

بهبود نتایج سنجش و آنالیز تراکم مخلوط آسفالتی حاصل از پردازش تصاویر سی‌تی‌اسکن با استفاده از آستانه فازی

فریدون مقدس نژاد^{۱*}، محمدمهدی مخملباف^۲، حمزه ذاکری^۱
^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ گروه مشاوران جوان شهرداری مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۷ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۵ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۹ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۶ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تراکم آسفالت
خواص حجمی
پردازش تصویر
سی‌تی‌اسکن
منطق فازی

چکیده: تراکم، از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد مخلوط آسفالتی است که تأثیر بسزایی بر ارزیابی مقاومت و عمر روسازی دارد. در حال حاضر مطالعات متعددی بر روی تصاویر سی‌تی‌اسکن مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است؛ اما به دلیل ماهیت مبهم در لبه سنگ‌دانه‌ها، پردازش این بخش از تصاویر با خطا بالایی انجام شده است. روش‌های آستانه گذاری ثابت و دینامیک که توسط مطالعات گذشته مطرح شده است نیز نتوانسته است این ابهام را رفع نماید. هدف از ارائه این مقاله بکارگیری مدل آستانه گذاری فازی بر اساس تفکیک اجزا و تحلیل تراکم مخلوط آسفالتی است. خروجی این روش می‌تواند سبب افزایش دقت جداسازی و سنجش بهتر تراکم مخلوط آسفالتی گردد. مقایسه روش فازی پیشنهادی با نتایج آستانه ثابت و دینامیک نشان می‌دهد، روش آستانه گذاری فازی نسبت به روش‌های ثابت و دینامیک دارای خطا کمتری بوده است، به طوری که تراکم مخلوط آسفالتی را با خطای کمتر از ۲ درصد تشخیص می‌دهد.

۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۳ یو^۱ و همکارانش تحقیقی را در زمینه‌ی شبیه‌سازی مخلوط آسفالتی با کمک پردازش تصاویر سی‌تی‌اسکن ارائه دادند [۶]. نتایج حاصل از این پروژه نشان داد که شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از این روش، نسبت به دیگر روش‌ها به واقعیت نزدیک‌تر است. اگرچه این مقاله به‌طور عمده به بررسی دوبعدی مشکلات کشش خطی در ژئومکانیکی پرداخته است، اما نویسنده معتقد است که روش‌ها و تکنیک‌های ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند به ارزیابی دیگر مسائل ژئوتکنیکی همچون کشش غیرخطی، شکل‌پذیری و مکانیک شکست بپردازد [۶].

پردازش تصاویر به‌دست‌آمده از سی‌تی‌اسکن نمونه‌ای مخلوط آسفالتی برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه کالیفرنیا جنوبی در پروژه‌ای با عنوان «ظهور ترموگرافی در هسته آسفالتی» انجام شد. این گزارش با همکاری متخصصان رشته‌های مهندسی عمران، مهندسی برق، رادیولوژی، متالورژی، مهندسی شیمی و آسفالت صورت گرفت. هدف از این تحقیق، مطالعه داخل هسته آسفالت بعد از اجرا و یافتن تغییر شکل و خرابی‌ها قبل و بعد از بارگذاری بوده است [۱]. پس‌از این بررسی سرعت استفاده از این ابزار در مهندسی روسازی افزایش یافت.

توزیع هوا به‌عنوان یکی از مشخصه‌های مهم و تأثیرگذار کنترلی، همواره مورد توجه محققان بوده است. روش‌های غیرمخرب محدودی به‌منظور ارزیابی و تعیین درصد هوا، در دسترس است. ونگ^۲ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۹ به مقایسه توزیع هوا در نمونه‌های متراکم شده با پنج روش مختلف پرداختند. روش‌های تراکم مورد بررسی، شامل تراکم آزمایشگاهی (ژیراتوری^۳، استاتیکی، لرزشی و مارشال^۴) و تراکم کارگاهی است. این مطالعه نشان داد، ساختار و نحوه چیدمان سنگ‌دانه‌ها و درجه قفل و بست آن‌ها در روش‌های مختلف تراکم، می‌تواند تفاوت عمده‌ای

از روش‌های مختلف پردازش تصویر به‌منظور مدل‌سازی‌های سه‌بعدی این نمونه‌ها استفاده‌شده است [۴-۲]. با توجه به عدم همگنی مصالح در نمونه‌های مخلوط آسفالتی، ویژگی‌های حجمی نمونه‌ها دارای درجه بالایی از ناهمگنی بوده و این مسئله باعث بروز ابهام در شبیه‌سازی مخلوط‌های دانه‌ای می‌شود. پردازش تصویر روش کارایی در استخراج ویژگی‌های تصویری در برش‌های ارتفاعی و ابزاری توانمند در شبیه‌سازی نمونه‌ای سه‌بعدی است [۵].

1 Z.Q.Yue
2 Wang and Hao
3 Gyrotary
4 Marshal

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

و توسعه دادند. انتخاب روش تعیین مقادیر آستانه از مهم‌ترین محدودیت‌های تحلیل خودکار نمونه‌های آسفالتی است. بر اساس روش‌های اشاره‌شده، وجود نمونه‌های کنترلی به تعداد مناسب و با دقت و وضوح کافی به منظور تعیین آستانه (T_1 و T_2) لازم است.

محدودیت دوم انتخاب ثابت مقادیر T_1 و T_2 برای هر تصویر است. این فرض، باعث کاهش پیچیدگی مراحل تحلیل‌شده اما دقت را کاهش می‌دهد. بر این اساس، تغییر یک مقدار واحد در آستانه‌ها، نتایج متفاوتی در بر دارد. به منظور رفع این محدودیت‌ها، از روش‌های یادگیری ماشین با قابلیت آموزش و اجرا استفاده‌شده است. به منظور کاهش میزان حساسیت روش به تغییرات یک واحد رنگ‌دانه، از روش منطق فازی و یادگیری تابع عضویت بهینه استفاده‌شده است.

در الگوریتم ارائه‌شده ابتدا از یک نمونه مخلوط آسفالتی نسبت به محور قائم بافاصله ۱ میلی‌متر مقطع برداری (شکل ۱-ب) می‌شود. سپس پیش‌پردازش، برای کلیه نمونه‌ها، انجام‌شده و تصاویر دوبعدی به صورت صفحه‌ای در یک ستون در امتداد محور قائم قرار می‌گیرند. (شکل ۱-ج) تصاویر ابتدا و انتها نمونه‌ها به دلیل خطای هم‌افزایی در زمان برداشت به‌عنوان داده‌های نامناسب حذف می‌شوند. تصاویر باقی‌مانده به بخش پردازش اصلی وارد شده و در این مرحله، ویژگی‌های حجمی نمونه استخراج خواهد می‌شوند. در انتها با داشتن درصد هوای نمونه، ضریب تراکم نمونه‌ها، محاسبه و تخمین زده می‌شود (شکل ۲).

۲-۱- جمع‌آوری داده

در این مطالعه از ۶۰ نمونه استوانه‌ای مخلوط آسفالتی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر مقطع ۷ سانتی‌متر استفاده‌شده است. ویژگی‌های هر یک از آن‌ها (همچون دما ساخت، درصد هوا، قیر و سنگ‌دانه، نمودار دانه‌بندی و غیره) جهت بررسی‌های آینده در پایگاه داده، ذخیره شده است. این داده‌ها که با استفاده از آزمایش‌های استاندارد آسفالت جمع‌آوری شده است بانک اطلاعات آزمایشگاهی (حقیقی) را تشکیل داده است (جدول ۱). برای هم یک از نمونه‌ها مجموعه‌ای شامل ۷۰ تصویر تصاویر سی‌تی‌اسکن استخراج‌شده که حاصل ذخیره‌سازی اطلاعات در هر ۱ میلی‌متر از ارتفاع نمونه است. این نمونه‌ها نسبت به محور عمودی مقطع استخراج شده است (شکل ۳). تحلیل ویژگی‌های، این تصاویر می‌تواند در پیش‌بینی ویژگی‌های حجمی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد.

در رفتار تنش-کرنش داشته باشد. مقاطع برش خورده از نمونه‌های متراکم شده با روش‌های مختلف، این تئوری را تأیید کرده است. شکل سنگ‌دانه‌ها (ازجمله: درازی، کشیدگی و صفحه‌ای بودن) روی ساختار و استخوان‌بندی تأثیر مهمی می‌گذارد که به روش تراکم بسیار وابسته است [۷]. طبق تحقیقات انجام‌شده در این زمینه اگرچه چگالی بتن آسفالتی برای نمونه‌های مختلف یکسان است، اما نحوه چیدمان و قفل و بست سنگ‌دانه‌ها بعد از تراکم، شدیداً به روش تراکم استفاده‌شده وابسته است و نمونه‌های متراکم شده در آزمایشگاه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [۷].

در سال ۲۰۱۳ تجزیه و تحلیل ساختار مخلوط آسفالت با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال توسط کی-هونمون^۱ انجام شد [۸]؛ که بر اساس تحقیقات زلزله^۲ و همکارانش [۹-۱۱] توسعه یافته است. در این تحقیق، اجزای مختلف مخلوط آسفالتی و اطلاعات حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های استفاده‌شده بر پایه تشخیص آستانه بین هوا، ماستیک (قیر و فیلر) و سنگ‌دانه بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی است در سال ۲۰۰۸ [۱۰] زولو، الگوریتمی به نام VGM^3 را باهدف کمینه کردن میزان خطای مطلق (که همان اختلاف بین خروجی الگوریتم و داده‌های آزمایشگاهی است) ارائه داد. به طوری که حداکثر خطا مطلق در این مطالعه $4/33$ درصد بوده است [۱۲]. مقدس نژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۱۳] از الگوریتم دینامیک برای بررسی هر تصویر در ارتفاع نمونه به صورت خودکار استفاده کردند. این روش در مقایسه با روش استاتیک نتایج بهتری را نشان می‌دهد. مهم‌ترین محدودیت الگوریتم‌های اشاره‌شده، نگاه مطلق^۴ به انتخاب آستانه است که با توجه به حساسیت بالای تصاویر و خاصیت هم‌افزایی خطا در عمق نمونه، دقت کاهش خواهد یافت.

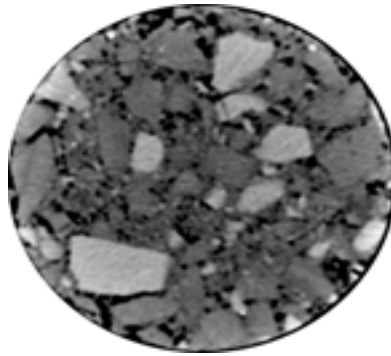
در این مقاله با مقایسه بین روش‌های مختلف آستانه، به منظور جداسازی اجزای مخلوط نمونه‌های آسفالتی، روش جدید آستانه فازی خطی و غیرخطی، به منظور تعیین خودکار آستانه، ارائه‌شده است.

ساختار مقاله عبارت است از: مقدمه در بخش اول ارائه‌شده و در بخش دوم به توضیح کلیاتی از مباحث پردازش تصویر فازی پرداخته‌شده است. بخش سوم روند کلی و روش پیشنهادشده معرفی شده است. بخش چهارم به معرفی مدل‌های مختلف آستانه (ازجمله آستانه ثابت، آستانه دینامیک، آستانه فازی خطی و آستانه فازی غیرخطی) اختصاص داده‌شده است. پنجم، مقایسه‌ای از نتایج خروجی هر یک از روش‌ها ارائه‌شده است؛ و در نهایت در بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص داده‌شده است.

۲- روش پیشنهادی

کی-هونمون و همکارانش [۸] و مقدس نژاد و همکارانش [۱۳]، آستانه‌های ثابت و دینامیک را برای پردازش تصویر مخلوط آسفالتی پیشنهاد

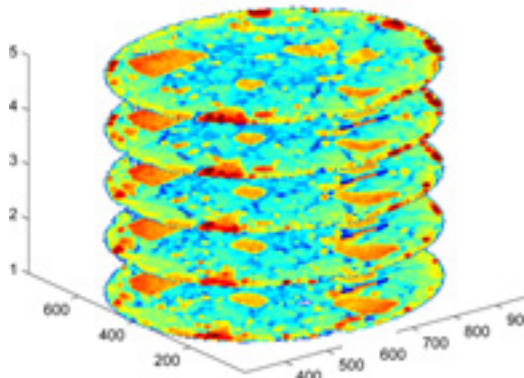
- 1 k.h. Moon
- 2 H.m.Zelelew
- 3 Volumetric-based Global Minima
- 4 Crisp



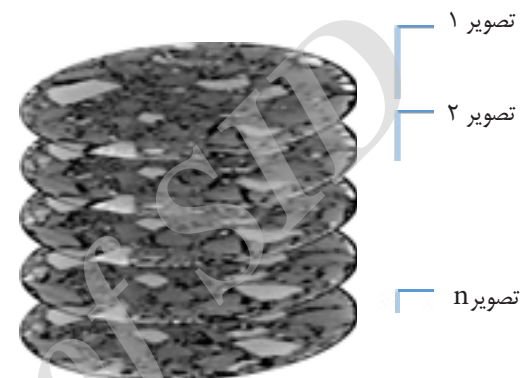
(ب) مقطع برداری در محور عمودی



(الف) نمونه مخلوط آسفالتی



(د) مدل سازی تصاویر برای هر نمونه



(ج) برای هر نمونه ۶۰ تصویر گرفته می شود

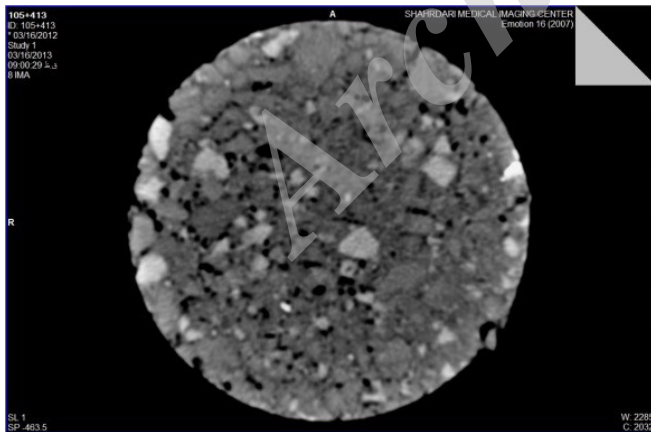
تصویر ۱

تصویر ۲

تصویر n

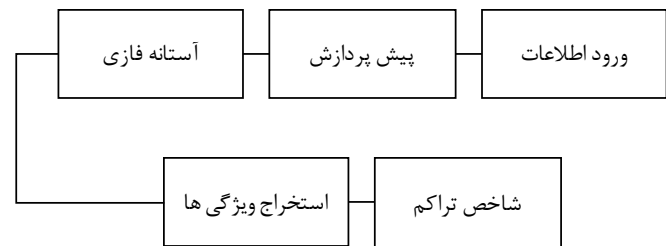
شکل ۱: مراحل مدل سازی مخلوط آسفالت

Fig. 1. Steps to model the HMA specimen.



شکل ۳: تصویر سی تی اسکن نمونه مخلوط آسفالتی

Fig. 3. CT image of asphalt mix



شکل ۲: مراحل کلی الگوریتم

Fig. 2. General scheme of the method

جدول ۱: نمونه‌ای از خروجی‌های آزمایشگاهی

Table 1. A sample of laboratory outputs

مقدار	مشخصات	مقدار	مشخصات
۱۳۴	درجه حرارت آسفالت در جاده (°C)	۴/۴	درصد فضای خالی نمونه مارشال (%)
۱۵۸	درجه حرارت آسفالت در کارخانه (°C)	۱۵	درصد حجمی فضای خالی مصالح (%)
۱۵	درجه حرارت محیط (°C)	۷۰/۹	درصد فضایی خالی پر شده با قیر (%)
۵/۳۳	درصد قیر (%)	۲/۴۹۵	وزن مخصوص حقیقی مصالح (۳kg/m)
۱۴۴۵	استحکام (kg)	۱۰۰	درصد شکستگی در دوجبهه (%)
۳/۱	نرمی (mm)	۲/۲۴	وزن مخصوص نمونه مارشال (۳kg/m)

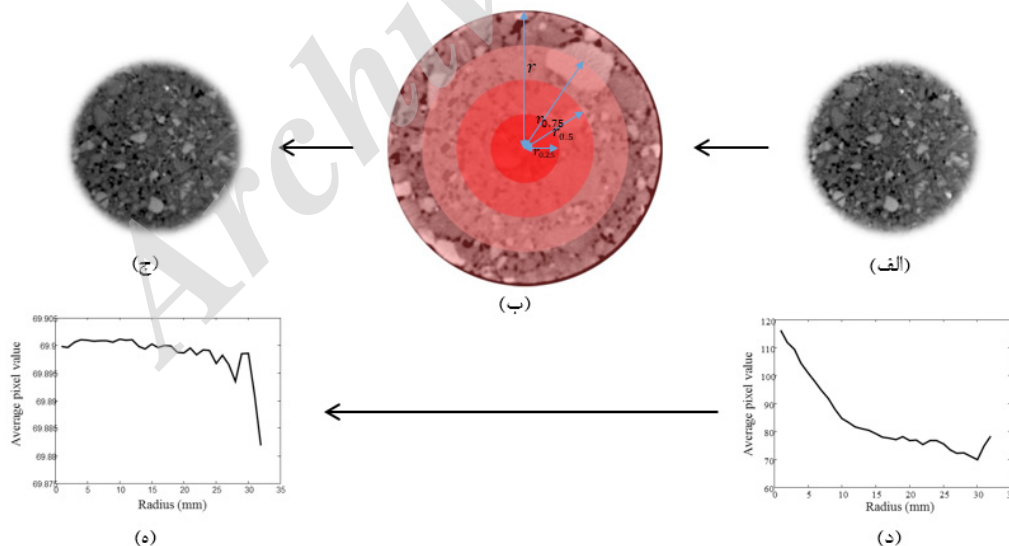
تغییرات محسوسی ندارد. به‌منظور کاهش اثر این پدیده، رفع این مشکل تصاویر نمونه، به‌صورت شعاعی رده‌بندی می‌شود (شکل ۴-ب). بدین منظور از تابعی یا قابلیت تنظیم بر اساس فاصله از مرکز و ضریب اصلاحی استفاده می‌شود. تغییرات میکرو ساختاری از مهم‌ترین ویژگی‌های تابع پیشنهادی است که می‌تواند نتایج متفاوتی را به دست آورد.

تابع تغییرات میانگین ارزش پیکسلی تخمین زده می‌شود و با معکوس کردن تابع حاصله، تابع مدنظر به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(x) = 60.3 * e^{-0.106*x} + 63.21 * e^{0.0041*x} \quad (1)$$

۲-۲- پیش‌پردازش

پیش‌پردازش به‌منظور ارتقاء کیفیت و حذف نویز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از روش‌های معمول در پردازش تصویر، پیش‌پردازش صورت گرفته تضعیف اشعه ایکس (X)، در طی مسیر نفوذ به داخل نمونه آسفالتی به دلیل کاهش توان و قدرت اشعه عامل تغییر هیستوگرام تصویر در اطراف نمونه نسبت به مرکز آن است. با رسم نمودار میانگین ارزش پیکسلی تصویر نسبت به شعاع (شکل ۴-د)، مشخص می‌شود که فرض صحیحی است. این مسئله به دلیل تابش اشعه در راستای افقی ایجاد شده و در ارتفاع



شکل ۴: بررسی تأثیرات ظاهری و ارزش پیکسلی نمونه‌ها
 الف) تصویر اصلی قبل از اعمال اصلاح شعاعی، ب) تقسیم شعاعی نمونه مخلوط آسفالتی ج) تصویر اصلی بعد از اعمال اصلاح شعاعی،
 د) تغییرات میزان میانگین ارزش پیکسل‌ها قبل از اصلاح ه) تغییرات میزان میانگین ارزش رنگ‌دانه‌ها بعد از اصلاح

Fig. 4. Radius adjustment due to decrease in X-ray penetration ability

۳- تفکیک سه جز

انتخاب آستانه‌ها در روش‌های پیشین به روش سعی و خطا بوده و با تغییر ارتفاع نور و نوع سنگ‌دانه، نتایج تغییر می‌کنند. در سال ۲۰۰۷ زلولو و همکارانش الگوریتم vgd را برای انتخاب آستانه انطباقی پیشنهاد کردند [۹]. در این روش مقدار اولیه آستانه به صورت تصادفی انتخاب و سپس نتایج خروجی الگوریتم با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. اگر این درصد هوای خروجی الگوریتم بیشتر از مقدار واقعی باشد مقدار آستانه کم و برعکس، مقدار خروجی کمتر از درصد هوای واقعی باشد مقدار آستانه افزایش خواهد یافت. تابع هدف، یافتن کمترین اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های خروجی الگوریتم تعریف شده است.

هدف از ارائه این روش، تعیین، میزان و شاخص دهی به فازهای جداسازی شده برای هر نمونه مخلوط آسفالتی با استفاده از برهم‌نهی نتایج به دست آمده از مقاطع برش دهی شده است. جداسازی سه جزء نمونه با استفاده از آستانه فازی انطباقی و تعیین میزان تراکم مخلوط بر اساس نتایج گسسته از اهداف اصلی روش پیشنهادی در این مقاله است.

۳-۲- جداسازی اجزا با آستانه دینامیک

در سال ۲۰۱۴ مقدس نژاد و همکاران [۱۴] الگوریتمی جهت استخراج ویژگی‌های نمونه‌های مخلوط آسفالتی به صورت غیر مخرب ارائه دادند. با استفاده از ۸۰ درصد نمونه‌ها آموزش و از باقیمانده آن برای ارزیابی و صحت سنجی استفاده شد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های روش پیشنهادی به وسیله این محققان، انتخاب دینامیک آستانه به منظور جداسازی فازها بوده است. در این روش برای هر عکس به طور مجزا و با توجه به ماهیت کلی تصویر آستانه‌ای هوشمند انتخاب و تصمیم‌گیری برای جداسازی فازها بر همین اساس انجام می‌شود.

انتخاب دینامیک آستانه بر اساس [۱۴]:

$$T_1 = MEAN + \alpha VAR \quad (5)$$

$$T_2 = MEAN + \beta VAR \quad (6)$$

است. در این فرمول MEAN میانگین ارزش پیکسلی تصویر سی‌تی‌اسکن مخلوط آسفالتی مورد پردازش و VAR واریانس ارزش‌های پیکسلی از میانگین است. مقادیر α و β نیز ضرایب فرا گرفته از آموزش بر اساس داده‌های اولیه می‌باشند. محاسبه مقادیر α و β با استفاده از داده حجمی آزمایشگاهی برای تعداد زیادی از نمونه‌های موجود انجام شده است. نتایج حاصل از این الگوریتم کمترین اختلاف را با نتایج آزمایشگاهی دارد. این روش دارای توانایی بالایی در جداسازی فازهای مخلوط است اما به دلیل عدم قطعیت در انتخاب مقادیر α و β درجه‌ای از ابهام در انتخاب آستانه برای آن وجود دارد. به عنوان مثال تغییر یک واحد رنگ‌دانه آستانه $T_1=80$ مقدار $T_1=81$ با توجه به گسسته بودن ارزش رنگ‌دانه در تصاویر سی‌تی‌اسکن مخلوط آسفالتی به شدت در نتایج، تغییر ایجاد خواهند کرد.

تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی اصلی‌ترین بخش‌های بررسی خواص حجمی بشمار می‌رود. تفکیک اجزا در تصاویر سی‌تی‌اسکن با استفاده از پردازش تصویر و تکنیک‌های آستانه سازی انجام می‌شود. سه فاز اصلی نمونه مخلوط آسفالتی شامل (قیر، سنگ‌دانه و هوا) دسته‌بندی می‌شود. روش آستانه سازی دودویی به منظور جداسازی بخش‌هایی با رنگ‌دانه‌های با ارزش بیشتر یا کمتر از یک آستانه، مورداستفاده قرار می‌گیرد.

در این مقاله به بررسی ۴ روش مختلف آستانه گذاری و مقایسه بین آن‌ها پرداخته شده است که به ترتیب عبارت‌اند از:

- آستانه ثابت
- آستانه دینامیک
- آستانه فازی خطی
- آستانه فازی غیرخطی

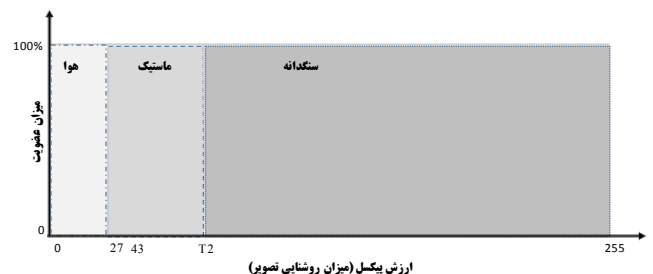
۳-۱- تفکیک اجزا با آستانه ثابت

نمونه سیلندر مخلوط‌های آسفالتی از سه جز اصلی شامل (سنگ‌دانه، ماستیک و هوا) تشکیل شده است؛ که برای جداسازی و تفکیک این سه جزء فازی از هم نیاز به انتخاب حداقل دو آستانه است (یکی برای جداسازی ماستیک-هوا؛ و یکی برای جداسازی سنگ‌دانه-ماستیک) که به ترتیب T_1 و T_2 نامیده می‌شوند.

$$A(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \leq T_1 \\ 0 & f(i, j) > T_1 \end{cases} \quad (2)$$

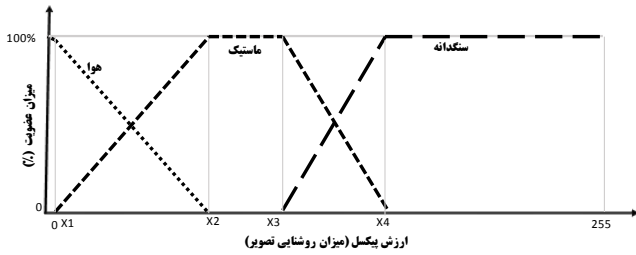
$$M(i, j) = \begin{cases} 1 & T_1 \leq f(i, j) < T_2 \\ 0 & f(i, j) \geq T_2 \text{ or } f(i, j) < T_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$G(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \geq T_2 \\ 0 & f(i, j) < T_2 \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۵: تفکیک سه فاز مخلوط آسفالتی

Fig. 5. Crisp separation of asphalt mixture phases



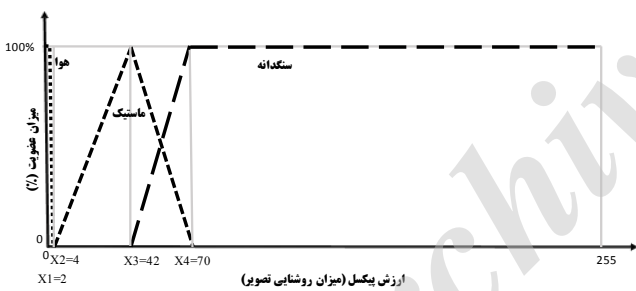
شکل ۷: تابع عضویت خطی برای تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی

Fig. 7. Linear thresholding (membership function) for phase separation

همچنین به منظور تعیین پارامترها و کران‌های موجود، از روش کمینه کردن اختلاف بین خروجی و داده‌های موجود استفاده شده است. داده‌های موجود برای هر نمونه (شامل درصد هوا، درصد قیر و درصد سنگدانه) با نتایج خروجی از الگوریتم حاصل از پردازش تصاویر مقایسه شده تا با روش‌های دقیق و فرا ابتکاری، مقادیر مجهولات (X_1 تا X_4) استخراج شده است.

از آنجایی که در چهار مجهول و سه معادله، نتایج خروجی از روش حل عددی، جواب مطلق نبوده و ممکن است بازده‌هایی مختلفی دیگری نیز، نتیجه‌ای مشابهی را داشته باشد.

بدین منظور، از روش الگوریتم ژنتیک^۱ برای به دست آوردن این مقادیر استفاده شده است.



شکل ۸: تابع عضویت خطی به دست آمده برای تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی

Fig. 8. Linear Fuzzy thresholding (membership function) for phase separation

۳-۵- آستانه فازی با توابع عضویت غیرخطی

نمی‌توان با قطعیت در خصوص بهینگی روش آستانه فازی با توابع عضویت خطی و آستانه ثابت تصمیم‌گیری کرد؛ اما به‌طور کلی می‌توان بر اساس نتایج آزمایش‌ها، نتیجه گرفت، روش فازی دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های ثابت است. روش‌های غیرخطی را می‌توان منظور افزایش دقت و کاهش خطا بکار گرفت. بکارگیری این روش سبب افزایش پیچیدگی

در این مقاله به منظور رفع محدودیت‌های بیان‌شده و استخراج ویژگی‌های تصویر، بر اساس آستانه گذاری به روش فازی جهت تحلیل مقاطع پر ابهام استفاده شده است.

۳-۳- آستانه فازی

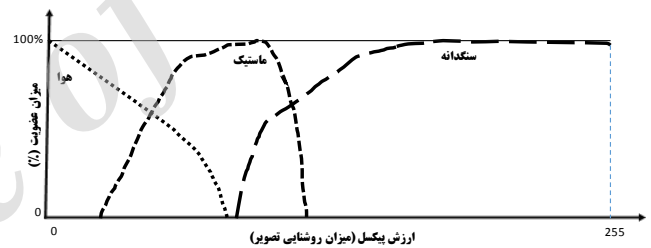
به منظور ایجاد تحلیل بر مقاطع دارای عدم قطعیت‌ها و رفع از روش فازی استفاده شده است.

فرضیه شماره ۱: رنگ‌دانه‌هایی که روشن‌اند سنگدانه هستند و رنگ‌دانه‌هایی که تیره‌اند نشان‌دهنده قیر یا هوا می‌باشند. میزان روشنایی و تیره بودن اصطلاحی توصیفی، دارای عدم قطعیت و مبهم است.

قوانین فازی به کاررفته در الگوریتم ارائه شده عبارت‌اند از:

- قانون ۱: اگر رنگ‌دانه روشن باشد، آنگاه سنگدانه است.
- قانون ۲: اگر رنگ‌دانه تیره باشد، آنگاه هوا است.
- قانون ۳: اگر رنگ‌دانه تقریباً تیره باشد، آنگاه قیر است.

توابع عضویتی بر اساس ورودی مرتبط با ارزش رنگ‌دانه (میزان روشنایی تصویر) و خروجی آن میزان عضویت رنگ‌دانه به هر کدام از اجزای مخلوط آسفالتی (هوا، قیر و سنگدانه) است.



شکل ۶: تابع عضویت برای تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی

Fig. 6. membership function for phase separation

انتخاب شکل تابع عضویت بر اساس پارامترها و کران‌های مربوط، نقش مهمی را در موفقیت یک روش فازی ایفا می‌کند. مجموعه قوانین زیر به منظور تعیین نوع تابع و پارامترهای آن مورد استفاده قرار گرفته است:

- قانون ۴: مجموع توابع عضویت برای هر رنگ‌دانه برابر ۱ باشد
- قانون ۵: برای نقاط بیش از بازده ۰ تا ۲۵۵، مقدار عضویت صفر باشد.

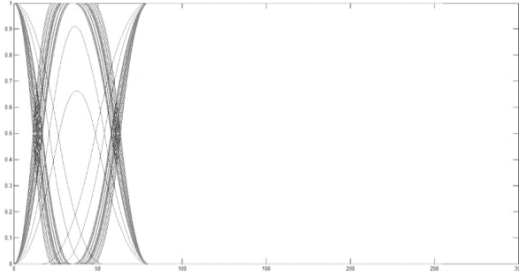
در این مقاله از دو نوع تابع عضویت منطقی فازی استفاده شده است. تابع عضویت خطی و توابع عضویت غیرخطی، به منظور مدل‌سازی مسئله مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۴- آستانه فازی با توابع عضویت خطی

بر اساس متغیرهای روش پردازش در جداسازی و به کمک اطلاعات و ویژگی‌های موجود در تصویر برای نمونه‌ها، با اعمال محدودیت‌ها ۴ متغیر توابع عضویت استخراج شده است.

۱ پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک: ضریب همزیستی ۸/۰، ضریب جهش ۲/۰، جمعیت جامعه ۲۵۰، تعداد تکرار ۱۰۰ و حداقل خطا ۱۰-۱×۵

آستانه فازی خطی) دو روش کمینه کردن و روش‌های فرا ابتکاری مورد استفاده قرار گرفته است. در زیر خروجی حاصله از پردازش هر ۳۰ نمونه (۱۵۰۰ تصویر) نشان داده شده است.



شکل ۹: توابع عضویت خروجی حاصله از پردازش هر ۳۰ نمونه (حدود ۱۵۰۰ تصویر)

Fig. 9. Output membership functions resulting from the processing of 30 samples (1,500 images)

بعد از بررسی نمونه‌ها و پردازش تصاویر آن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (الگوریتم ژنتیک) باهدف کمینه کردن اختلاف بین نتایج خروجی الگوریتم با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر پارامترها تابع عضویت انتخاب شد.

$$A(i, j) = Z(x; 1, 27) = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ 1 - \frac{(x-1)}{(26)^2} & 1 \leq x \leq 14 \\ 2 * \frac{(x-27)}{(26)^2} & 14 \leq x \leq 27 \\ 0 & x \geq 27 \end{cases} \quad (10)$$

$$M(i, j) = PI(x; 1, 27, 43, 65) = \begin{cases} 0 & x \leq 1 \\ 2 * \frac{(x-1)}{(26)^2} & 1 \leq x \leq 14 \\ 1 - 2 * \frac{(x-27)}{(26)^2} & 14 \leq x \leq 27 \\ 1 & 27 \leq x \leq 43 \\ 1 - 2 * \frac{(x-43)}{(22)^2} & 43 \leq x \leq 54 \\ 2 * \frac{(x-65)}{(22)^2} & 54 \leq x \leq 65 \\ 0 & x \geq 65 \end{cases} \quad (11)$$

$$G(i, j) = S(x; 43, 65) = \begin{cases} 0 & x \leq 43 \\ 2 * \frac{(x-65)}{(22)^2} & 43 \leq x \leq 54 \\ 1 - \frac{(x-43)}{(22)^2} & 54 \leq x \leq 65 \\ 1 & x \geq 65 \end{cases} \quad (12)$$

تابع عضویت بر اساس شبکه عصبی (ANFIS) استخراج شده اما دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی است.

محاسباتی شده و افزایش زمان محاسباتی یکی از معایب این روش می‌باشد. توابع مختلفی (همچون توابع گوسی، زنگوله‌ای Z و S شکل و غیره) برای تابع عضویت غیرخطی وجود دارد [۱۵].

با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی که پیش‌تر برای انتخاب تابع عضویت ذکر شد، توابع عضویت zmf ، smf ، $pimf$ به ترتیب برای تابع عضویت هوا و سنگ‌دانه و قیر انتخاب شده‌اند. این توابع علاوه بر تأمین شرایط مذکور، از نظر ساختاری مشابه به یکدیگر هم هستند.

تابع عضویت Z شکل (zmf): این تابع به‌عنوان تابع عضویت بخش هوا انتخاب شده است. دلیل نام‌گذاری آن شباهت ظاهری نمودار این تابع با حرف Z است. در این تابع دو پارامتر a و b کران‌های این تابع را مشخص می‌کند.

$$Z(x; a, b) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ 1 - \frac{(x-a)}{(b-a)^2} & a \leq x \leq \frac{(a+b)}{2} \\ 2 * \frac{(x-b)}{(b-a)^2} & \frac{(a+b)}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (7)$$

تابع عضویت S شکل (smf): با توجه به ویژگی‌ها این تابع می‌شود آن را به‌عنوان تابع عضویت بخش سنگ‌دانه برگزید. در این تابع دو پارامتر a و b حداکثر و حداقل این تابع را مشخص می‌کند.

$$S(x; a, b) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2 * \frac{(x-b)}{(b-a)^2} & a \leq x \leq \frac{(a+b)}{2} \\ 1 - \frac{(x-a)}{(b-a)^2} & \frac{(a+b)}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (8)$$

تابع عضویت PI شکل ($pimf$): این تابع به‌عنوان تابع عضویت بخش ماستیک (همان ترکیب قیر و فیلر) انتخاب شده است. این تابع برای مقادیر کمتر از a ، مقدار صفر را خروجی می‌دهد. همچنین برای مقادیر بین b و c ، مقدار ۱ مشخص شده است همچنین برای مقادیر ورودی بیشتر از d نیز خروجی صفر است.

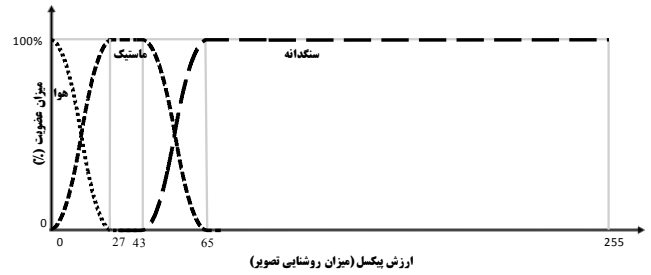
$$PI(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2 * \frac{(x-a)}{(b-a)^2} & a \leq x \leq \frac{(a+b)}{2} \\ 1 - 2 * \frac{(x-b)}{(b-a)^2} & \frac{(a+b)}{2} \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ 1 - 2 * \frac{(x-c)}{(d-c)^2} & c \leq x \leq \frac{(c+d)}{2} \\ 2 * \frac{(x-d)}{(d-c)^2} & \frac{(c+d)}{2} \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (9)$$

به‌منظور ارزیابی توابع عضویت (شامل انتخاب کران‌ها و پارامترهای در

- 1 Z-shaped built-in membership function
- 2 S-shaped built-in membership function
- 3 Π -shaped built-in membership function

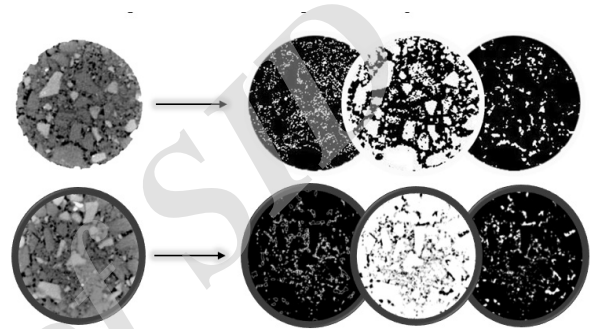
حاصله از هر یک از این روش‌ها را نشان داده است و برای درک بهتر، نمونه‌ها به صورت صعودی رسم شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مجموع اختلاف مربعات الگوریتم فازی غیرخطی نسبت به الگوریتم ثابت ۷۷٪ بهبود داشته است. این نسبت برای الگوریتم فازی خطی ۶۵٪ می‌باشد.

بیشترین اختلاف نشان، دهنده آن است که در نمونه‌های مورد مطالعه، همه خروجی‌های الگوریتم کمتر از این مقدار بوده است. بیشترین اختلاف بین درصد هوای خروجی الگوریتم با درصد‌های واقعی مخلوط‌های آسفالتی برای الگوریتم ثابت، داینامیک، فازی خطی و فازی غیرخطی به ترتیب ۲/۸، ۲/۵، ۲/۲ و ۱/۸۴ است؛ که نشان می‌دهد، آستانه گذاری در جداسازی با کمک روش‌های مختلف نتایج مختلفی را در بر دارد. این نتایج نشان می‌دهد الگوریتم فازی غیرخطی ۳۴٪ بهبود در خطا حداکثری داشته است و این درصد برای فازی خطی ۲۱٪ است.



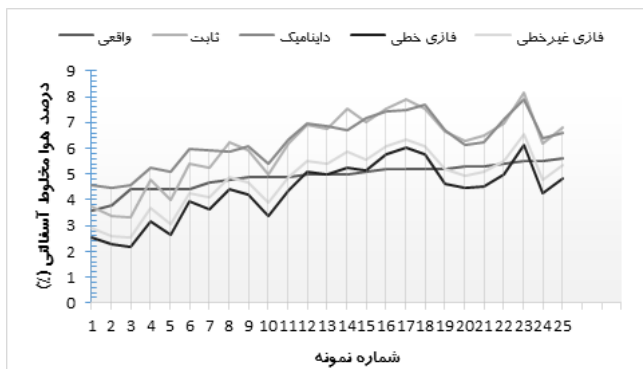
شکل ۱۰: توابع عضویت فازی غیرخطی برای تفکیک سه بخش مخلوط آسفالتی

Fig. 10. Output membership functions resulting from the processing of 30 samples (1,500 images)



شکل ۱۱: خروجی تفکیک الگوریتم تفکیک اجزا (بخش بالا) خروجی آستانه دینامیک، بخش پایین خروجی آستانه فازی

Fig. 11. Difference of processed images by crisp (upper image) and Fuzzy (lower image) techniques



شکل ۱۲: مقایسه روش‌های مختلف تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی
Fig. 12. Calculated air void content for different approaches

۴-۲- بررسی خروجی‌های تراکم
با داشتن درصد هوای هر یک از نمونه‌ها می‌توان درصد تراکم نمونه مخلوط آسفالتی را با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه نمود [۱۶]:

$$Compaction = \frac{G_{mb}}{G_{mm}} = 1 - \left(\frac{G_{mm}}{G_{mm}} - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) = 1 - \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) = 1 - P_a \quad (14)$$

که در آن:

G_{mb} : وزن مخصوص مخلوط آسفالتی

G_{mm} : وزن مخصوص تئوریک مخلوط آسفالتی

P_a : درصد هوای موجود در مخلوط آسفالتی

در جدول شماره ۲ نتایج آزمایشگاهی با استفاده از ژیراتوری در ستون ۱ برای ۲۵ نمونه آورده شده است. همچنین مقادیر مربوط به تراکم بر اساس الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برای آستانه‌های، ثابت، داینامیک، فازی خطی و غیرخطی در ستون‌های ۲ تا ۵ آورده شده است. به منظور مقایسه خروجی درصد تراکم حاصل الگوریتم‌های مختلف، سه معیار اختلاف مربعات،

۴- مقایسه و تحلیل نتایج

با توجه به اینکه تراکم مخلوط آسفالتی همبستگی زیادی با درصد هوای مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد، جزئیات بیشتری به منظور بررسی تأثیر درصد هوا ضروری است.

۴-۱- درصد هوا

جداسازی فازهای نمونه مخلوط آسفالتی که در بخش قبل ارائه شد با استفاده از رابطه ۱۳ درصد هوا موجود در هر نمونه محاسبه می‌شود.

$$\%AirVoide = \frac{\sum_i \sum_j A(i, j)}{\sum_i \sum_j A(i, j) + \sum_i \sum_j M(i, j) + \sum_i \sum_j G(i, j)} * 100 \quad (13)$$

برای کلیه نمونه‌ها، درصد هوا محاسبه می‌شود. در این معادله $A(i, j)$ ارزش پیکسلی سلول که حاصل از خروجی الگوریتم تفکیک اجزا برای بخش هوا و $M(i, j)$ و $G(i, j)$ به ترتیب ارزش پیکسلی خروجی ماستیک و سنگ‌دانه است.

برای مقایسه روش‌های آستانه سازی درصد هوای حاصله از هر کدام از این روش‌ها با درصد هوای واقعی بررسی شده است. شکل ۱۲ درصد هوای

همان‌طور که در جدول مشخص شده است، روش فازی غیرخطی، با حداکثر خطای ۱/۸۴، کمترین میزان خطا را در میان سایر روش‌ها به خود اختصاص داده است. همچنین فازی خطی با خطای ۲/۲ بعد از این روش قرار دارد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، خطای روش فازی نسبت به روش‌های ثابت و دینامیک کمتر بوده و کاهش خطا در این روش ۲ برابر روش دینامیک و تقریباً بیش از ۳ برابر روش ثابت است. همچنین مقدار P-Value خروجی آزمون t برای الگوریتم فازی غیرخطی برابر با ۰/۷۲۸ است و برای دیگر الگوریتم‌ها این مقدار کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد هم‌قواری دیگر الگوریتم‌های قابل ملاحظه نیست.

P-Value بیشترین خطا بر اساس درصد و برای روش‌های مختلف، در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. آزمون t که یکی از پرکاربردترین آزمون‌های آماری است که هم‌قواری یا یکسان بودن و نبودن میانگین نمونه را بررسی می‌کند. از این آزمون جهت سنجش هم‌قواری اطلاعات خروجی از الگوریتم‌ها با داده‌های واقعی استفاده شده است. اگر مقدار خروجی آزمون (p-value) از سطح معناداری (۰/۰۵) کمتر باشد، هم‌قواری داده‌ها نیز رد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد تفکیک اجزا با استفاده از آستانه دینامیک بهتر از آستانه ثابت خروجی می‌دهد و تفکیک با آستانه فازی غیرخطی و خطی نیز خطای کمتری نسبت به روش آستانه دینامیک داشته است.

جدول ۲: تراکم خروجی حاصل از الگوریتم‌های مختلف (برای ۲۵ نمونه)

Table 2. Output compaction of different algorithms (for 25 samples)

نمونه	داده واقعی	ثابت	دینامیک	فازی خطی	فازی غیرخطی
نمونه ۱	۹۶/۶	۹۶/۶۷۴۷	۹۵/۴۱۱۲۱	۹۷/۸۰۴۹	۹۷/۴۴۲۱۱
نمونه ۲	۹۶/۲	۹۶/۶۲۰۸	۹۵/۵۴۱۷۳	۹۷/۷۴۰۶۷	۹۷/۳۹۰۷۴
نمونه ۳	۹۶/۴	۹۶/۲۴۲۳	۹۵/۴۲۶۳۶	۹۷/۴۷۱۰۲	۹۷/۹۳۹۱
نمونه ۴	۹۵/۶	۹۵/۹۹۵	۹۴/۹۳۴۴۷	۹۷/۳۶۱۳	۹۶/۹۲۲۱۷
نمونه ۵	۹۵/۶	۹۵/۱۹۶۹	۹۴/۷۵۷۰۵	۹۶/۸۲۰۸۶	۹۶/۳۰۵۶۴
نمونه ۶	۹۵/۱	۹۴/۹۹۰۹	۶۱۵۱۵/۹۴	۹۶/۶۲۱۸۷	۹۶/۱۲۴۹۵
نمونه ۷	۹۵/۳	۹۴/۷۳۴۳	۹۴/۶۷۹۵	۹۶/۳۴۳۸	۹۵/۸۸۸۹۳
نمونه ۸	۹۵/۶	۹۴/۵۹۶۸	۹۴/۳۲۱	۹۶/۷۷۷۲	۹۵/۷۲۲۰۴
نمونه ۹	۹۵/۱	۹۴/۵۵۵	۹۳/۹۲۰۳	۹۵/۸۰۷۹۱	۹۵/۳۳۶۰۷
نمونه ۱۰	۹۴/۵	۹۳/۸۲۸۲	۹۳/۵۸۹۹۶	۹۵/۷۵۵۹۱	۹۵/۱۹۶۸۱
نمونه ۱۱	۹۵/۱	۹۳/۷۹۰۲	۹۳/۶۸۴۶۱	۹۵/۶۳۳۳۴	۹۵/۱۳۳۲۴
نمونه ۱۲	۹۵/۲	۹۳/۷۶۳۴	۹۴/۱۳۷۲۲	۹۵/۵۶۴۲۹	۹۵/۹۳۷۴
نمونه ۱۳	۹۴/۷	۹۳/۷۲۲۲	۹۳/۸۵۱۵۲	۹۵/۵۴۰۰۳	۹۵/۶۲۸۵
نمونه ۱۴	۹۴/۷	۹۳/۴۸۶۸	۹۳/۷۳۷۸۲	۹۵/۴۹۹۸	۹۴/۹۲۴۸۵
نمونه ۱۵	۹۴/۸	۹۳/۳۴۷۳	۹۳/۲۹۳۷۱	۹۵/۳۵۲۹۹	۹۴/۷۹۷۳۵
نمونه ۱۶	۹۴/۳	۹۳/۱۸۵۷	۹۳/۶۰۵۶۹	۹۵/۳۹۹۹۸	۹۴/۷۲۷۸
نمونه ۱۷	۹۴/۴	۹۳/۱۶۹۴	۹۳/۳۹۹۷۷	۹۵/۱۷۲۸۶	۹۴/۶۳۹۰۷
نمونه ۱۸	۹۵	۹۳/۲۲۸۹	۹۳/۱۵۲۳۴	۹۵/۱۱۶۶	۹۴/۶۱۳۰۵
نمونه ۱۹	۹۵	۹۳/۹۷۲	۹۳/۵۰۴۱	۹۴/۹۳۰۷۸	۹۴/۵۱۴۶۶
نمونه ۲۰	۹۴/۶	۹۳/۹۴	۹۲/۸۵۴۰۲	۹۴/۹۹۷۹۷	۹۴/۴۹۱۳۳
نمونه ۲۱	۹۴/۹	۹۲/۹۸۶۹	۹۲/۸۱۲۰۱	۹۴/۸۸۲۹۳	۹۴/۴۳۷۹
نمونه ۲۲	۹۵	۹۲/۴۶۸۵	۹۳/۲۹۵۹۲	۹۴/۷۷۸۲۷	۹۴/۱۲۳۳۵
نمونه ۲۳	۹۴/۸	۹۲/۴۶۱۸	۹۲/۵۷۱۸۳	۹۴/۲۴۶۹	۹۳/۹۳۲۰۳
نمونه ۲۴	۹۴/۸	۹۲/۴۳۹۵	۹۲/۲۹۴۰۵	۹۴/۲۴۰۵۶	۹۳/۹۱۸۵۸
نمونه ۲۵	۹۴/۱	۹۱/۹۷۸۵	۹۲/۹۶۳۶۷	۹۴/۳۶۹۶۲	۹۳/۷۱۶۶۵

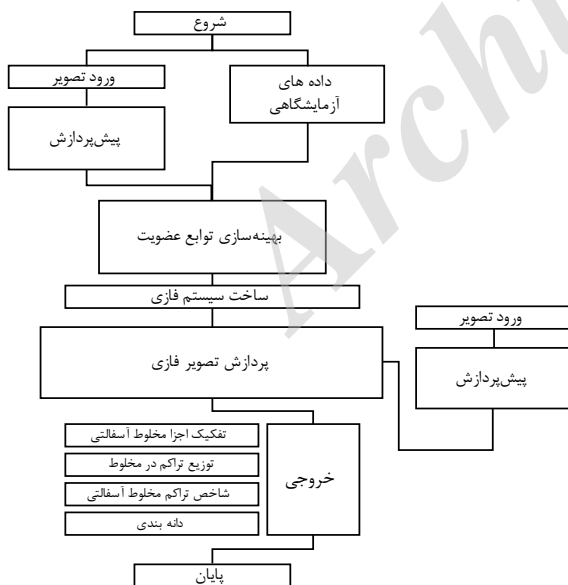
۵- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی روش جدیدی از آستانه گذاری به روش فازی غیرخطی با کمک پردازش تصویر سی تی اسکن به منظور بررسی خواص حجمی و تراکم مخلوط آسفالتی ارائه شد. این الگوریتم با استفاده از آستانه فازی تصاویر سی تی اسکن مخلوط آسفالتی را به سه جز هوا قیر سنگ دانه تفکیک می کند. نتایج حاصله از آستانه فازی به مراتب بهتر از روش های قبلی بوده است.

در این الگوریتم بعد از تفکیک اجزا، با کمک گرفتن از درصد هوا موجود در مخلوط آسفالتی تراکم آن را با خطای کمتر از ۱/۸۳ درصد ارائه داده است. خروجی ها و روش های ارزیابی نشان می دهد که این روش قابلیت استفاده به عنوان یک آزمون غیر مخرب، سریع، دقیق و قابل انعطاف را دارد.

در این مقاله علاوه بر استخراج تراکم بر اساس تصویر، به بررسی توزیع هوا در روش های مختلف تراکم پرداخته شد و نشان داد که توزیع هوا به روش تراکم وابسته است. علاوه بر نتایج مذکور می توان نتیجه گرفت:

- سی تی اسکن به عنوان ابزار قدرتمند قابلیت بررسی ویژگی های میکرو ساختاری مخلوط آسفالتی را دارد.
- به دست آوردن تراکم آسفالت با پردازش تصاویر سی تی اسکن با خطای کمتر از ۱/۸۳ درصد به دست آمده و می توان با توسعه آن را به عنوان ابزار سنجش غیر مخرب تراکم مخلوط آسفالتی مطرح نمود.
- منطق فازی در کاهش خطای پردازش تصویر سی تی اسکن مخلوط آسفالتی بسیار مؤثر است.



شکل ۱۴: روند الگوریتم پیشنهادی

Fig. 14. Flowchart of Fuzzy algorithm for phase separation

جدول ۳: مقایسه خروجی درصد تراکم حاصل الگوریتم های مختلف

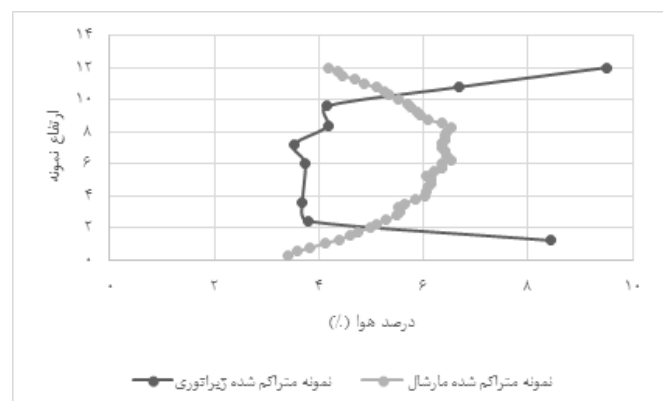
Table 3. Statistical comparison of different methods

روش آستانه	مجموع اختلاف مربعات	بیشترین خطا (%)	P-Value
ثابت	۷۰/۳	۲/۷	صفر
دینامیک	۶۱/۲۱	۲/۵	صفر
فازی خطی	۲۴/۵۸	۲/۲	۰/۲۳
فازی غیرخطی	۱۵/۸۳	۱/۸۴	۰/۷۲۸

۴-۳ کاربرد روش: توزیع تراکم در نمونه متراکم

الگوریتم فازی برای بررسی ریزساختاری تراکم مخلوط آسفالتی بر اساس پردازش تصویر از سایر روش های موجود، مناسب تر است. در این بخش یکی از این کاربردهای این الگوریتم، ارائه شده است. نحوه توزیع تراکم در مخلوط آسفالتی به روش تراکم مخلوط وابسته است. در این بخش توزیع تراکم در مخلوط های متراکم شده با روش ژیراتوری و مارشال مقایسه شده است. با توجه به معادله ۱۴ توزیع تراکم را می توان با توزیع هوا یکسان در نظر گرفت. در سال های گذشته مطالعات در مورد توزیع هوا در مخلوط آسفالتی صورت گرفته است [۶ و ۱۷].

شکل ۱۳ توزیع هوا (توزیع تراکم) در مخلوط های متراکم شده با روش ژیراتوری و روش مارشال نشان می دهد. توضیح آنکه توزیع هوا در مخلوط آسفالتی متراکم شده به روش مارشال با توجه به اینکه نیرو از بالا و پایین بر مواد وارد می شود، به صورتی است که در اطراف میزان هوای کمتری نسبت به مرکز وجود دارد. به دلیل اینکه در ژیراتوری با توجه به وجود نیروهای دورانی ابتدا هوا مرکز مخلوط آسفالتی خارج می شود، هوای کمتری نسبت به مرکز داشته و توزیع هوا و در نتیجه تراکم، کاملاً متفاوت است.



شکل ۱۳: توزیع هوا در نمونه مخلوط آسفالتی متراکم شده به روش ژیراتوری

Fig. 13. Air void distribution compacted by different methods

- A. Mehrabi An Image Processing Approach to Asphalt Concrete Feature Extraction, *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(1) (2015) 54-60.
- [9] T. Yang, J.P. Ignizio, H.-j. Kim, Fuzzy programming with Nonlinear membership functions: Piecewise linear approximation, *Fuzzy Sets and Systems*, 41(1) (1991) 39-53.
- [10] I.I. Al-Qadi, Z. Leng, A. Larkin, In-place hot mix asphalt density estimation using ground penetrating radar and 3-d finite element analyses, Illinois University of illinois at urbana-champaign advanced transportation research and engineering laboratory (atrel), 2011.
- [11] E. Masad, V.K. Jandhyala, N. Dasgupta, N. Somadevan, N. Shashidhar, Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2) (2002) 122-129.
- [12] Z. You, S. Adhikari, a.Q. Dai, Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures, *Journal of Engineering Mechanics*, 134(12) (2008) 1053-1063.
- [13] C.E. Synolakis, R.M. Leahy, M.B. Singh, Z. Zhou, Development of an Asphalt Core Tomographer, Strategic Highway Research Program, Washington, 1993.
- [14] E. Coleri, J.T. Harvey, K. Yang, M. John A micromechanical approach to investigate asphalt concrete rutting mechanisms, *Construction and Building Materials*, 30 (2011) 36-49.
- [15] I. Onifade, D. Jelagin, A. Guarin, B. irgisson, Asphalt Internal Structure Characterization with X-Ray Computed Tomography and Digital Image Processing, in: *Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials*, Springer Netherlands, 2013, pp. 139-158.
- [16] Z.Q. Yue, S. Chen, L.G. Tham, Finite element modeling of geomaterials using digital image processing, *Computers and Geotechnics*, 30(5) (2003) 375-397.
- [17] I.S. Bessa, V.T.F. Castelo Branco, J.B. Soares, Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 370-378.
- تفکیک اجزا مخلوط آسفالتی با استفاده از آستانه فازی غیرخطی نسبت به دیگر روش‌های بررسی‌شده (آستانه فازی خطی، آستانه دینامیک و آستانه ثابت) دارای خطای کمتری است.
 - توزیع هوا به روش متراکم سازی مخلوط وابسته است و این مسئله را باید در انتخاب روش متراکم سازی مدنظر قرارداد.
- مراجع**
- [1] H. Wang, P. Hao, Numerical Simulation of Indirect Tensile Test Based on the Microstructure of Asphalt Mixture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 21-29.
- [2] K.H. Moon, A. Cannone Falchetto, J.H. Jeong, Microstructural analysis of asphalt mixtures using digital image processing techniques, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(1) (2014) 74-86.
- [3] H.M. Zelelew, A.T. Papagiannakis, A volumetrics thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images, *International Journal of Pavement Engineering*, 12(6) (2011) 543-551.
- [4] H.M. Zelelew, A.T. Papagiannakis, E. Masad, Application of Digital Image Processing Techniques for Asphalt Concrete Mixture Images, in: *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) Goa, India 2008*.
- [5] H. Zelelew, E. Mahmoud, A.T. Papagiannakis, Micromechanical Simulation of the Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, in: *Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials*, Springer Netherlands, 2013, pp. 421-432.
- [6] H.m. Zelelew, Simulation of the permanent deformation of asphalt concrete mixtures using discrete element method (DEM) Washington State university, Washington 2008.
- [7] F. Moghadas Nejad, F. Zare motekhas, H. Zakeri, New Representation of Asphalt Compaction Using an Image Processing Algorithm, in: *The third international reliability engineering conference*, Tehran, 2014.
- [8] F. Moghadas Nejad, F. Zare motekhas, H. Zakeri,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Moghadas Nejad, M.M. Makhmalbaf, H. Zakeri, Improving the Results of Asphalt Mixture Density Derived From CT Images Using Fuzzy Thresholding. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 779-790.

DOI: 10.22060/ceej.2017.10552.4983



Archive of SID