjar, S., Moghaddam, A.M., Sahaf, A. and Aliha, M.R.M., "Low temperature fracture resistance of cement emulsified asphalt mortar under mixed mode I/III loading," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 110, pp. 102800, 2020.

[8] Aliha, M.R.M., Razmi, A. and Mousavi, A., "Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen," *Construction and Building Materials*, Vol. 190, pp. 612-622, 2018.

[9] Fakhri, M., Siyadati, S.A. and Aliha, M.R.M., "Impact of freeze-thaw cycles on low temperature mixed mode I/II cracking properties of water saturated hot mix asphalt: An experimental study," *Construction and Building Materials*, Vol. 261, pp. 119939, 2020.

[10] Azadmanesh, H., Hashemi, S.A.H. and Ghasemi, S.H., "The effect of styrene-butadiene rubber and ethylene vinyl acetate polymers on the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites," *Composites Communications*, Vol. 24, pp. 100656, 2021.

[11] Eghbali, M.R., Tafti, M.F., Aliha, M.R.M. and Motamedi, H., "The effect of ENDB specimen geometry on mode I fracture toughness and fracture energy of HMA and SMA mixtures at low temperatures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 216, pp. 106496, 2019.

[12] Reis, J. M. L., "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete," *Construction and building materials*, Vol. 20, pp. 673-678, 2006.

[13] Reis, J.M.L. and Ferreira, A.J.M., "The effects of atmospheric exposure on the fracture properties of polymer concrete," *Building and Environment*, Vol. 41, No. 3, pp. 262-267, 2006.

- [32] Yildizel, S.A. and Calis, G., "Design and optimization of basalt fiber added lightweight pumice concrete using Taguchi Method," *Revista Romana de Materiale*, Vol. 49, pp. 544-553, 2019.
- [33] Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A. and Ozbakkaloglu, T., "Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation," *Construction and Building Materials*, Vol. 167, pp. 185-196, 2018.
- [34] Tanyildizi, H., "Long-term microstructure and mechanical properties of polymer-phosphazene concrete exposed to freeze-thaw," *Construction and Building Materials*, Vol. 187, pp. 1121-1129, 2018.
- [35] Tanyildizi, H. and Şahin, M., "Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature," *Construction and Building materials*, Vol. 79, pp. 97-103, 2015.
- [36] Tanyildizi, H., "Investigation of carbonation performance of polymer-phosphazene concrete using Taguchi optimization method," *Construction and Building Materials*, pp. 121673, 2020.
- [37] Sharifi, E., Sadjadi, S.J., Aliha, M.R.M. and Moniri, A., "Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method," *Construction and Building Materials*, Vol. 236, pp. 117547, 2020.
- [38] Najafzadehkhoe, A., Habibolahzadeh, A., Qods, F. and Hvizdos, P., "A Taguchi approach to the influence of infiltration parameters on microstructure and properties of W-ZrC composites prepared by the displacive compensation of porosity (DCP) method," *Composites Communications*, Vol. 20, pp. 100356, 2020.
- [39] Dave, S.V. and Bhogayata, A., "The strength oriented mix design for geopolymer concrete using Taguchi method and Indian concrete mix design code," *Construction and Building Materials*, Vol. 262, pp. 120853, 2020.
- [40] Kafshgar, A. R. & Aliha, M. R. M. "The study of fracture energy of hot asphalt mixtures using machine learning algorithms," In Persian, 18th International Conference on Industrial Engineering, 2021.
- [41] Rahmani, H, Yazdani, M, Yazdani, M. & Nikodel, M., "The application of Taguchi method in optimizing the mixing design of semi-structural lightweight concrete made with pumice aggregates," In Persian, *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, 2016.
- [42] Fattahi N. H., Heidari A., Hatefi S. M., Hashempour, M., "The application of Taguchi and RSM serial method in predicting and optimizing multi-objective test design and response level of mechanical properties of colored concrete," In Persian, 11th International Conference on Sustainable Development and Urban Development, 2021
- [43] Mousavi, S. Y., Pourrafi, M., Ganjaei, B., Majreh, A. S., "Investigation of properties of concrete containing silica and zeolite using Taguchi method", In Persian, 3rd International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Sustainable Development and Urban Development, 1400.
- [44] Mousavi, S. Y., Mojreh, A. S., Khosravi, G. B., Pourrafi, M., "Investigation of properties of lightweight structural concrete containing EPS designed using Taguchi method," In Persian, 2nd International Conference on New Research in Civil Engineering, Architecture and Management, 2016.
- [45] Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., "The stress analysis of cracks," *Handbook*, Del Research Corporation, Vol. 34, pp. 635, 1973.
- [46] Shokrieh MM, Heidari-Rarani M, Shakouri M, Kashizadeh E., "Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 8, pp. 3540-3549, 2011.
- [47] Heidari-Rarani M, Ezati N, Sadeghi P, Badrossamay MR., "Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2020
- [48] Heidari-Rarani M, Bashandeh-Khodaei-Naeini K., "Micromechanics based damage model for predicting compression behavior of polymer concretes," *Mechanics of Materials*, Vol. 117, pp. 126-36, 2018.