

# کاربرد روش تاگوچی در بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سبک نیمه‌سازیهی ساخته‌شده با سبکدانه‌های پومیس

حمیدرضا رحمانی (کارشناس ارشد)

محمود یزدانی\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

میثم یزدانی (کارشناس ارشد)

شرکت ژرفا ایستایی

محمدرضا نیکودل (استادیار)

دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)  
دوری ۲-۳، شماره ۱/۴، ص. ۱۰۸-۱۰۱، (یادداشت فنی)

هدف از این پژوهش تعیین ترکیب بهینه در تولید بتن سبک نیمه‌سازیهی با کم‌ترین وزن مخصوص ممکن و مقاومت فشاری مناسب با استفاده از سبکدانه‌های پومیس است. به همین منظور از روش تاگوچی با ۴ عامل تأثیرگذار و ۳ سطح (مقدار) مختلف استفاده شده است. پومیس با دانه‌بندی نوع ۱، پومیس با دانه‌بندی نوع ۲، ماسه و نرمه به‌عنوان عوامل تأثیرگذار و در همه‌ی آزمایش‌ها پومیس با دانه‌بندی نوع ۳ نیز به‌عنوان عامل تکمیلی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی سنگدانه‌ی بتن انتخاب شده است. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> و تجزیه و تحلیل آرایه‌ی متعامده‌ی  $L_8$  (براساس تئوری روش تاگوچی) سطوح بهینه مشخص شده و در نهایت، معیار کیفیت آزمایش تأییدی (نمونه‌ی آزمایشگاهی) و پیش‌بینی روش تاگوچی (معیار کیفیت در حالت بهینه) مورد مقایسه قرار گرفته است. براساس نتایج حاصله، دقت روش طراحی سیستماتیک آزمایش‌های تاگوچی بسیار مناسب ارزیابی شده است.

rahmani.civil@yahoo.com  
myazdani@modares.ac.ir  
meysamyazdani83@yahoo.com  
nikudelm@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: تاگوچی، بتن سبک، پومیس، سبکدانه، طراحی آزمایش‌ها، بهینه‌سازی، نرم‌افزار مینی‌تب.

## ۱. مقدمه

سبکدانه‌ها، استفاده از آنها در بتن به منظور کاهش وزن مخصوص آن است؛ زیرا بتن سبک علاوه بر کاهش بار مرده‌ی ساختمان و کاهش نیروهای وارد به سازه در اثر شتاب زلزله، ویژگی‌هایی همچون عایق صوتی و حرارتی دارد و استفاده از آن باعث صرفه‌جویی در مواردی همچون: هزینه‌ی حمل و نقل، مصرف انرژی، و آهن‌آلات خواهد شد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر استفاده از مقادیر مختلف سبکدانه‌های پومیس با دانه‌بندی‌های متفاوت و ماسه و نرمه در مقاومت فشاری بتن سبک نیمه‌سازیهی حاصل است. از دیدگاه مقاومتی، بتن سبک نیمه‌سازیهی به بتنی گفته می‌شود که وزن مخصوص آن‌ها بین ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و مقاومت فشاری ۷ تا ۱۷ مگاپاسکال دارند. استفاده از بتن‌های مذکور در ساخت قطعات و بلوک‌های پیش‌ساخته‌ی سبک و یا تیغه‌های جداسازو عایق صوتی و حرارتی می‌تواند بسیار مفید باشد.<sup>[۱]</sup> به‌علت کاربرد فراوان پومیس در صنعت ساختمان، بسیاری از پژوهشگران به مطالعه و بررسی خواص استفاده از این نوع سنگدانه در ترکیبات مختلف پرداخته‌اند. در پژوهشی در سال ۲۰۱۳، تأثیر استفاده از مقادیر

سبکدانه‌ها، سنگدانه‌هایی با فضای متخلخل داخلی هستند و از نظر نحوه‌ی تولید به ۲ دسته طبقه‌بندی می‌شوند: سبکدانه‌های طبیعی و سبکدانه‌های مصنوعی. سبکدانه‌های طبیعی عمدتاً در زمره‌ی سنگ‌های آذرین بیرونی قرار می‌گیرند و به‌دلیل فعالیت‌های آتشفشانی و سریع سرد شدن کف ماگما در دوران‌های گذشته‌ی زمین‌شناسی به‌وجود آمده‌اند.<sup>[۱]</sup> سبکدانه‌های مصنوعی در نتیجه‌ی فرایند انبساط ناشی از گرما بر روی مصالح خام طبیعی مانند: رس، شیل، و اسلیت و آزاد شدن گازهای درونی آنها تشکیل می‌شوند.<sup>[۲]</sup> از مهم‌ترین سبکدانه‌های طبیعی می‌توان به پومیس، اسکریا، و توف اشاره کرد. به‌دلیل فعالیت‌های آتشفشانی، معادن مختلفی از پومیس در ایران یافت می‌شوند، که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: معادن پومیس دماوند در شمال، معادن پومیس بستان‌آباد تبریز در شمال غرب، معادن پومیس قروه در غرب، و معادن پومیس تفتان در جنوب کشور. یکی از مهم‌ترین کاربردهای

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۸، پذیرش ۱۳۹۴/۹/۲۹



شکل ۱. سه نوع دانه‌بندی پومیس.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی پومیس.

پومیس با طبقه‌بندی			خصوصیات فیزیکی پومیس
نوع ۳	نوع ۲	نوع ۱	
۸۰۰	۵۱۰	۴۶۰	وزن مخصوص ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )
۸۹۴	۷۷۴	۷۲۶	وزن واحد حجم خشک (kg/m <sup>3</sup> )
۱۲۷۰	۱۱۲۰	۱۰۶۰	وزن واحد حجم اشباع (kg/m <sup>3</sup> )
۱,۴۳	۱,۱۸	۱,۰۹	G <sub>s</sub>
۶۰	۵۳	۵۰	درصد تخلخل
۴۶,۳۰	۴۴,۷۵	۴۲,۲	درصد جذب آب

جدول ۲. دوام پومیس.

شماره‌ی نمونه	شاخص دوام (طی ۲ سیکل) I <sub>d2</sub>
۱	۹۲,۹۴۷
۲	۹۴,۲۱۵
میانگین	۹۳,۵۸

- طبقه‌بندی نوع ۱: پوک‌های معدنی پومیس با اندازه‌ی بین الک ۳/۸" و ۳/۴" (هم‌اندازه‌ی شن درشت)؛
- طبقه‌بندی نوع ۲: پوک‌های معدنی پومیس با اندازه‌ی بین الک ۳/۸" و ۴" (هم‌اندازه‌ی شن ریز)؛
- طبقه‌بندی نوع ۳: پوک‌های معدنی پومیس با اندازه‌ی بین الک ۴" و ۴۰" (هم‌اندازه‌ی ماسه) (شکل ۱).

— خصوصیات فیزیکی پومیس: بر روی هر ۳ نوع دانه‌بندی پومیس، ۱۰ عدد آزمایش وزن مخصوص در حالت خشک و اشباع، آزمایش تعیین G<sub>s</sub> مصالح، درصد تخلخل و درصد جذب آب براساس استاندارد ASTM-C94 و ASTM-C97 انجام شده است.<sup>[۱۲]</sup> جدول ۱، نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که هر یک از اعداد داخل جدول، میانگین نتایج ۱۰ سری آزمایش است.

— دوام پومیس: این آزمایش براساس استاندارد شماره‌ی ASTM-D ۴۶۴۴ انجام شده است.<sup>[۱۳]</sup> که نتایج آنها در جدول ۲ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که سبکدانه‌ی پومیس در رده‌ی سنگ‌های با دوام بسیار کم قرار می‌گیرد.

— ارزش ضربه‌ی پومیس: در این پژوهش ارزش ضربه‌ی ۳ نمونه از سبکدانه‌های پومیس براساس استاندارد BS ۸۱۲ تعیین شده است.<sup>[۱۳]</sup> که نتایج آن در جدول ۳ مشخص شده است.

مختلف پومیس و سیلیکا فوم در مقاومت فشاری و مدول کشسانی بتن‌های پرمقاومت بررسی شده است.<sup>[۴]</sup> برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) نیز به شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده از سنگدانه‌های پومیس آتشفشانی پرداخته‌اند.<sup>[۴]</sup> در مطالعه‌ی دیگر (۲۰۱۲) نیز تأثیر ۳ روش مختلف در پیش مرطوب کردن پومیس در خواص بتن تازه و سخت شده‌ی حاصل از آن مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۵]</sup> سبکدانه‌های پومیس که دارای منشأ آتشفشانی هستند نسبت به سنگ‌های سبک زیست تخریبی لوماشل<sup>۲</sup> با منشأ رسوبی، در استفاده از بتن سبک ارجحیت دارند.<sup>[۶]</sup> در برنامه‌ی آزمایشگاهی پژوهش حاضر، از روش سیستماتیک طراحی آزمایش<sup>۳</sup> تاگوچی به منظور ساخت نمونه‌ها و تعیین مقدار بهینه‌ی مصالح استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش مذکور نسبت به روش‌های معمول آزمایشگاهی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت، این است که شرایط بهینه طوری انتخاب می‌شوند که تأثیر عوامل غیرقابل کنترل، باعث ایجاد کمینه‌ی تغییرات در عملکرد سیستم و کیفیت محصولات خروجی شود.<sup>[۷]</sup> به عبارت دیگر، استفاده از این روش ضمن اینکه بسیار اقتصادی است، منجر به ایجاد طراحی آزمایش بسیار توانمند با حساسیت بسیار کم در برابر عوامل غیرقابل کنترل (عوامل اغتشاش) می‌شود.<sup>[۸]</sup> امروزه در برنامه‌ریزی برای شروع مطالعات آزمایشگاهی به‌طور گسترده‌ی از روش تاگوچی استفاده می‌شود، که در ادامه به نمونه‌هایی از آن اشاره شده است. در مطالعه‌ی صورت‌گرفته در سال (۲۰۰۸) با تعیین ترکیب بهینه‌ی بتن خودمترکم با در نظر گرفتن ۷ عامل تأثیرگذار (سنگدانه‌های درشت، سنگدانه‌های ریز، سیمان، خاکستر بادی، آب، فوق روان‌کننده، و مواد افزودنی آب‌بند) در ۲ سطح مختلف از روش تاگوچی و آرایه‌ی متعامد L<sub>۸</sub> استفاده شده است.<sup>[۹]</sup> همچنین در پژوهشی دیگر (۲۰۱۴)، خصوصیات ترک و مقاومت فشاری بتن سبک‌سازیهی در برابر حرارت‌های بالا با استفاده از آرایه‌ی متعامد L<sub>۱۸</sub> و روش تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفته و درصد خاکستر بادی، درجه حرارت، و میزان سیمان به عنوان عوامل تأثیرگذار انتخاب شده است.<sup>[۱۰]</sup>

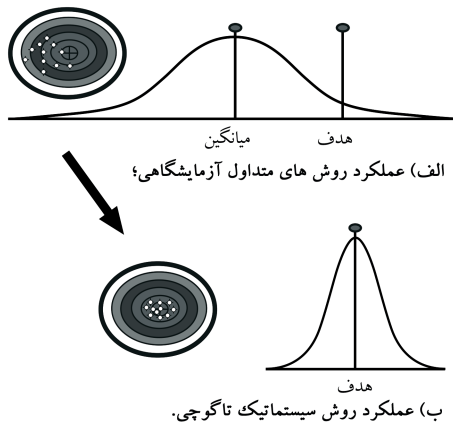
## ۲. مصالح مورد استفاده و خصوصیات آن‌ها

### الف) سبکدانه‌ی پومیس

— پومیس از دیدگاه ماکروسکوپی: پومیس به رنگ‌های روشن که شامل: سفید، سفید متمایل به زرد، خاکستری، خاکستری متمایل به قهوه‌یی، و قرمز کمرنگ مشاهده می‌شود که در اثر انباشته شدن خاکسترهای آتشفشانی و آهسته سرد شدن آنها همراه با انبساط ناشی از حباب‌های به وجود آمده توسط بخار و گازهای موجود در آن به وجود می‌آید.<sup>[۱۱]</sup> مهم‌ترین ترکیبات شیمیایی پومیس تقریباً عبارت‌اند از:<sup>[۱۱]</sup>

SiO <sub>۲</sub> :	٪۵۰
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> :	٪۲۵
K <sub>۲</sub> O + Na <sub>۲</sub> O :	٪۱۲
FerO <sub>۳</sub> :	٪۳
CaO :	٪۲
TiO <sub>۲</sub> ;	٪۰٫۵

— دانه‌بندی پومیس: در این پژوهش پوک‌های معدنی پومیس به منظور استفاده به عنوان سنگدانه‌ی بتن، در ۳ اندازه‌ی مختلف طبقه‌بندی و مطالعه شده‌اند:



شکل ۳. مفهوم روش تاگوچی.

جدول ۴. نحوه انتخاب آرایه های متعامد.

تعداد سطوح		آرایه های متعامد
۵	۲	$L_4(2 \times 3)$
	۲	$L_8(2 \times 7)$
	۲	$L_4(2 \times 11)$
	۲	$L_{12}(2 \times 11)$
	۲	$L_{16}(2 \times 15)$
۵	۲	$L_{16}(4 \times 5)$
۶	۲	$L_{25}(5 \times 6)$
	۲	$L_{27}(3 \times 13)$
	۲	$L_{32}(2 \times 31)$

- کیفیت با به کمینه رساندن انحراف از مقدار مشخصه به بهترین وجه حاصل می شود.
- محصول باید طوری طراحی شود، که در برابر عوامل محیطی غیرقابل کنترل، ایمن باشد (شکل ۳).

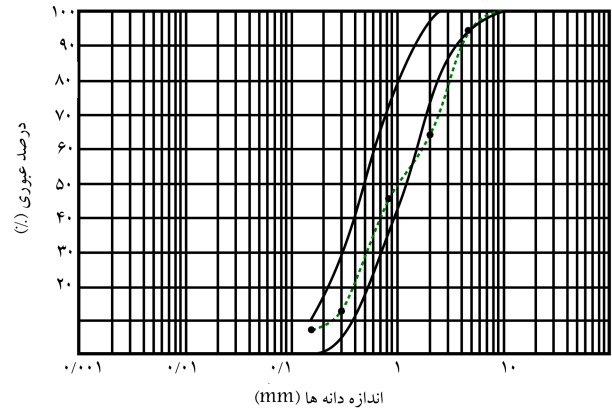
در شکل ۳ الف، که مربوط به روش های متداول آزمایشگاهی است، نتایج علاوه بر اینکه با هدف مورد نظر اختلاف زیادی دارند، پراکنده نیز هستند؛ اما در شکل ۳ ب که نشان دهنده فلسفه روش تاگوچی است، همزمان که نتایج به هدف معین مورد نظر نزدیک تر می شوند، پراکنندگی آنها نیز کمتر می شود. در واقع، منحنی توزیع نتایج در حالت طراحی آزمایش سیستماتیک تاگوچی، بسته تر از حالت روش های رایج آزمایشگاهی است.

--- راهبرد طراحی آزمایش ها: تاگوچی برای ارائه آزمایش هایش، گروه های ویژه ای از آرایه های متعامد (OA) را ترکیب و ایجاد کرده است.<sup>[۱۵]</sup> جدول ۴، نحوه انتخاب این آرایه ها را نشان می دهد. این تذکر لازم است که اعداد داخل جدول، کمینه و بیشینه فاکتورهای کنترلی<sup>۵</sup> قابل استفاده را نشان می دهد. آرایه های متعامد، فرایند طراحی آزمایش ها را سهولت می بخشند.

--- تعریف شاخص کیفیت: برای بیان نحوه عملکرد خوب یک محصول از بعضی مشخصه های قابل اندازه گیری استفاده می شود، که به طور کلی به عنوان شاخص کیفیت هستند. ممکن است شاخص کیفیت کمیته قابل اندازه گیری از

جدول ۳. ارزش ضربه یی پومیس.

شماره ی نمونه	ارزش ضربه یی (A.I.V) (%)
۱	۴۲
۲	۳۸٫۴۶
۳	۵۸٫۸
میانگین	۴۶٫۴۲



شکل ۲. نمودار دانه بندی ماسه ی مصرفی.

### ب) ماسه

ماسه ی مورد استفاده در این پژوهش از منطقه ی شهریار در استان تهران تهیه شده است، که وزن مخصوص ظاهری و جذب آب آن در حدود  $1680 \text{ kg/m}^3$  و  $4.3\%$  بوده است. نمودار دانه بندی ماسه ی مصرفی در شکل ۲ ارائه شده است.

### ج) نرمه

ریزدانه های پوکه های معدنی عبوری از الک ۴۰، که به عنوان پرکننده و افزایش کارایی نمونه ها استفاده شده است. وزن مخصوص این مصالح در حدود  $1400 \text{ kg/m}^3$  است.

### د) سیمان

برای ساخت نمونه های بتنی از سیمان تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه ی سیمان تهران استفاده شده است.

### هـ) فوق روان کننده

در پژوهش حاضر از فوق روان کننده ی NSF (ان.اس.اف) محصول شرکت وندشیمی با پایه ی نفتالینی استفاده شده است.

## ۳. مفهوم تاگوچی

--- فلسفه ی تاگوچی: در ۳ مفهوم اصلی و ساده بنا شده است،<sup>[۱۴]</sup> این مفاهیم عبارت اند از:

- کیفیت باید هنگام تولید طراحی شود، نه اینکه در طی فرایند ساخت محصول بررسی شود.

#### ۴. طرح اختلاط‌های سیستماتیک

-- فرضیات ثابت: بنا به ملاحظات اجرایی در ساخت تمامی نمونه‌ها، عیار سیمان در بتن و مقدار فوق روان‌کننده به ترتیب ۴۰۰ و ۴ کیلوگرم برای هر مترمکعب و نسبت W/C برابر با ۰/۴ ثابت فرض شده و به منظور تعیین ترکیب بهینه‌ی موردنظر، سبکدانه‌ها و سنگدانه‌های معمولی به‌عنوان عوامل اصلی تأثیرگذار انتخاب شده‌اند.

-- عوامل انتخابی (عوامل تأثیرگذار) و سطوح آن‌ها: ۴ عامل با ۳ سطح به شرح جدول ۵ انتخاب شده‌اند.

لازم به ذکر است که در این طراحی در هر سری از آزمایش‌ها، پومیس نوع ۳ به‌عنوان عامل تکمیلی درصد حجمی بتن در نظر گرفته شده است. بدین صورت که اختلاف عدد ۱۰۰ از مجموع درصد حجمی عوامل به‌عنوان درصد حجمی پومیس نوع ۳ منظور شده است. برای مثال، در حالتی که از سطح اول همه‌ی عوامل استفاده شده است، درصد حجمی پومیس نوع ۳ برابر است با: (۶۰٪ = ۵ - ۰ - ۲۰ - ۱۵ - ۱۰۰).

-- انتخاب آرایه‌ی متعامد مناسب: براساس جدول ۴ (ردیف سوم)، تاگوچی برای ۲ الی ۴ عامل با ۳ سطح مختلف (۳<sup>۴</sup>)، آرایه‌ی متعامد L<sub>۹</sub> زیر را پیشنهاد می‌کند:

۴	۳	۲	۱	
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۱	۲
۳	۳	۳	۱	۳
۳	۲	۱	۲	۴
۱	۳	۲	۲	۵
۲	۱	۳	۲	۶
۲	۳	۱	۳	۷
۳	۱	۲	۳	۸
۱	۲	۳	۳	۹

-- تعیین سطوح عوامل در هر سری از نمونه‌ها براساس آرایه‌ی متعامد: سطوح هر عامل در آزمایش‌ها براساس آرایه‌ی متعامد L<sub>۹</sub> مطابق جدول ۶ است. به‌عنوان مثال، در اولین آزمایش از سطح اول تمام عوامل مؤثر استفاده شده است.

-- میزان مصالح مصرفی در ساخت نمونه‌ها: با توجه به درصدهای حجمی مشخص شده در جدول ۶ و داشتن وزن مخصوص مصالح (جدول ۱ و توضیحات مربوط به معرفی مصالح) و از حاصلضرب دو پارامتر ذکرشده، میزان مصالح موردنیاز برای هر آزمایش به‌دست آمده است، که در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۵. عوامل تأثیرگذار انتخابی و سطوح آن‌ها.

عوامل	سطح ۱ (درصد حجمی)	سطح ۲ (درصد حجمی)	سطح ۳ (درصد حجمی)
پومیس نوع ۱	۱۵	۲۰	۲۵
پومیس نوع ۲	۲۰	۲۵	۳۰
ماسه	۰	۵	۱۰
نرمه	۵	۱۰	۱۵

قبیل: وزن، طول، ساعات، و غیره باشد. در بعضی محصولات، از اندازه‌گیری‌های ذهنی نظیر: «خوب»، «بد»، «کم» و «زیاد» می‌توان استفاده کرد.<sup>[۱۴]</sup>

-- روش‌های تحلیل تاگوچی: نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها تاگوچی در چند فاز استاندارد تحلیل می‌شوند. ابتدا، اثرات عوامل (اثرات عمده) ارزیابی و تأثیر عوامل به‌صورت کیفی برآورد می‌شوند. شرایط بهینه و عملکرد در حالت بهینه نیز با بررسی اثرات عامل تعیین می‌شوند. در فاز بعدی، تحلیل واریانس (ANOVA)<sup>۶</sup> بر روی نتایج انجام می‌شود. مطالعه‌ی ANOVA، اثر نسبی عوامل را در بخش‌های مجزا تعیین می‌کند.<sup>[۱۴]</sup>

تاگوچی دو روش متفاوت برای انجام و کامل کردن تحلیل پیشنهاد کرده است. ۱. روش استاندارد، که در آن نتیجه‌ی یک موقعیت آزمایش با مقدار میانگین نتیجه‌ی به‌دست آمده از تکرار یک موقعیت آزمایش به واسطه‌ی اثر عمده‌ی نتایج پردازش می‌شود. ۲. روش استفاده از نسبت سینگال به نویز (S/N) برای مراحل یکسان در تحلیل است، که تاگوچی شدیداً برای آزمایش‌ها همراه با تکرار توصیه می‌کند. تحلیل S/N با استفاده از تغییرات نتایج، بهترین و قویترین شرایط کاری را تعیین می‌کند.

-- تعریف نسبت سینگال به نویز (S/N) (رابطه‌ی ۱):<sup>[۶]</sup>

$$S/N = \log_{10}(MSD) \quad (۱)$$

که در آن، MSD مربع میانگین انحراف از مقدار مشخصه‌ی کیفیت است. میانگین مربع انحرافات (MSD) برای هر یک از این ۳ مشخصه‌ی کیفیت، تعریف متفاوتی دارد:

• برای مشخصه‌ی کیفی «هر چه بزرگتر، بهتر» (رابطه‌ی ۲):

$$MSD = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots)}{n} \quad (۲)$$

• برای مشخصه‌ی کیفی «هر چه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر» (رابطه‌ی ۳):

$$MSD = \frac{[(y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots]}{n} \quad (۳)$$

• برای مشخصه‌ی کیفی «هر چه کوچکتر بزرگ‌تر، بهتر» (رابطه‌ی ۴):

$$MSD = \frac{\frac{1}{y_1} + \frac{1}{y_2} + \frac{1}{y_3} + \dots}{n} \quad (۴)$$

-- الگوریتم طراحی آزمایش‌ها: مراحل طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی:<sup>[۱۴]</sup>

۱. کنکاش (جلسات طوفان ذهنی) مشخصه‌های کیفی و پارامترهای طراحی مهم در ارتباط با محصول/فرایند.
۲. طراحی و هدایت آزمایش‌ها.
۳. تحلیل نتایج برای تعیین شرایط بهینه.
۴. انجام آزمون/آزمون‌های تأیید<sup>۷</sup> براساس شرایط بهینه.

-- نرم‌افزار MINITAB: در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل نتایج طراحی آزمایش‌ها، از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است، که یکی از نرم‌افزارهای جامع آماری است، که از قابلیت‌های طراحی سیستماتیک آزمایش‌های (DOE) است. در این قسمت از نرم‌افزار، روش‌های مختلف DOE ارائه شده است، که از جمله‌ی آنها می‌توان به روش تاگوچی اشاره کرد.

جدول ۶. سطوح هر عامل در آزمایش‌ها براساس آرایه  $L_9$ .

شماره نمونه	پومیس (درصد حجمی)		ماسه (درصد حجمی)	نرمه (درصد حجمی)
	نوع ۱	نوع ۲		
۱	۱۵	۲۰	۰	۵
۲	۱۵	۲۵	۵	۱۰
۳	۱۵	۳۰	۱۰	۱۵
۴	۲۰	۲۰	۵	۱۵
۵	۲۰	۲۵	۱۰	۵
۶	۲۰	۳۰	۰	۱۰
۷	۲۵	۲۰	۱۰	۱۰
۸	۲۵	۲۵	۰	۱۵
۹	۲۵	۳۰	۵	۵

جدول ۷. میزان مصالح به‌کار رفته در هر طرح اختلاط.

شماره نمونه	پومیس ( $kg/m^3$ )			ماسه ( $kg/m^3$ )	نرمه ( $kg/m^3$ )
	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳		
۱	۶۹	۱۰۲	۴۸۰	۰	۷۰
۲	۶۹	۱۲۷	۳۶۰	۸۰	۱۴۰
۳	۶۹	۱۵۳	۲۴۰	۱۶۰	۲۱۰
۴	۹۲	۱۰۲	۳۲۰	۸۰	۲۱۰
۵	۹۲	۱۲۷	۳۲۰	۱۶۰	۷۰
۶	۹۲	۱۵۳	۳۲۰	۰	۱۴۰
۷	۱۱۵	۱۰۲	۲۸۰	۱۶۰	۱۴۰
۸	۱۱۵	۱۲۸	۲۸۰	۰	۲۱۰
۹	۱۱۵	۱۵۳	۲۸۰	۸۰	۷۰

جدول ۸. نتایج وزن مخصوص و مقاومت فشاری نمونه‌ها.

شماره نمونه	میانگین وزن مخصوص خشک شده در هوا ( $kg/m^3$ )		میانگین مقاومت فشاری ( $kg/cm^2$ )	
	۱۱ روزه	۴۲ روزه	۱۱ روزه	۴۲ روزه
۱	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۰۵	۱۴۲
۲	۱۳۱۵	۱۳۱۵	۱۱۲	۱۴۵
۳	۱۳۸۰	۱۳۸۰	۱۳۲	۱۶۰
۴	۱۳۳۰	۱۳۳۰	۱۰۴	۱۳۵
۵	۱۳۵۰	۱۳۵۰	۱۱۰	۱۴۲
۶	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۰۵	۱۴۰
۷	۱۳۳۵	۱۳۳۵	۱۲۰	۱۴۷
۸	۱۲۸۰	۱۲۸۰	۹۰	۱۲۴
۹	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۹۷	۱۲۶

جدول ۹. تعیین معیار مطلوب کیفیت آزمایش‌ها براساس رابطه‌ی ۵.

شماره آزمایش	$\lambda$ (میانگین)	$f$ (نمونه‌ی ۱)	$f$ (نمونه‌ی ۲)	معیار	معیار
۱	۱۳۲۰	۱۴۰	۱۴۴	۱۰۶	۱۰۹
۲	۱۳۱۵	۱۴۴	۱۴۶	۱۱۰	۱۱۱
۳	۱۳۸۰	۱۵۵	۱۶۵	۱۱۲	۱۲۰
۴	۱۳۳۰	۱۳۳	۱۳۸	۱۰۰	۱۰۴
۵	۱۳۵۰	۱۴۲	۱۴۳	۱۰۵	۱۰۶
۶	۱۳۰۰	۱۳۸	۱۴۲	۱۰۶	۱۰۹
۷	۱۳۳۵	۱۴۳	۱۵۱	۱۰۷	۱۱۳
۸	۱۲۸۰	۱۲۳	۱۲۵	۹۶	۹۸
۹	۱۲۳۰	۱۲۲	۱۳۰	۹۹	۱۰۶

## ۵. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل تاگوچی

-- وزن مخصوص و مقاومت فشاری نمونه‌ها: نتایج وزن مخصوص و مقاومت فشاری برای ۹ سری نمونه‌های سیستماتیک ساخته شده با سبکدانه‌های پومیس، به شرح جدول ۸ است.

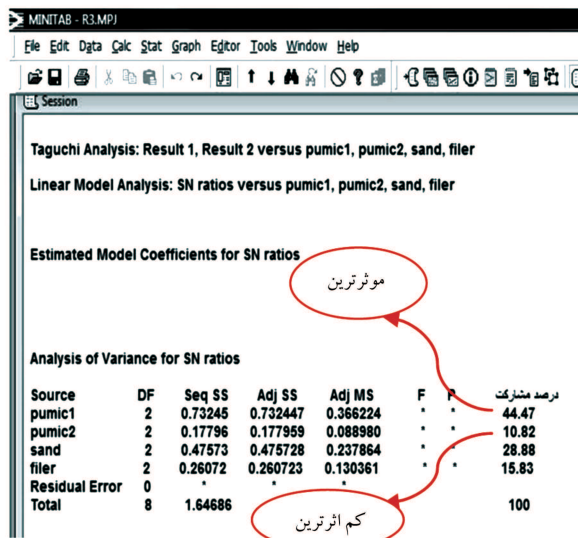
-- تعیین معیار کیفیت: در این مطالعه، معیار مطلوب کیفیت به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف شده است:

$$(5) \quad \text{معیار کیفیت} = \frac{f}{\gamma} * 1000$$

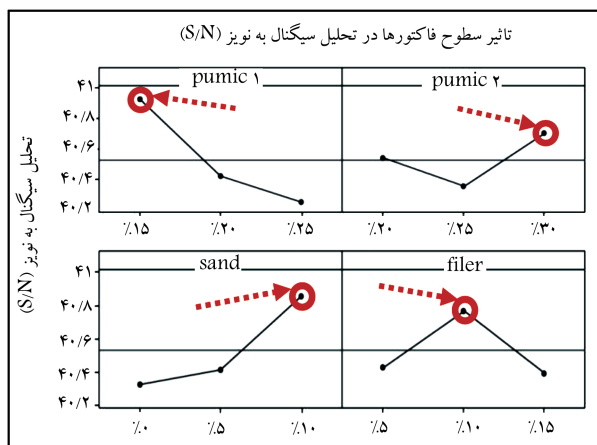
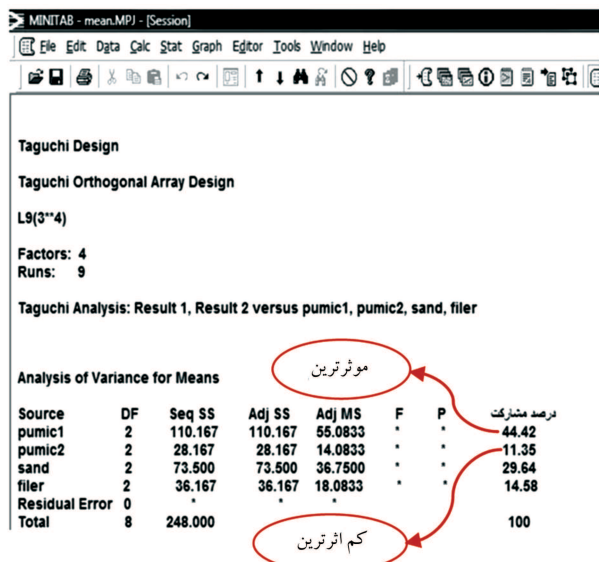
که در آن،  $f$  مقاومت فشاری مکعبی ۴۲ روزه بر حسب ( $kg/cm^2$ ) و  $\gamma$  وزن مخصوص خشک شده در هوا بر حسب ( $kg/m^3$ ) است. هر چه مقدار معیار کیفیت بیشتر شود، مطلوب تر است. در اینجا برای هر طرح اختلاط، دو نمونه‌ی مکعبی در سن ۴۲ روزه تحت آزمایش قرار گرفته و براساس رابطه‌ی ۵، معیار کیفیت هر آزمایش در جدول ۹ نشان داده شده است. در محاسبات، از میانگین وزن مخصوص نمونه‌ها استفاده شده است.

-- جدول واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل ( $S/N$ ): جدول واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل ( $S/N$ ) و نرم افزار Minitab در شکل ۴ نشان داده شده است.

درصد مشارکت برای هر عامل با تقسیم کردن مجموع مربعات خالص عامل موردنظر به  $ST$ ، و ضرب کردن مقدار حاصل شده در عدد ۱۰۰ به دست می‌آید.



شکل ۴. جدول واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل ( $S/N$ ).



شکل ۵. نمودار تأثیر سطوح عوامل در حالت تحلیل (S/N).

درصد مشارکت به صورت  $P$  نشان داده شده و با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$p_m = \frac{S_m}{S_T} \times 100 \quad (6)$$

که در آن،  $S_m$  (رابطه ۷) مربع انحراف عامل مؤثر  $m$  از میانگین و  $S_T$  (رابطه ۸) مجموع مربع انحرافات هستند:

$$S_m = (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (8)$$

که در آنها،  $\bar{Y}$  مقدار میانگین نتایج، و  $Y_i$  مقدار به دست آمده از هر آزمایش است. -- شدت تأثیر عوامل در تحلیل (S/N): با توجه به جدول واریانس و همچنین جدول پاسخ مشخص می‌شود که سبکدانه‌ی پومیس نوع ۱ با سهم مشارکت ۴۴٫۵٪ بیشترین تأثیر و پومیس نوع ۲ با مشارکت ۱۰٫۸٪ کمترین تأثیر را در بهبود معیار کیفیت دارند. نمودار تأثیر سطوح هر یک از عوامل در تحلیل (S/N) در شکل ۵ نشان داده شده است.

-- تعیین ترکیب بهینه در تحلیل (S/N): از نمودار شکل ۵ می‌توان سطوح بهینه‌ی عوامل را تعیین کرد:

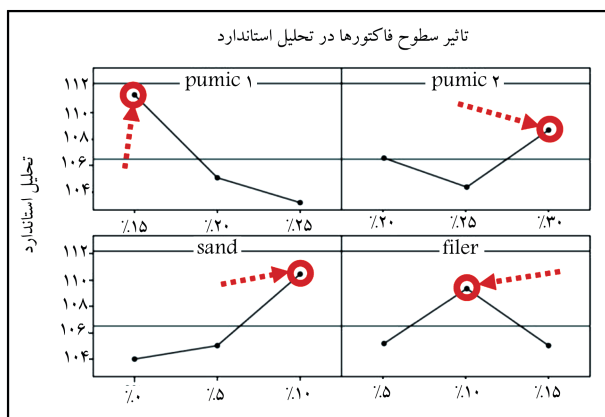
- پومیس نوع ۱: ۱۵٪
- پومیس نوع ۲: ۳۰٪
- ماسه: ۱۰٪
- نرمه: ۱۰٪

با توجه به توضیحات قبلی در مورد عامل تکمیلی پومیس نوع ۳، درصد حجمی بهینه‌ی این نوع سبکدانه، ۳۵٪ خواهد بود.

-- جدول واریانس داده‌ها در تحلیل استاندارد: نتایج تحلیل استاندارد برای تعیین تأثیر عمده‌ی متغیرها با استفاده از نرم‌افزار Minitab در شکل ۶ نشان داده شده است.

-- شدت تأثیر عوامل در تحلیل استاندارد: نتایج تحلیل استاندارد هم متغیر پومیس نوع ۱ را با سهم مشارکت ۴۴٫۴٪ مؤثرترین و پومیس نوع ۲ با مشارکت

شکل ۶. جدول واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل استاندارد.



شکل ۷. نمودار تأثیر عوامل در حالت تحلیل استاندارد.

۱۱٫۳٪ را به عنوان کم‌اثرترین عامل شناسایی کرده است. نمودارهای مربوط به تأثیر عمده‌ی سطوح در شکل ۷ ارائه شده است.

-- تعیین ترکیب بهینه در تحلیل استاندارد: سطوح بهینه‌ی عوامل در تحلیل استاندارد نیز همانند سطوح بهینه در حالت تحلیل (S/N) به دست آمده‌اند:

- پومیس نوع ۱: ۱۵٪
- پومیس نوع ۲: ۳۰٪
- ماسه: ۱۰٪
- نرمه: ۱۰٪

## ۶. پیش‌بینی معیار کیفیت در حالت بهینه و انجام آزمایش تأییدی

-- پیش‌بینی تاگوچی: از قابلیت‌های نرم‌افزار Minitab، پیش‌بینی معیار (شاخص) کیفیت در حالت ترکیب بهینه است، که پس از تعیین سطوح بهینه

در آزمایش تأییدی برابر ۱۱۸/۳ به دست آمده است، که در مقایسه با حالت پیش‌بینی نرم‌افزار، که برابر ۱۲۰/۳ است، قابل قبول است.

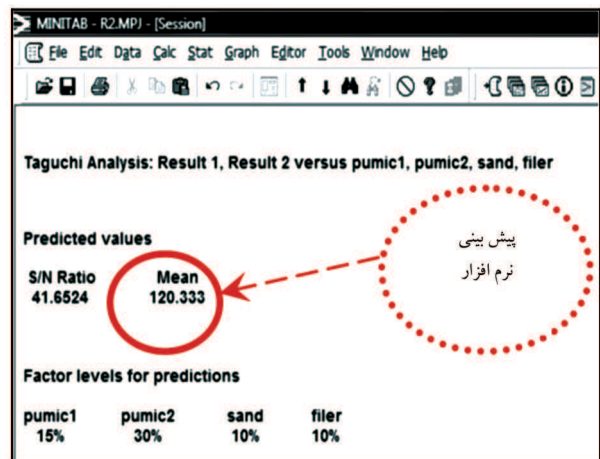
## ۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با در نظر گرفتن ۴ عامل ۳ سطحی، تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف سبک‌دانه‌ی پومیس، ماسه، و نرمه بر روی بتن سبک با استفاده از روش سیستماتیک تاگوچی بررسی شده است. بر این اساس، با انتخاب آرایه‌ی متعامد  $L_9$  و انجام ۹ طرح اختلاط مربوط به آن، ترکیب بهینه‌ی مصالح به صورت زیر به دست آمده است:

- پومیس با دانه‌بندی نوع ۱: ۱۵٪
- پومیس با دانه‌بندی نوع ۲: ۳۰٪
- پومیس با دانه‌بندی نوع ۳: ۳۵٪
- ماسه: ۱۰٪
- نرمه: ۱۰٪

با استفاده از نرم‌افزار Minitab، معیار کیفیت در حالت ترکیب بهینه (در روش تحلیل استاندارد) ۱۲۰/۳ پیش‌بینی شده و نتیجه‌ی آزمایش نمونه‌ی تأییدی ساخته‌شده در آزمایشگاه با تقریب قابل قبولی ۱۱۸/۳ به دست آمده است.

به عنوان مهمترین نتیجه‌گیری این پژوهش می‌توان به برنامه‌ریزی دقیق آزمایشگاهی روش تاگوچی به منظور تعیین ترکیب بهینه و همچنین انطباق قابل قبول نتایج پیش‌بینی شده در این روش با نتایج حاصل از آزمایش تأییدی اشاره کرد، که مزیت و توانمندی این روش را بیش از پیش آشکار می‌کند. از دستاوردهای دیگر روش تاگوچی این است که با استفاده از روش مذکور علاوه بر تعیین ترکیب بهینه، می‌توان تأثیر کلی متغیرها و حتی شدت این تأثیرات را بر روی هدف مورد نظر بررسی کرد. حتی با وجود این، استفاده از روش مذکور، هزینه‌ی (زمانی و ریالی) بسیار کم‌تری نسبت به روش‌های متداول آزمایشگاهی به دنبال دارد.



شکل ۸. پیش‌بینی کیفیت بهینه با استفاده از نرم‌افزار Minitab.

جدول ۱۰. معیار کیفیت آزمایش تأییدی در تحلیل استاندارد.

شماره‌ی نمونه	میانگین وزن مخصوص خشک‌شده در هوا ( $\text{kg/m}^3$ )	میانگین مقاومت فشاری ۴۲ روزه ( $\text{kg/cm}^2$ )	معیار کیفیت (تحلیل)
T۱	۱۳۱۰	۱۵۵	۱۱۸/۳ (استاندارد)

مشخص می‌شود. در این قسمت، عدد معیار کیفیت برای حالت استاندارد ۱۲۰/۳۳۳ و در حالت تحلیل (S/N)، ۴۱/۶۵۳ پیش‌بینی شده است (شکل ۸).

نتیجه‌ی آزمایش تأییدی: به منظور بررسی اعتبار این پیش‌بینی در حالت ترکیب بهینه، یک نمونه‌ی تأییدی با سطوح بهینه مشخص شده ساخته شده است، که نتیجه‌ی آن در جدول ۱۰ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که معیار کیفیت

## پانویس‌ها

1. Minitab
2. Luma shell
3. design of experiment
4. orthogonal array
5. control factors
6. analysis of variance
7. confidence experiments

## منابع (References)

1. Berenjian, J. "Evaluation of physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete and lightweight concrete composed of natural LA aggregate", *Concrete Technology*, **8**, pp. 30-37, (In Persian) (2007).

2. *Physical and Engineering Properties of Clay, Expanded Shale, Clay and Slate Institute*, pp. 110-124 (1971).
3. Saridemir, M. "Effect of silica fumes and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete", *Construction and Building Materials*, **49**, pp. 484-489 (Dec. 2013).
4. Parhizkar, T., Najimi, M. and Pourkhorshidi, A.R. "Application of pumice aggregate in structural lightweight concrete", *Asian Journal of Civil Engineering*, **13**(1), pp. 43-54 (2012).
5. Kabay, N. and Akoz, F. "Effect of pre-wetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate", *Cement and Concrete Composites*, **34**(4), pp. 503-507 (April 2012).
6. Nikoudeh, M.R. "Design criteria for selection of rocks in breakwater structures", Master Thesis, Tarbiat Modares University, (In Persian) (1991).

7. Nuruddin, M.F. and Bayuaji, R. "Application of Taguchi's approach in the optimization of mix proportion for microwave incinerated rice husk ash foamed concrete", *International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJCEE*, **9**(9), pp. 121-129 (2004).
8. Chaulia, P.K. and Das, R. "Process parameter optimization for fly ash brick by Taguchi method", *Materials Research*, **11**(2), pp. 159-164 (2008).
9. Narendra, H. and Muthu, K.U. "Optimization of self compacting concrete mixes using taguchi method", *IC-CBT*, **A**(17), pp. 191-204 (2008).
10. Tanyildizi, H. "Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method", *Construction and Building Materials*, **68**, pp. 565-571 (15 Oct. 2014).
11. Naseri, A, "LWA concrete application in building of segmented maintenance cover of tunnels", Master Thesis, University of Tehran, (In Persian) (2007).
12. ASTM-D4644-04, *Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks*, American Society of Testing Material (2004).
13. BS812, Part112, 1990, *Test Method for Aggregate Impact Value* (2002).
14. Ranjit, R., *A Primer on Taguchi Method*, Competitive Manufacturing Series (1990).
15. Yoyok Setyo, H. and Sabarudin, B.M. "Taguchi experiment design for investigation of freshened properties of self-compacting concrete", *American J. of Engineering and Applied Sciences*, **3**(2), pp. 300-306 (2010).