مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۶، جلد دهم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۸۵ تا ۹۶

بررسی عوامل موثر در بهبود ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌مصنوعی و مقایسه ویژگی های مهندسی سنگ‌مصنوعی ساخته شده با دو نمونه سنگ طبیعی

طیبه میرجلیلی [۱]، ماشااله خامه‌چیان*[۲]، محمدرضا نیکودل [۳]

دریافت مقاله: ۹۵/۰۶/۰۲ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۳۰

چکیده

در تولید سنگ مصنوعی از پودرسنگ و سنگ‌دانه و مقدار کمی سیمان یا رزین و دیگر مواد شیمیایی استفاده می شود. در این تحقیق سنگ‌دانه‌های کربناته (در اندازه۰/۰۷۵ تا ۱۹میلی‌متر)، پودرسنگ و سیمان سفیددر مرحله اول مخلوط و مرطوب شده، در مرحله بعد برای شکل‌گیری نمونه در قالب مکعبی، تحت سه فرآیند فیزیکی ویبره، خلاء و فشار، متراکم شده‌اند. هدف این تحقیق بررسی تاثیر فشار و خلاء در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و همچنین مقایسه ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی ساخته شده با دو نمونه سنگ طبیعی شامل سنگ‌چینی (سنگ اولیه در تولیدسنگ-دانه) و تراورتن (سنگ متخلخل و سبک ساختمانی) می‌باشد، نتایج نشان داد سنگ‌مصنوعی ساخته شده از نظر توصیف ویژگی های مهندسی مشابه کیفیت سنگ تراورتن می‌باشند بنابراین با توجه به ویژگی‌های مهندسی در محدوده قابل قبول، می توان از مخلوط سنگ‌دانه– سیمان برای تولید سنگ‌های مصنوعی قالب‌ریزی شده با ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: *سنگ‌مصنوعی، فشار، خلاء، سنگ‌دانه.*

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس mirjalilitayebeh@gmil.com
۲. استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، khamechm@modares.ac.ir
۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، nikudelm@modares.ac.ir
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

ضایعات معدنی را می‌توان به عنوان مواد باقی مانده، باطله‌ها و یا مواد بی‌ارزشی که بعد از استخراج و فرآوری مواد برای تولید محصول با ارزش بوجود می‌آیند در نظر گرفت (Mitchell et al., 2004). از ضایعات سنگ ساختمانی طبیعی و بلوک‌های کیفیت پایین معدن در تولید سنگ‌مصنوعی می‌توان استفاده کرد. به علت فشردگی در فرایند ساخت، سنگ‌های مصنوعی دارای تخلخل ناچیز، درصد جذب آب پایین، مقاومت مکانیکی و دوام بالا هستند، سنگ‌های مصنوعی، مصالح ساختمانی همگن، سالم و زیبایی هستند که کاربرد گسترده‌ای در بخش ساخت و ساز ساختمان دارند.

سنگ‌مصنوعی از ترکیب سنگ‌دانه‌های طبیعی با مواد افزاینده دیگر به دست می‌آید. این سنگ‌ها از ترکیب سنگ‌دانه‌های سنگ‌های ضایعاتی، پودرسنگ، چسباننده‌ها، رنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌ها ساخته می‌شوند. سنگ‌دانه‌ها در اندازه‌های مختلف معمولا در حد ماسه هستند. انتخاب رنگ، جنس، اندازه و دانه‌بندی آن‌ها بستگی به سیمای سنگ و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محصول دارد. رنگ‌دانه‌ها به همراه رنگ طبیعی سنگ‌دانه‌ها رنگ‌های جذاب زیبایی را به وجود می‌آورند. به عنوان چسباننده‌از چسب‌های ارگانیک (رزین‌های ساختاری) و هم چسباننده‌های غیر ارگانیک (سیمان) استفاده می‌شود، البته هر چسباننده ویژگی‌های خاص خود را به محصول می‌دهد. افزودنی‌ها به مقاصد مختلف به مقدار بسیار کم به مخلوط اضافه می‌شوند. این سنگ‌هادرمحیط خلاءفشرده و ویبره می‌شوند. عملیات مخلوط سازی تحت خلاء همراه با فشار و ویبره برای سنگ‌دانه‌ها این امکان را می‌دهد که بسیار نزدیک به هم قرار گرفته و بهترین آرایش مواد جامد مخلوط را داشته باشند، بنابراین مقدار مواد چسباننده که سنگ‌دانه‌ها را در بر می‌گیرد بسیار کاهش می‌یابد و این عاملی است که ویژگی‌های مهندسی سنگ را بهبود می‌بخشد. فرایند فشرده‌سازی تحت خلاء هر گونه فضای ماکروسکوپی در مخلوط را به فضای میکروسکوپی که توسط چسباننده‌ها پر خواهند شد تبدیل می‌کند و درصد جذب آب را کاهش می‌دهد. مقادیر و اندازه‌های درستی که در ترکیب مواد رعایت می‌شود از هر گونه جدایش و ترک‌های ریز احتمالی موجود در سنگ جلوگیری می‌نماید (شرکت شهرک‌های صنعتی خراسان، ۱۳۸۷).

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر فرآیندهای فشار و خلاء در هنگام ساخت محصول سیمانی قالب‌ریزی شده (سنگ-مصنوعی) و همچنین مقایسه ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با دو نمونه سنگ طبیعی شامل سنگ-چینی (سنگ اولیه در تولید سنگ‌دانه) و تراورتن (یک سنگ متخلخل و سبک ساختمانی) مورد مقایسه قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

اقدامات انجام شده در راستای این تحقیق عبارتست از: ساخت دستگاه‌های مورد نیاز، تعیین منحنی دانه‌بندی نمونه، انتخاب طرح اختلاط مناسب، ساخت نمونه در شرایط ویبره، فشار و خلاء متفاوت و ارزیابی خصوصیات نمونه.

۲- ۱. دستگاه‌های مورد نیاز

برای ساخت سنگ‌مصنوعی در آزمایشگاه از دستگاه‌های تراکم، خلاء و ویبره استفاده شد. علاوه بر این برای ساخت سنگ‌مصنوعی به قالبی نیز نیاز هست که قالب مورد نظر باید به گونه‌ای باشد که بتواند فشار وارد شده را تحمل کند و همچنین خروجی‌هایی در آن تعبیه شود تا بتواند هوا و آب اضافی بین مصالح را زهکشی کند. علاوه بر این قالب مورد نظر باید به گونه‌ای باشد تا نمونه را بعد از ساخت، به راحتی بتوان از قالب جدا کرد. تصاویر مربوط به قالب و دستگاه‌ها در شکل‌های ۱و ۲ نشان داده شده است.

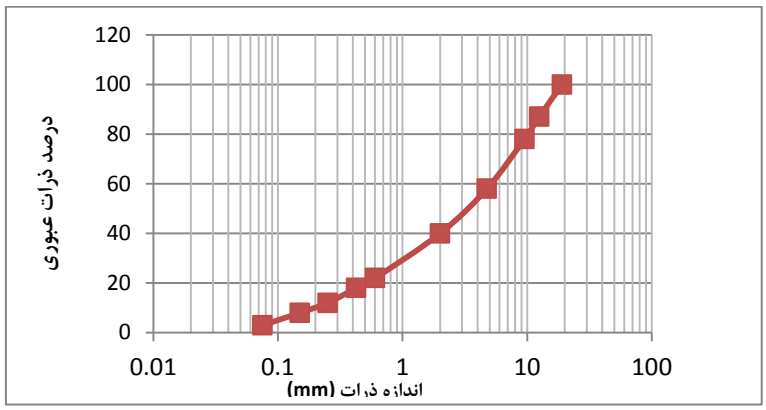
۲- ۲. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه

در این تحقیق سنگ‌دانه‌ها و پودرسنگ حاصل از خردکردن سنگ اولیه کربناته (سنگ‌چینی) در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس با دستگاه سنگ شکن فکی در اندازه‌های شن و ماسه و پودرسنگ تهیه شدند. منظور از دانه‌بندی، چگونگی توزیع قطر ذرات موجود در هر مخلوط بر حسب درصد وزنی است. توزیع اندازه ذرات عموماً به صورت یک منحنی به نام منحنی دانه‌بندی نشان داده می‌شود

(رحیمی، ۱۳۸۸). دانه‌بندی مصالح طبق استاندارد ASTM C 136-01 به وسیله الک انجام شده است نتایج در منحنی دانه-بندی شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۱. قالب مکعبی ساخته شده برای ساخت سنگ-مصنوعی.

شکل ۲. دستگاه‌های موجود در آزمایشگاه در تهیه سنگ‌مصنوعی و قالب مکعبی ساخته شده.



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های برای ساخت سنگ‌مصنوعی.

۲-۳. *تعیین طرح اختلاط سنگ‌مصنوعی*

طرح اختلاط سنگ‌مصنوعی به این مفهوم است که به چه نسبتی اجزاء سنگ‌مصنوعی (سیمان، آب، شن و ماسه) مخلوط شوند تا سنگ‌مصنوعی ساخته شده دارای ویژگی (از نظر رسیدن به مقاومت مورد نظر، تامین دوام کافی و کارائی و روانی مورد نظر) مشخصی شود. ویژگی مقاومتی و دوام مستقیماً متأثر از توزیع درصد منافذ در خمیر سیمان، سنگ‌دانه و سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه می‌باشد. از طرف دیگر ساختار منافذ و نحوه توزیع آن‌ها متأثر از عوامل متعددی است که یکی از آن‌ها عیار سیمان موجود در مخلوط است. بنابراین عیار سیمان نقش بسیار مهمی را در مقاومت و دوام ایفا می‌کند (Güneyisi et al., 2005) مقدار سیمان زیاد باعث افزایش حجم خمیر سیمان می‌شود که مهمترین عامل تخلخل است، که باعث افزایش حجم کل منافذ می‌شود (Kolias and Georgiou, 2005) اگر سیمان موجود در مخلوط ناکافی باشد، مخلوط بعد از ساخت به درستی متراکم نمی‌گردد و بافتی لانه زنبوری با سایر معایب سطحی در آن به وجود می‌آید که موجب تسهیل راه یابی عوامل آسیب رسان به درون آن می‌گردد (Ahmad, 2003). مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد. که بیشترین

مقاومت‌ها در نسبت های آب به سیمان کم و زمان ۲۸ روز بعد از ساخت حاصل می‌شود (Alwode et al., 2000). مقاومت فشاری علاوه بر نسبت آب به سیمان، به اندازه سنگ‌دانه‌ها نیز بستگی دارد (Chi et al., 2003) کارائی و روانی مخلوط تنها به مقدار آب بستگی دارد. مقدار آب به نوع دانه‌ها، توزیع اندازه ذرات، شکل و بافت دانه‌ها، و مقدار ریز دانه بستگی دارد (Topličić- Ćurčić et al.,2010). با توجه به بررسی‌های انجام شده طرح اختلاط سنگ‌مصنوعی موجود در بازار محرمانه می‌باشد، در این تحقیق برای انتخاب طرح اختلاط سنگ‌مصنوعی سعی شده است بر اساس روش آئین نامه ACI-211 (جدول ۱) طرحی انتخاب گردد که برای سنگ‌مصنوعی قابل کاربرد باشد. دستیابی به طرحی که برای سنگ‌مصنوعی مناسب باشد بر پایه ساخت مخلوط‌های مختلف آزمایشی برای ویژگی‌های از پیش تعیین شده شامل تخلخل ومقاومت فشاری، تهیه و آزمایش شده‌اند و در نهایت یک طرح انتخاب شد که در جدول ۱ مشخصات طرح ارائه شده است. این طرح انتخابی بر اساس یک طرح تجربی و بیشتر به منظور امکان ساخت سنگ‌مصنوعی بوده است با وجود تایید شدن این طرح چیزی که بیش از همه اهمیت داشت، انتخاب درست اندازه سنگ‌دانه‌ها، بررسی مقدار سیمان، میزان تخلخل، درصد جذب آب، مقدار مقاومت و تایید آن از نظر ساخت سنگ‌مصنوعی بود که این طرح نسبت به دیگر طرح‌ها از نظر تخلخل و مقاومت برای ساخت سنگ-مصنوعی مناسب تشخیص داده شد.

جدول ۱. طرح اختلاط‌سنگ‌مصنوعی با نسبت آب به سیمان ۰/٤٥.

نام نمونه	سیمان (Kg/m3)	آب (Kg/m3)	ماسه (Kg/m3)	شن (Kg/m3)	پودرسنگ(Kg/m3)
سنگ‌مصنوعی	٤٢٥	۱۹۰	٦۳۸/٤۱	۱۰٥٥/۳۹	٥۲/۳۸

۲-٤. تکنولوژی ساخت سنگ‌مصنوعی

فشار تراکمی، ویبره و خلاء، از عوامل موثر در تکنولوژی ساخت سنگ‌مصنوعی و باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشند. اگر چه فشار تراکمی تعیین کننده اصلی تراکم مصالح در قالب سنگ‌مصنوعی می‌باشد ولی شرایط ویبره و خلاء در تراکم تاثیر دارند. علاوه بر فشار تراکمی بالا، ویبره هم لازم است، تا دانه‌ها با دقت بیشتر فشرده شوند (ویبره باعث تنظیم جهت‌گیری سنگ‌دانه‌ها برای قالب‌بندی در یک ساختار متراکم‌تر می‌باشد)، اعمال فشار بیش از حد موجب له شدن و ایجاد ترک در سنگ‌دانه‌ها می‌شود. فرایند فشرده سازی تحت خلاء هر گونه فضای ماکروسکوپی در مخلوط را به فضای میکروسکوپی که توسط چسباننده‌ها پر خواهند شد تبدیل می‌کند (Lee et al., 2008).

اثر خلاء در سنگ‌مصنوعی، در هنگام متراکم کردن هوای محبوس شده بین سنگ‌دانه‌ها را به راحتی نمی‌توان حذف کرد، فقط زمانی که تراکم و خلاء همزمان با هم انجام شود هوای بین سنگ‌دانه‌ها را می‌توان به راحتی حذف کرد. حذف کردن هوا باعث جلوگیری از تشکیل خلل و فرج بین سنگ-دانه‌ها و کاهش جذب آب شده، در نتیجه مقاومت فشاری سنگ‌مصنوعی افزایش می‌یابد. ولی با افزایش خلاء بیش از حد، تعداد زیادی روزنه در نمونه تشکیل شده و باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود (Lee et al., 2008).

۳. مصالح مورد استفاده

مواد مورد استفاده برای ساخت سنگ‌مصنوعی سیمان سفید، سنگ‌دانه و پودرسنگ می‌باشد با توجه به مطالعه میکروسکوپی در شکل ٤ نشان داد سنگ اولیه در تولید سنگ‌دانه و پودرسنگ از نوع سنگ آهک دگرگونی با ترکیب کانی شناسی کربنات کلسیم (CaCO3) است. نگ‌آهک با توجه به مزایای سنگ‌دانه (شامل استحکام خوب، احتمال کم واکنش قلیایی- سیلیس و انقباض خشک کننده در بتن) در صنعت ساخت و ساز کاربرد زیادی دارد (Carlos,2010) برای ساخت نمونه سنگ‌های مصنوعی، سنگ‌دانه‌ها با اندازه-

های در نظر **گرفته** شده در طرح اختلاط با دانه‌بندی یکسان تهیه شدند. پودرسنگ برای تولید سنگ‌مصنوعی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های به کار رفته در مخلوط دارای سطح بیشتر و در نتیجه مقدار جذب آب زیادی می باشند، با فشرده کردن مواد مخلوط می توان مقدار آب مورد نیاز را حداقل کرد (Galetakis and Raka, 2004). ویژگی‌های مهندسی سنگ-مصنوعی به ویژگی‌های فیزیکی مواد پرکننده (Bilgin et al., 2013) و واکنش‌های سطحی و جذب آب سنگ‌مصنوعی به ترکیب شیمیایی، اندازه ذرات و میزان پودرسنگ بستگی‌دارد (Sakai, 2000).

٤. ساخت نمونه سنگ‌های مصنوعی

برای ساخت سنگ‌مصنوعی بر اساس طرح اختلاط آئین نامه ACI-211 با توجه به جدول ۱، مصالح مورد نظر وزن شده، با هم مخلوط و سپس مخلوط توسط اسپری، با مقدارآب مورد نیاز مرطوب و در درون قالب فلزی مکعبی با سطح داخلی ۱۵×۱۵cm و ارتفاع ۱۵cm ریخته و ویبره شده و در مرحله بعد مخلوط تحت فشار افزایشی ۲/۲۲ تا ۱۵/۵ مگاپاسکال براساس ساخت سنگ‌مصنوعی موجود در بازار، همراه با خلاء قرار گرفت (سنگ‌مصنوعی در ابتدا حدود ۱۵ دقیقه در فشار ۲/۲۲ و بعد حدود ۱۰ دقیقه در حالت خلاء و در مرحله دوم حدود ۱۵ دقیقه تحت فشار ٤/۲۲ و حدود ۱۰ دقیقه تحت خلاء و در مرحله سوم حدود ٦ ساعت تحت فشارهای ٦، ۸ تا ۱۰ در نهایت حدود ۱۷ ساعت تحت فشار ۱۵/۵مگاپاسکال). بعد از ساخت، نمونه از قالب خارج و برای عمل‌آوری در درون پلاستیک در دمای اتاق تا ۲۸ روز قرار گرفت.

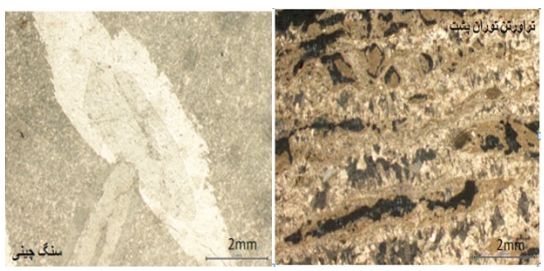
۵. آزمایش‌های انجام شده

۵-۱. بررسی‌های پتروگرافی

بررسی‌های پتروگرافی نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی-شناسی و منشا سنگ می‌دهند، بلکه در ارزیابی پتانسیل انحلال‌پذیری و زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی نیز یک ابزار مهم هستند(Dreesen and Dusar, 2004). بافت یک سنگ، همواره بخشی از توصیفات مربوط به یک سنگ را شامل می‌شود. شکل ظاهری، اندازه و ابعاد، مشخصات سطح ذرات و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌دانه‌ها از جمله ویژگی‌های یک مصالح سنگی است که در محیط همگن و یک پارچه تاثیرگذار است و همچنین مطالعاتی از بررسی تاثیر کانی‌شناسی سنگ‌دانه‌ها بر کیفیت بتن انجام و گزارش شده است (شریفی، ۱۳۸۷). در این تحقیق با تهیه مقطع نازک از نمونه‌ها، ترکیب کانی‌شناسی آنها در زیر میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آنها در جدول ۲ و شکل ٤ ارائه شده است. سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه، سنگ‌های ساختمانی کربناته از معادن جنوب‌غرب یزد می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات میکروسکوپی نمونه‌های سنگ طبیعی کربناته.

نام زمین شناسی	رده سنگ	مشخصات میکروسکوپی
تراورتن لایه‌ای	رسوبی	تخلخل زیادی در متن سنگ در امتداد سطوح لامینه‌ها و بین لامینه‌ها مشاهده می‌شود. بلورها از نوع کربنات کلسیم، نام سنگ تراورتن و دارای بافت شیمیایی است.
سنگ‌چینی ده‌بالا	دگرگونی	فسیل‌های لاله‌وش در حدود ۵ تا ۷ درصد و بقیه متن سنگ بلورهای دانه متوسط (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون) از کلسیت اسپاری تشکیل شده است.



شکل ٤. تصاویر میکروسکوپی از مقاطع سنگ‌های ساختمانی طبیعی تراورتن لایه‌ای و سنگ‌چینی.

۵-۲. تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مقاومت

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها (سنگ‌مصنوعی‌های ساخته شده و دو نمونه سنگ طبیعی ساختمانی) که شامل وزن واحد حجم غوطه‌وری (γsub)، خشک (γd) و اشباع (γsat)، درصد تخلخل (n)، درجه پوکی (e) و درصد جذب آب (Iv) می‌باشد از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است. مقاومت فشاری به سن ۲۸ روز، یک پارامتر بحرانی برای مصالح ساختمانی می‌باشد (Poon et al., 2002). مقاومت فشاری تک‌محوری براساس ASTM D2938 و مقاومت کششی برزیلین ASTM D3967 به سن ۲۸ روز بعد از ساخت تعیین شده است.

۵-۳. تعیین شاخص دوام وارفتگی

شاخص دوام وارفتگی یک پارامتر مهندسی مهم در ارزیابی زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است. با توجه به این که کربنات‌کلسیم کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه‌های مورد مطالعه (سنگ‌های طبیعی سنگ‌چینی، تراورتن و سنگ‌مصنوعی) می‌باشد. فقط آزمایش دوام وارفتگی در محلول اسیدی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌ها آزمایش دوام وارفتگی، براساس استاندارد ISRM (1981) و ASTM D4644 – 08 برای نمونه سنگ‌های طبیعی (سنگ چینی و تراورتن) و سنگ مصنوعی ساخته شده به سن ۲۸ روز بعد از ساخت تا ۱۰ چرخه در محلول اسید سولفوریک با PH=5.25 انجام شد. شکل ۵ دستگاه دوام وارفتگی و برخی نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش را نشان می‌دهد.

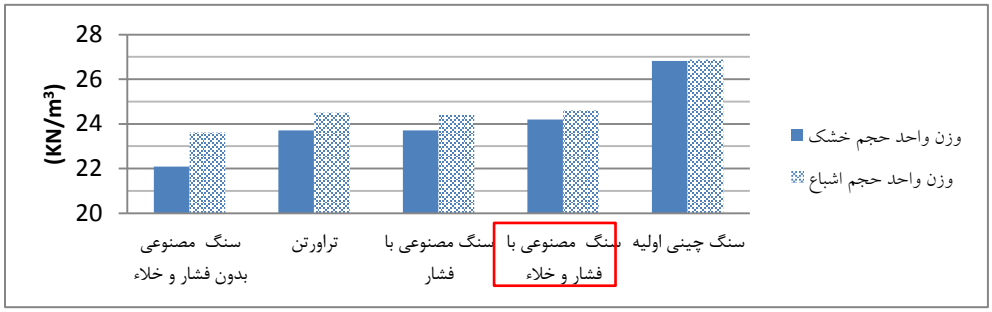
شکل ۵. دستگاه دوام وارفتگی و نمونه‌های تهیه شده از سنگ‌مصنوعی و سنگ طبیعی شامل تراورتن و سنگ‌چینی.

٦. نتایج آزمایش و آنالیز داده‌ها

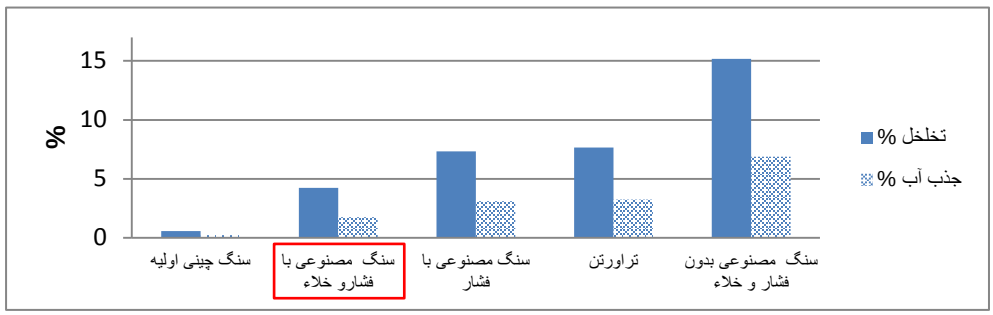
در مرحله اول به منظور بررسی فرآیندهای فیزیکی شامل فشار و خلاء در هنگام ساخت، مقادیر هر یک از ویژگی‌های فیزیکی شامل وزن واحد حجم خشک و اشباع، جذب آب و تخلخل بر روی نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص شد اعمال فشار و خلاء نقش موثری در بالا بردن بهبود ویژگی‌های فیزیکی شامل کاهش تخلخل و درصد جذب آب دارند هر چه درصد جذب آب افزایش یابد دوام کاهش می یابد. بنابراین سنگ‌های ساختمانی با جذب آب کمتر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. در مرحله دوم بعد از تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی، ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی با دو نمونه سنگ ساختمانی طبیعی مورد مقایسه قرار گرفت. که شامل سنگ چینی (از نوع سنگ‌ساختمانی دگرگونی ریزبلور و بدون استیلولیت و درزه) سنگ اولیه مصرفی در ساخت سنگ مصنوعی و دیگری سنگ تراورتن که سنگ ساختمانی سبک و متخلخل می‌باشد. نتایج ویژگی‌های فیزیکی در جدول ۳ و نتایج مقاومت و دوام سنگ‌های مصنوعی و طبیعی در جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ۳. میانگین نتایج تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های سنگ‌مصنوعی و طبیعی.

نام سنگ	γ_d (kN/m^3)	γ_{sub}(kN/m^3)	n %	Iv %
سنگ‌مصنوعی بدون فشار و خلاء	۲۲/۰۹	۲۳/٦۰	۱٥/۱٦	٦/۸٦
سنگ‌مصنوعی با فشار	۲۳/۷	۲٤/٤	۷/۳۳	۳/۱۱
سنگ‌مصنوعی با فشار و خلاء	۲٤/۲	۲٤/٦	٤/۲۳	۱/۷٥
سنگ طبیعی اولیه (سنگ‌چینی)	۲٦/۸۲	۲٦/۸۸	۰/٥۸	۰/۲۲
سنگ طبیعی تراورتن	۲۳/۷	۲٤/٥	۷/٦٦	۳



شکل ٦. نمودار ستونی وزن واحد حجم نمونه‌های سنگ‌مصنوعی و طبیعی.



شکل ۷. نمودار ستونی تخلخل و جذب آب نمونه‌های سنگ‌مصنوعی و طبیعی.

جدول ٤. نتایج مقاومت و دوام سنگ‌مصنوعی و سنگ‌های طبیعی

نام سنگ	مقاومت فشاری σ_c(MPa)	مقاومت کششی σ_t(MPa)	شاخص دوام (Id_{10})
سنگ طبیعی اولیه (سنگ‌چینی)	۱۰٦	۱۵/۵	۹۹/۱
سنگ‌مصنوعی باویبره، فشار و خلاء	۲۷/۱	۱۳/۹۳	۹۸/۱۳
سنگ طبیعی تراورتن	۳۵/۱	۸/۷۵	۹۷/٦۲

٦-۱. بررسی عوامل موثر در بهبود ویژگی‌های فیزیکی سنگ-مصنوعی

برای بررسی تاثیرفرآیند خلاء و فشار، ۳ نمونه سنگ‌مصنوعی که نمونه اول بدون فرآیند خلاء و فشار، نمونه دوم با اعمال فشار و نمونه سوم با اعمال دو فرآیند خلاء و فشار ساخته شد، در ساخت سه نمونه‌ی مذکور با توجه به جدول۵ از یک طرح اختلاط، یک نوع سیمان سفید، سنگ‌دانه‌ها از یک جنس (سنگ‌چینی) و دانه‌بندی مشابه استفاده شده است. با توجه به بررسی تاثیر خلاء و فشار در ویژگی‌های فیزیکی شکل ٦ تفاوت بین وزن واحد حجم خشک و اشباع سنگ‌مصنوعی با اعمال هر دو عامل فشار و خلاء نسبت به سنگ‌مصنوعی بدون اعمال فشار و خلاء کمتر است، این موضوع نشان‌دهنده کم بودن تخلخل به علت تاثیر فشار و خلاء در ساخت سنگ-مصنوعی مورد نظر می‌باشد.

فشار تراکمی، ویبره و خلاء، از عوامل موثر در تکنولوژی ساخت سنگ‌مصنوعی و باعث بهبودویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشند، با توجه به جدول ٦ با اعمال فشار معادل ۱۵/۵ MPa در هنگام ساخت سنگ‌مصنوعی وزن واحد حجم به ۷/۳٪ افزایش و تخلخل به ۵۲٪ و درصد جذب آب به ۰/۵۵ درصد کاهش داد. علاوه بر فشار با اعمال خلاء در هنگام ساخت سنگ‌مصنوعی می توان وزن واحد حجم از

۷/۳٪ به ۹/۵٪ افزایش و تخلخل از ۷/۳۳ به ٤/۲۳ درصد و درصد جذب آب از ۳/۱۱ به ۱/۷۵ درصد کاهش داد.

اگر چه فشارتراکمی تعیین کننده اصلی تراکم مصالح در قالب سنگ‌مصنوعی می‌باشد ولی شرایط ویبره و خلاء در تراکم تاثیر دارند. ویبره، فشار و خلاء ساده‌ترین فرآیندهای فیزیکی که در اجزای تشکیل دهنده نقش موثر و اساسی دارد که موجب تغییراتی در سنگ‌دانه‌ها (مصالح) می‌شود مهم‌ترین تغییراتی که در اثر تراکم ایجاد می‌شود کم شدن فضای خالی و در نتیجه حجم سنگ است. با اعمال فشار و خلاء در هنگام ساخت سنگ‌مصنوعی (جدول ٦) تخلخل و درصد جذب آب کاهش یافته و وزن واحد حجم آن افزایش می‌یابد بنابراین با اعمال فشار و خلاء در هنگام ساخت سنگ‌مصنوعی ویژگی فیزیکی آن بهبود می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در سنگ‌مصنوعی الف به دلیل عدم استفاده از فشار و خلاء در هنگام ساخت خلل و فرج‌های زیادی در سنگ مشاهده می‌شود ولی با اعمال فشار و خلاء در سطح سنگ‌مصنوعی ب و شکل ۹، خلل و فرج مشاهده نمی‌شود. همچنین در شکل ۱۰ عدم ویبره سبب ایجاد ساختار نامتراکم و فشار بیش از حد (بیش از ۱۵/۵ MPa) موجب له شدن و ایجاد ترک در سنگ‌دانه‌ها سنگ‌مصنوعی می‌شود.

جدول ٦. میزان درصد تغییر ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌مصنوعی با اعمال فشار و خلاء نسبت به سنگ‌مصنوعی بدون اعمال فشار و خلاء.

نام نمونه	γ_d	N	Iv
سنگ‌مصنوعی فقط با فشار	+٪۷/۳	-٪۵۲	-٪۵۵
سنگ‌مصنوعی با فشار و خلاء	+٪۹/۵	-٪۷۲	-٪۷٤

جدول ۵. ویژگی‌های طرح اختلاط، فشار و خلاء در ساخت سنگ‌مصنوعی.

نمونه سنگ‌های مصنوعی	نوع سیمان	جنس سنگ‌دانه و پودرسنگ	نسبت سیمان به آب	نسبت سنگ‌دانه به سیمان	ویبره دقیقه	فشار MPa	خلاء دقیقه
سنگ‌مصنوعی با فشار و خلاء	سیمان سفید	سنگ‌چینی	۰/٤۵	۰/۲٤	۵	۱۵/۵	۲۰
سنگ‌مصنوعی با فشار	سیمان سفید	سنگ‌چینی	۰/٤۵	۰/۲٤	۵	۱۵/۵	۰
سنگ‌مصنوعی بدون فشار و خلاء	سیمان سفید	سنگ‌چینی	۰/٤۵	۰/۲٤	۵	۰	۰

شکل ۸. دو نوع سنگ‌مصنوعی ساخته شده از سنگ‌دانه سنگ‌چینی با یک طرح اختلاط.

شکل ۹. نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌دانه سنگ چینی با فشار و خلاء مورد نظر.

شکل ۱۰. تاثیر عدم ایجاد ویبره و فشار بیش از حد در ساخت سنگ‌مصنوعی.

۶-۲. *مقایسه ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی با دو نمونه سنگ طبیعی*

برای تعیین ویژگی‌های مهندسی نمونه سنگ‌مصنوعی ساخته شده تحت اعمال فشار و خلاء با دو نمونه سنگ ساختمانی طبیعی شامل سنگ‌چینی که سنگ اولیه مصرفی در ساخت سنگ‌مصنوعی (سنگ‌ساختمانی دگرگونی ریزبلور و بدون استیلولیت و درزه) و سنگ تراورتن که سنگ ساختمانی سبک و متخلخل می‌باشد، مورد مقایسه قرار گرفت.

بررسی مقایسه نتایج ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی که با اعمال فشار و خلاء ساخته شده با سنگ طبیعی اولیه در تولید سنگدانه (سنگ‌چینی) و تراورتن که یک سنگ سبک و متخلخل ساختمانی است در جدول ۷ نشان می‌دهد که سنگ-مصنوعی دارای تخلخل و درصد جذب آب پایین‌تر از سنگ طبیعی تراورتن و سبک‌تر از سنگ اولیه می باشد علاوه بر اینکه سنگ‌مصنوعی دارای مقاومت فشاری کمتر از سنگ تراورتن است ولی دارای مقاومت کششی و دوام بیشتر از تراورتن می‌باشد. مقاومت فشاری به سن ۲۸ روز، یک پارامتر بحرانی برای مصالح ساختمانی می‌باشد مقاومت فشاری آجرهای بتنی ساختمانی باید بیشتر از ۷MPa مطابق با شرایط BS 6073 و مقاومت فشاری بلوک‌های سنگ‌فرش به سن ۲۸ روز باید بیشتر از۴۹MPa مطابق با شرایط 6717BS باشند (Poon et al., 2002). مقاومت فشاری سنگ‌مصنوعی در این تحقیق بر اساسASTM D2938 به سن ۲۸ روز بعد از ساخت ۲۷MPa است بنابراین کاربرد سنگ‌مصنوعی برای پوشش دیوار ایده آل می‌باشد.

۶-۲-۱. *امتیازبندی سنگ‌های ساختمانی براساس پارامترهای مهندسی*

اثر وزن واحد حجم در دوام سنگ موثر است. از طرفی برای سنگ‌های ساختمانی اهمیت دوام و مقاومت بیشتر از وزن واحد حجم است هرچه درصد جذب آب افزایش یابد دوام

در زمان مشابه کاهش می‌یابد بنابراین سنگ‌های با جذب آب کمتر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. در این تحقیق پارامترهای مهندسی بر اساس درجه اهمیت برای سنگ‌های ساختمانی در جدول ۸ امتیازبندی شد و سپس با توجه به جدول امتیازبندی، نتایج امتیاز سنگ‌مصنوعی ساخته شده و دو نمونه سنگ طبیعی در جدول ۹ تعیین گردید.

با توجه به جدول امتیازبندی (جدول ۸) درصد جذب آب دارای اهمیت بیشتری نسبت به پارامترهای مهندسی در سنگ-مصنوعی دارد سنگ‌مصنوعی مورد نظر دارای درصد جذب آب و وزن واحد حجم کمتر از سنگ طبیعی تراورتن است، بنابراین می‌توان از مخلوط سنگ‌دانه– سیمان برای تولید سنگ‌های مصنوعی قالب‌ریزی شده با ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول استفاده کرد.

جدول ۷. میزان درصد تغییر ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی با اعمال هر دو عامل فشار و خلاء نسبت به سنگ‌های طبیعی.

نام نمونه	γ_d	N	Iv	σ_c	σ_t	(Id_{10})
سنگ طبیعی اولیه (سنگ‌چینی)	-٪۱۰/۸۲	+٪۸٦	+٪۰/۸۷	-٪۲۹۱	-٪۱۱	-٪۹۹
سنگ طبیعی تراورتن	+٪۲/۰٦	-٪۸۱	-٪۷۱	-٪۲۹	+٪۳۷	+٪۵۲

جدول ۸. امتیازبندی سنگ براساس پارامترهای مهندسی (میرجلیلی، ۱۳۹۳).

پارامترهای	توصیف	عالی	خوب	متوسط	ضعیف
	امتیاز کل	۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵
درصد جذب آب ٪	محدوده	۲-۰	۳-۲	۵-۳	بیشتر از ۵
	امتیاز	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰
وزن واحد حجم kN/m^3	محدوده	بیشتر از ۲٤	۲٤-۲۲	۲۲-۱۸	کمتر از ۱۸
	امتیاز	۱۵	۱۰	۵	۳
مقاومت فشاری MPa	محدوده	بیشتر از ۵۰	۵۰-٤۰	٤۰-۳۰	کمتر از ۳۰
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	٤
مقاومت کششی MPa	محدوده	بیشتر از ۲۰	۲۰-۱۵	۱۵-۱۰	کمتر از ۱۰
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	٤
دوام ٪	محدوده	کمتر از ۱٪	۱٪-۲٪	۲٪- ۳٪	بیشتر از ۳٪
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	٤

جدول ۹. نتایج امتیازبندی سنگ طبیعی و مصنوعی ساخته شده.

نام سنگ	سنگ‌مصنوعی (ساخته شده از سنگ‌دانه سنگ‌چینی) با اعمال فشار و خلاء	سنگ طبیعی سنگ‌چینی	سنگ طبیعی تراورتن
درصدجذب آب ٪	۲۵	۲۵	۲۰
وزنواحد حجم kN/m3	۱۵	۱۵	۱۰
مقاومت فشاری MPa	٤	۲۰	۱۰
مقاومت کششیMPa	۱۰	۱۵	٤
دوام ٪	۱۵	۲۰	۱۰
امتیاز کل	٦۹	۹۵	۵٤
توصیف	خوب – متوسط	عالی – خوب	خوب – متوسط

۷. نتیجه‌گیری

- در این تحقیق سه عامل ویبره، فشار و خلاء در ساخت سنگ‌مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد عدم ویبره سبب ایجاد ساختار نامتراکم (شکل۱۰) می‌شود. بررسی دو عامل فشار و خلاء با ویبره ثابت در هنگام ساخت سنگ‌های مصنوعی جدول ٦ نشان داد تاثیر عامل فشار در ویژگی‌های فیزیکی (وزن واحد حجم، تخلخل و درصد جذب آب) سنگ‌مصنوعی بیشتر از خلاء است.
- نتایج تاثیر خلاء و فشار در ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های مصنوعی جدول ٦ نشان داد با اعمال فشار و خلاء در هنگام ساخت، وزن واحد حجم ۹/۵٪+ افزایش و سبب کاهش ۷۲٪- تخلخل و ۷٤٪- درصد جذب آب می‌شود. بنابراین با اعمال همزمان هر دو فرآیند فشار و خلاء در هنگام ساخت نقش موثری در بهبود ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌مصنوعی دارند. با توجه به شکل ۱۰ فشار بیش از ۱۵/۵MPa موجب له شدن و ایجاد ترک در سنگ‌دانه‌هادر هنگام ساخت سنگ‌مصنوعی می‌شود.
- مقایسه نتایج ویژگی مهندسی سنگ‌مصنوعی با سنگ طبیعی تراورتن که یک سنگ سبک و متخلخل ساختمانی است جدول ۷ نشان داد که سنگ‌مصنوعی دارای (۲۹٪-) مقاومت فشاری، (۸۱٪-) تخلخل و (۷۱٪-) درصد جذب آب کمتر و همچنین (۳۷٪+) مقاومت کششی و (۵۲٪+) دوام بیشتری نسبت به سنگ طبیعی تراورتن دارد. با توجه به جدول امتیازبندی، درصد جذب آب نسبت به پارامترهای مهندسی اهمیت بیشتری در سنگ‌مصنوعی دارد. نتایج جدول ۹ نشان داد سنگ‌مصنوعی مورد نظر دارای درصد جذب آب و وزن واحد حجم کمتر از سنگ طبیعی تراورتن است، بنابراین کاربرد سنگ‌مصنوعی برای پوشش دیوار ایده آل می‌باشد و می‌توان از مخلوط سنگدانه– سیمان برای تولید سنگ‌های مصنوعی قالب‌ریزی شده با ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول استفاده کرد.
- نتایج امتیازبندی جدول ۹ نشان می‌دهد سنگ‌مصنوعی ساخته شده دارای کیفیت خوب تا متوسط است با توجه به جدول امتیازبندی، سنگ‌های مصنوعی ساخته شده از نظر توصیف ویژگی‌های مهندسی مشابه کیفیت سنگ طبیعی تراورتن می‌باشند. بنابراین با توجه به ویژگی‌های مهندسی در محدوده قابل قبول می‌توان سنگ‌های مصنوعی را به عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار داد.

منابع

رحیمی، ح.، ۱۳۸۸. مصالح ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، تهران.

شرکت شهرک‌های صنعتی خراسان.، ۱۳۸۷. امکان سنجی تولید سنگ‌مصنوعی، Www.khorasaniec.ir/files/tip/sang.pdf.

شریفی، ج.، ۱۳۸۷. بررسی اثر جنس سنگ‌دانه‌های مختلف بر ویژگی مقاومتی بتن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

میرجلیلی، ط.، ۱۳۹۳. تاثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌دانه‌های آهکی روی خصوصیات سنگ‌های مصنوعی، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

Ahmad, S., 2003. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review, Cement & Concrete Composites, 25: pp 459–471.

Alawode, O., Dip, P., Idowu, O., 2000. Effects of Water-Cement Ratios on the Compressive Strength and Workability of Concrete and Lateritic Concrete Mixes. The Pacific Journal of Science and Technology, 12(2): 99-105.

ASTM (American society for testing and materials) C 136-01., 2004. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM (American society for testing and materials) D 2938-95., 2002. Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens.

ASTM (American society for testing and materials) D 3967-95a., 2001. Standard test method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, Designation

ASTM (American society for testing and materials) D 4644., 1998. Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks.

http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.

Carlos, A., Masumi, I., Hiroaki, M., Maki, M., Takahisa, O., 2010. The effects of limestone aggregate on concrete properties. Construction and Building Materials, 24: 2363–2368

Chi, J., Huang, R., Yang, C., Chang, J., 2003. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. Cement and Concrete Composites, 25: 197-205.

Dreesen, R., and Dusar, M., 2004. Historical building stones in the province of limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment. Materials Characterization, 53: 273 – 287.

Galetakis, M., Raka, S., 2004. Utilization of limestone dust for artificial stone production:an experimental approach, Mineral Engineering,17: 355-357

Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu, M., 2005. A study on reinforcement corrosion and relatedproperties of plain and blended cement concretes under different curing conditions, Cement & ConcreteComposites, 27: 449-461.

http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.

ISRM; Commission on Standartization of Laboratory and Fild Tests, Suggested Methods for Rock Characterization Teesting and Monit, In: Brown, E.T. (Ed.), oring. Pergamon, Oxford, 1981. pp:113-116 and 123-127.

Kolias, S., Georgiou, C., 2005. The effect of paste volume and of water content on the strength andwater absorption of concrete. Cement and Concrete Composites, 27: 211-216.

Lee, M.y., Ko, Ch. H., Chang, F. Ch., Lo, Sh.Li., Lin, J.D., Shan,M.Y., Lee, J.ch., 2008. Artificial stone slab production using waste glass stone fragments and vacuum vibratory compaction, cement and concrete composites, 30: 583-587.

Mitchell, C.J., Harrison, D.J., Robinson, H.L, Ghazireh, N., 2004. Minerals from waste recent BGS and Tarmac experience in finding uses for mine and quarry waste, Miner Eng, 17: 279–284. doi:10.1016/j.mineng.2003.07.020

Poon, C.S., Kou, S.C., lam, L., 2002. Use of recycled aggregates in moulded concrete bricks and blocks. Construction and Building Materials, 16: 281-289.

Sakai, T., 2000. artificial stone composition and method of manufacturing artificial stone. Doppel Co" Ltd" Tokyo’ Japan. Patent Number, 6: 127,458.

Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

Topličić- Ćurčić, G., Grdić, Z., Despotović, I., Ristić, N., 2010. Influence of crushed stone aggregate type on concrete consistency. Architecture and Civil Engineering ,8 (1): 99-109.