

وزارت علوم تحقیقات و فناوری

دانشگاه صنعتی شاهرود

حوزه معاونت پژوهشی و فناوری

گزارش پایانی طرح پژوهشی

شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح راه

با استفاده از پردازش تصویر

با کد ۱۵۰۳

مجریان طرح:

حیدر طوسیان شاندریز

دانشکده مهندسی برق

حسین قاسمزاده طهرانی

دانشکده مهندسی عمران

تابستان ۱۳۸۴



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

این گزارش نتیجه طرح پژوهشی با عنوان « ارزیابی و برآورد خرابیهای روسازی با استفاده از پردازش تصویر» است که در تاریخ ۸ / ۳ / ۸۳ به تصویب شورای پژوهشی دانشگاه رسیده است.

چکیده

یکی از اهداف سیستمهای مدیریت روسازی راه شناسایی خرابیهای سطحی و پیش‌بینی زمان مناسب برای تعمیر و مرمت آنهاست. در این بین، از میان مجموعه خرابیهایی که ممکن است در روسازی و راه ایجاد شوند، ترکهای سطح آسفالت از اهمیت خاصی برخوردار هستند. برخی از ترک خوردگیها مانند ترکهای عرضی (انقباضی)، ترکهای طولی (درزهای اجرایی) و ترکهای بلوکی جزو خرابیهای سطحی محسوب می‌شوند و برخی دیگر مانند ترکهای موزائیکی (پوست سوسماری) و ترکهای برشی (لبه‌ای) جزو خرابیهای سازه‌ای طبقه‌بندی می‌شوند و هر یک مستلزم روش مرمت جداگانه و متفاوتی می‌باشند. در بررسیهایی که به منظور تعیین مشخصات ترک خوردگیهای سطح آسفالت انجام می‌گیرد موارد زیر باید بطور دقیق و واضح مشخص شوند: تعیین موقعیت ترکها در یک شبکه راه، تعیین مساحت قسمت‌های ترک خورده، تعیین نوع ترکها و تعیین شدت ترک خوردگیها.

ارزیابی ترکهای سطح روسازی در یک شبکه بزرگ راه به صورت دستی امری بسیار وقت‌گیر، پرهزینه و خطرناک بوده و به دلیل اینکه تحت تاثیر قضاوت شخصی افراد ارزیاب قرار دارد منجر به جوابهای غیر یکسان شده و نتایج آن از دقت نسبتاً کمی برخوردار است. با توجه به موارد بالا از مدتها پیش طراحی و ساخت یک سیستم خودکار برای شناسایی ترک و طبقه‌بندی آن مورد توجه برخی از موسسات تحقیقاتی و پژوهشی قرار گرفته است.

مجموعه حاضر، گزارش طرح پژوهشی با عنوان «شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح راه با استفاده از پردازش تصویر» می‌باشد. در این طرح تصاویر تهیه شده از سطح آسفالت مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تئوری فازی، شبکه عصبی و ناحیه‌بندی تصویر، ترکهای موجود در تصویر شناسایی شده و در یکی از گروه‌های ترک طولی، عرضی، بلوکی، موزائیکی یا برشی طبقه‌بندی می‌گردد.

فهرست مطالب

چکیده.....	الف
فهرست مطالب	ب
لیست علائم و اختصارات	د
۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- ضرورت اجرای طرح	۲
۱-۲- تاریخچه موضوع	۴
۲- بررسی ترک خوردگی در روسازی آسفالتی	۷
۱-۲- انواع ترک خوردگی ها	۷
۲-۱-۱- ترکهای موزائیکی (پوست سوسماری)	۸
۲-۱-۲- ترکهای بلوکی	۹
۲-۱-۳- ترکهای لبه‌ای (برشی)	۱۱
۲-۱-۴- ترکهای طولی	۱۲
۲-۱-۵- ترکهای عرضی	۱۳
۲-۲- دلایل ترک خوردگی آسفالت	۱۴
۲-۲-۱- بارگذاری روسازی و خستگی آسفالت	۱۵
۲-۲-۲- ترکهای برودتی	۲۰
۲-۲-۳- ترکهای ناشی از تغییر شکلهای موضعی	۲۶
۲-۳- روشهای ترمیم ترک	۳۰
۳- شناسایی و طبقه‌بندی ترکها با استفاده از الگوریتم فازی	۳۵
۱-۳- مبانی تئوری فازی	۳۶
۲-۳- الگوریتم فازی برای شناسایی و طبقه‌بندی ترک	۴۰
۳-۲-۱- گروه ترکهای طولی	۴۳
۳-۲-۲- گروه ترکهای عرضی	۴۴
۳-۲-۳- گروه ترکهای بلوکی	۴۴
۳-۲-۴- گروه ترکهای موزائیکی	۴۵
۳-۳- مطالعه موردی	۴۷
۳-۴- بررسی دقت نتایج	۵۰

۵۳	۴- بینایی ماشین و پردازش تصویر
۵۳	۴- ۱- مقدمه
۵۴	۴- ۲- ایجاد تصویر دیجیتالی
۵۴	۴- ۳- پردازش تصویر
۵۵	۴- ۳- ۱- اکتساب تصویر
۵۶	۴- ۳- ۲- پیش پردازش تصویر
۵۶	۴- ۳- ۳- تحلیل تصویر
۵۷	۴- ۳- ۴- تعبیر تصویر
۵۷	۴- ۴- عملیات حد آستانه دودویی
۵۸	۴- ۵- تشخیص لبه
۵۹	۴- ۵- ۱- لبه تصویر
۶۰	۴- ۵- ۲- گرادیان
۶۲	۴- ۵- ۳- لاپلاسیان
۶۲	۴- ۵- ۴- فیلترهای کانی - دریشه
۶۳	۴- ۶- عملیات ریخت شناسی
۶۳	۴- ۶- ۱- عملیات اتساع و فرسایش
۶۴	۴- ۶- ۲- عملیات اسکلت بندی
۶۶	۵- شبکه عصبی و تشخیص الگو
۶۶	۵- ۱- مقدمه
۶۷	۵- ۲- ساختار شبکه عصبی
۶۹	۵- ۲- ۱- شبکه تک لایه
۷۰	۵- ۲- ۲- شبکه چند لایه
۷۱	۵- ۳- آموزش شبکه عصبی
۷۲	۵- ۴- یادگیری شبکه عصبی
۷۳	۵- ۵- تشخیص الگوی ترک
۷۴	۶- مراحل بعدی تحقیق
۷۶	۷- تقدیر و تشکر
۷۶	۸- منابع و مراجع
۷۸	پیوست الف : مقالات حاصل از طرح
۱۱۵	پیوست ب : لیست برنامه کامپیوتری

لیست علائم و اختصارات

ضریب سختی قیر.....	S_b
ضریب سختی آسفالت.....	S_m
درصد فضای خالی آسفالت.....	e
نسبت حجم سنگدانه‌ها به حجم آسفالت.....	C_v
شاخص ترک خوردگی روسازی.....	I
تعداد ترکهای از نوع مرکب.....	N_m
تعداد ترکهای از نوع کامل.....	N_m
تعداد ترکهای از نوع ناقص.....	N_h
عمر روسازی.....	a
فاکتور نوع بستر.....	d
دمای طرح در زمستان.....	m
ضخامت آسفالت.....	T
نرخ تغییرات دما.....	t'
نرخ نفوذ آب از داخل ترک.....	I_c
تعداد ترکهای طولی.....	N_c
عرض روسازی.....	W_p
طول ترکهای عرضی.....	W_c
فاصله ترکهای عرضی.....	C_s
نرخ نفوذ آب از روسازی بدون ترک.....	K_p
نرخ نفوذ آب از واحد سطح روسازی.....	q_i
درجه عضویت در یک مجموعه فازی.....	$\mu_A(x)$
مقدار گسترش ترک در هر جهت.....	S_i
درصد گسترش ترک در هر جهت.....	P_i
مجموع مقادیر گسترش ترک در تصویر.....	S

۱- مقدمه

خرابیهای روسازی راه را می‌توان در دو گروه شامل « خرابیهای سطحی » و « خرابیهای سازه ای » طبقه‌بندی نمود. خرابیهای سطحی با روشهای ساده مرمت راه قابل ترمیم بوده و هزینه نسبتاً کمی را نیاز دارند اما خرابیهای سازه ای که معمولاً ناشی از گسیختگی برشی در روسازی و ساختمان راه بوده و یا به دلیل تغییر شکلها و نشستهای زیاد در خاک بستر به وجود می‌آیند به تعمیرات اساسی روسازی و گاهی اوقات به نوسازی راه نیاز دارند. تشخیص به موقع خرابیهای سطحی از آن جهت اهمیت دارد که با ترمیم آنها، عوامل بروز خرابیهای سازه‌ای (مانند نفوذ آب و افت مقاومت روسازی) حذف شده و گسیختگی یا نشست راه به تعویق می‌افتد و به عبارت دیگر عمر مفید راه افزایش می‌یابد. یکی از اهداف سیستمهای مدیریت روسازی راه نیز شناسایی خرابیهای سطحی و پیش‌بینی زمان مناسب برای تعمیر و مرمت آنهاست.

در این بین، از میان مجموعه خرابیهایی که ممکن است در روسازی و راه ایجاد شوند، ترکهای سطح آسفالت از اهمیت خاصی برخوردار هستند. برخی از ترک خوردگیها مانند ترکهای عرضی (انقباضی)، ترکهای طولی (درزهای اجرایی) و ترکهای بلوکی جزو خرابیهای سطحی محسوب می‌شوند و برخی دیگر مانند ترکهای موزائیکی (پوست سوسماری) و ترکهای برشی (لبه‌ای) جزو خرابیهای سازه ای طبقه‌بندی می‌شوند و هر یک مستلزم روش مرمت جداگانه و متفاوتی می‌باشند. از طرف دیگر نفوذ آب از داخل ترکها (حتی اگر جزو خرابیهای سطحی باشند) موجب کاهش مقاومت لایه اساس و زیراساس شده و روند تخریب روسازی و توسعه خرابیهای سازه‌ای را تسریع می‌نماید. هر قدر شدت ترک خوردگیها بیشتر باشد، دبی آب نفوذی بیشتر شده و مرمت آن از اولویت بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین، در بررسیهایی که به منظور تعیین مشخصات ترک خوردگیهای سطح آسفالت انجام می‌گیرد موارد زیر باید بطور دقیق و واضح مشخص شوند.

– تعیین موقعیت ترکها در یک شبکه راه

- تعیین مساحت قسمت‌های ترک خورده

- تعیین نوع ترکها

- تعیین شدت ترک خوردگیها

آنچه که تا کنون در فعالیتهای ارزیابی راه انجام می‌گرفته است به صورت بازدید از بعضی مناطق نمونه بوده که بطور تصادفی انتخاب می‌شوند. در ضمن بازدید، شخص ارزیاب در طول مسیر حرکت کرده و بر اساس قضاوت شخصی خود مشخصات ترکها را (شامل محل، مساحت، نوع و شدت ترک خوردگی) ثبت می‌نماید. سرانجام با ورود این داده‌ها به یک سیستم مدیریت روسازی می‌توان اثر خرابیها را بر کاهش کیفیت روسازی راه برآورد نمود. در عین حال استفاده از روشهای دستی برای ارزیابی روسازی راه در یک شبکه بزرگ موجب صرف وقت و هزینه بسیار زیاد می‌گردد و حاصل آن نتایجی با اعتبار نسبتاً کم می‌باشد. از طرف دیگر نتایج این گونه بررسی‌ها غیر یکسان است و با توجه به قضاوت شخصی افراد مختلف می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. به عنوان مثال یک ترک بلوکی با شدت زیاد که از نوع خرابیهای سطحی است ممکن است توسط برخی افراد به عنوان ترک موزائیکی با شدت کم یا متوسط ارزیابی شود که جزو گروه خرابیهای سازه‌ای است. از آنجا که براساس نتایج این گونه ارزیابی‌ها باید برنامه تعمیر و نگهداری یک شبکه راه ارائه شود و طبق آن سرمایه‌گذارهای کلان صورت خواهد گرفت لذا از درستی و صحت نتایج ارزیابی‌ها باید کاملاً مطمئن بود.

۱-۱- ضرورت اجرای طرح

روسازیهای آسفالتی در طول عمر سرویس دهی خود دچار خرابیهای متعدد و متنوعی می‌شوند و در نتیجه به تدریج از کیفیت آنها کاسته شده و روسازی رو به اضمحلال می‌گذارد. این خرابیها ممکن است از نوع سازه‌ای باشند و توان باربری روسازی را کاهش دهند و یا ممکن است از نوع خرابیهای سطحی باشند و فقط بر عملکرد روسازی و کیفیت حرکت خودروها تاثیر بگذارند. در سیستمهای مدیریت روسازی راه، پیش‌بینی

نحوه گسترش هر یک از این دو گروه خرابی اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. زیرا بر اساس نتایج این گونه پیش‌بینی‌ها، سیستم مدیریت روسازی راجع به روش مناسب تعمیر و مرمت روسازی و زمان اجرای آن تصمیم‌گیری می‌کند. در این بین ترکهای روسازی آسفالتی یکی از گسترده‌ترین و رایج‌ترین نوع خرابیها می‌باشد و شناسایی دقیق آنها و طبقه‌بندی آنها بدان جهت حائز اهمیت است که بعضی از ترک خوردگی‌ها مانند ترکهای موزائیکی و ترکهای برشی جزو خرابیهای سازه‌ای محسوب می‌شوند و گاهی اوقات شدت زیاد و وسعت بزرگ آنها بازسازی راه را الزامی می‌سازد، در عین حال برخی دیگر از ترکها شامل ترکهای بلوکی، ترکهای عرضی و ترکهای طولی در گروه خرابیهای سطحی طبقه‌بندی می‌شوند و روشهای مرمت خاص خود را در یک شبکه راه (مثلا شبکه راههای استان سمنان) به صورت دستی امری بسیار وقت‌گیر، پرهزینه و خطرناک بوده و به دلیل اینکه تحت تاثیر قضاوت شخصی افراد ارزیاب قرار دارد منجر به جوابهای غیر یکسان شده و نتایج آن از دقت نسبتا کمی برخوردار است. در واقع می‌توان گفت که ارزیابی ترکهای سطح روسازی در یک شبکه بزرگ راه به صورت دستی عملا غیر ممکن است. در چنین شرایطی لزوم استفاده از یک سیستم اتومات و خودکار برای ارزیابی ترکهای سطح راه که در کمترین زمان و با بیشترین دقت بتواند نتایج قابل اعتمادی را ارائه نماید به وضوح آشکار می‌شود. البته هزینه استفاده از چنین سیستمی باید در حدی باشد که استفاده از آن نیز مقرون به صرفه باشد.

با توجه به موارد بالا از مدتها پیش طراحی و ساخت یک سیستم خودکار برای شناسایی ترک و طبقه‌بندی آن مورد توجه برخی از موسسات تحقیقاتی و پژوهشی قرار گرفته است. تا کنون تصاویر دیجیتالی، سیستمهای لیزری و سیستمهای اولتراسونیک برای شناسایی ترکها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نکته قابل ذکر این است که الگوریتم طبقه‌بندی ترکها می‌تواند کاملا مستقل از روش شناسایی ترک بررسی شود. در این مورد نیز تا کنون روشهایی مبتنی بر تحلیلهای آماری، تئوری فازی، شبکه عصبی، سیستمهای فازی - عصبی، الگوریتم ژنتیک و غیره از طرف افراد مختلف پیشنهاد شده است. اما دقت هیچکدام بقدری نبوده است که بتواند مورد قبول سایرین قرار بگیرد.

۱-۲- تاریخچه موضوع

تا کنون در زمینه شناسایی ترکهای سطح راه فعالیتهای تحقیقاتی و اجرایی متعددی از طرف افراد یا موسسات مختلف انجام گرفته است. بخش عمده این فعالیتهای که منجر به ساخت سیستمهای خودکار شناسایی و یا طبقه‌بندی ترک نیز شده‌اند در کشورهای امریکا، انگلستان، سوئد و استرالیا متمرکز شده‌اند. این فعالیتهای از لحاظ علمی و کاربردی در سطوح متفاوتی صورت گرفته‌اند و به همین دلایل نتایج حاصل از آنها نیز از درجه اعتبار یکسانی برخوردار نیستند. همچنین هر یک از این فعالیتهای مبتنی بر روش و تکنولوژی خاصی است و همگی آنها لزوماً از یک روش استفاده نکرده‌اند.

برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ پروژه «شناسایی ترکهای آسفالت بر اساس تصاویر پردازش شده سطح راه : SHRP-92» به عنوان بخشی از برنامه تحقیقات استراتژیک اداره راههای امریکا به مدت سه سال به اجرا درآمد. در این پروژه روشی ابداع شد که با استفاده از عکسهای متوالی و بهم پیوسته از سطح راه، ترکها را روی عکس شناسایی نماید و سپس یک نقشه از ترکهای روسازی در امتداد راه ارائه نماید. این نقشه ترکهای روسازی باید توسط کارشناسان مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار بگیرد تا نوع، شدت و مساحت ترک خوردگیها مشخص شود. مزایای این روش که شامل سرعت زیاد، دقت کافی و سهولت در شناسایی ترکها بودند موجب انجام تحقیقات بیشتری در این زمینه گردید. این پروژه بعداً توسط موسسه آشتو و مجموعه‌ای از دانشگاههای امریکا و کانادا توسعه یافته و منجر به ساخت سیستمهای خودکار و متحرک شناسایی ترکهای آسفالت و آنالیز آنها شده است. سیستمهایی که توسط آشتو ساخته شده‌اند با استفاده از تصاویر دیجیتالی و لیزری قادرند موقعیت ترکها و ضخامت آنها را شناسایی نمایند. در مرحله بعد برای آنالیز نقشه ترک خوردگیها، الگوریتمهای متعددی توسط شاخه‌های مختلف آشتو پیشنهاد شده است که می‌توانند نوع، شدت و مساحت ترک خوردگی را مشخص نمایند. در حال حاضر تحقیقات این موسسات بر موضوع بهینه سازی الگوریتمهای آنالیز ترک متمرکز می‌باشد.

از دیگر مراکزی که نقش مهمی در توسعه روش‌های شناسایی ترک دارند مرکز تحقیقات روسازی در دانشگاه برکلی است. این مرکز مجری تحقیقات SHRP در زمینه خستگی آسفالت بوده است و از آنجا که ترک‌های موزائیکی یکی از پیامدهای اصلی خستگی آسفالت است بنابراین شناسایی ترک‌های موزائیکی و بررسی نحوه گسترش آنها در روسازی راه مورد توجه این مرکز بوده است. در مرکز تحقیقات روسازی راه دانشگاه برکلی، صرفاً با استفاده از تصاویر دیجیتال ترک‌های موزائیکی شناسایی شده و سپس ارزیابی و آنالیز آنها بطور غیر خودکار انجام گرفته است. هر چند موضوع اصلی تحقیقات این مرکز طراحی سیستم‌های خودکار شناسایی ترک نبوده است اما نتایج تحقیقات آنها بعداً بطور گسترده‌ای مورد استفاده طراحان سیستم‌های خودکار قرار گرفته است.

همچنین برنامه تحقیقات مشترک حمل و نقل اروپا (COST) که با همکاری سیزده کشور اروپایی در دهه ۱۹۹۰ به اجرا در آمده است فعالیتهای گسترده‌ای در این زمینه داشته است بطوریکه موفق به طراحی و ساخت اولین سیستم خودکار شناسایی خرابی‌های روسازی راه شده‌اند. در این سیستم ترک‌های سطح آسفالت، شیار، چاله، ناهمواری و موج قابل شناسایی است. در عین حال خروجی سیستم یک نقشه از خرابی‌هاست که باید توسط کارشناس مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. البته مرکز تحقیقات راه دانشگاه بیرمنگام به عنوان یکی از موسسات مجری برنامه COST درباره الگوریتم‌های آنالیز ترک فعالیتهای موثری انجام داده است.

موسسه CSIRO در استرالیا نیز یکی از موسساتی است که درباره کاربردهای پردازش تصویر در شاخه‌های گوناگون علوم سابقه کار طولانی دارد و یکی از زمینه‌های فعالیت آن شناسایی ترک‌های سطح راه است. در واقع CSIRO برای اولین بار موفق به ساخت یک سیستم خودکار و هوشمند برای شناسایی ترک‌ها و طبقه‌بندی آنها شده است. سیستمی که در این مرکز در سال ۱۹۹۸ ساخته شده است قادر است با سرعت 105 Km/hr حرکت کرده و ترک‌های با قطر حداقل 1 mm را شناسایی نموده و سپس آنها را به چهار گروه

اصلی تفکیک نماید. شناسایی ترکها صرفا با استفاده از پردازش تصاویر دیجیتالی بوده و طبقه بندی ترکها مبتنی بر شبکه عصبی است.

بطور کلی درباره روشهای شناسایی ترک می‌توان گفت که تا کنون از سیستمهای تصویربرداری دیجیتال، سیستمهای لیزری و تلفیق سیستمهای دیجیتالی و لیزری استفاده شده است، البته چنانچه تعیین عمق و ضخامت ترکها بطور دقیق مورد نظر باشد استفاده از سیستمهای لیزری اجتناب ناپذیر است. اما روشهایی که برای آنالیز تصاویر پردازش شده و الگوشناسی یا طبقه‌بندی ترکها قابل استفاده‌اند از تنوع بیشتری برخوردارند و البته به شاخه‌های مختلفی از علوم مربوط می‌شوند. عمدتا این تکنیکها بر اساس تئوری فازی، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و یا تلفیق آنها پیشنهاد شده‌اند. با بررسی فعالیتهایی که در این زمینه انجام شده است مشخص می‌شود که شناسایی ترکها در اوایل دهه ۱۹۹۰ شروع شده و تقریبا در اواخر آن به نتیجه رسیده است اما کار بر روی روشهای تشخیص الگو و طبقه بندی ترکها از اواخر دهه ۱۹۹۰ شروع شده و تا کنون نیز ادامه دارد. در واقع تا کنون الگوریتمی که بطور کاملا دقیق بتواند نوع ترک و شدت ترک و مساحت ترک خوردگی را تعیین کند و مورد قبول سایر محققین هم باشد ارائه نشده است و دلیل آن هم خصوصیات کاملا مبهم، غیر قابل پیش‌بینی و نامنظم ترک خوردگی‌ها در سطح راه می‌باشد. بطوریکه حتی ممکن است دو نفر کارشناس یک ترک را در دو گروه مختلف با شدتهای متفاوت قرار دهند. بنظر می‌رسد همین خاصیت مبهم بودن و غیر قابل پیش‌بینی بودن ترکها موجب شده است الگوریتمهای مبتنی بر تئوری فازی و منطق فازی کاربرد بیشتری پیدا کنند. به عنوان مثال از بین منابع جمع‌آوری شده، یک مقاله براساس الگوریتم ژنتیک، سه مقاله براساس شبکه عصبی و در حدود ده مقاله بر اساس تئوری فازی یا منطق فازی الگوریتمهایی را برای طبقه‌بندی ترکها پیشنهاد داده‌اند. در پروژه حاضر در در ابتدا از تئوری فازی برای شناسایی و طبقه بندی ترکها استفاده شده است و در مراحل بعدی پروژه سایر روشهای پردازش تصویر بکار رفته‌اند.

۲- بررسی ترک خوردگی در روسازی آسفالتی

هدف از احداث روسازی راه تهیه یک مسیر صاف و هموار با ضریب اصطکاک کافی و مناسب است ، بطوریکه علاوه بر تحمل وزن چرخ خودروها قادر باشد تنشهای ناشی از بارگذاری ترافیک را تا حد تنش مجاز خاک بستر راه کاهش دهد. همچنین در مناطق سردسیر ، روسازی راه وظیفه حفاظت حرارتی خاک بستر را نیز بر عهده دارد. هرگونه تغییری در مشخصات مکانیکی روسازی ویا در خصوصیات ظاهری آن که برای یکی از این عملکردها محدودیت بوجود آورد به عنوان خرابی در روسازی راه منظور می‌شود.

آن دسته از خرابیهایی که فقط موجب بروز ناهمواری در سطح راه شده ویا ضریب اصطکاک روسازی را کاهش دهند دررده «خرابیهای سطحی» طبقه بندی می‌شوند. خرابیهای سطحی موجب کاهش کیفیت رانندگی شده و استهلاک وسایل نقلیه را به دنبال دارند. چنانچه خرابیهای سطحی موجب به موقع ترمیم نشوند در سطح وسیعی گسترش یافته و شدت آنها نیز افزایش می‌یابد و ممکن است به تدریج خود تبدیل به خرابی سازه ای شده ویا زمینه بروز خرابیهای سازه ای را فراهم سازند .

«خرابیهای سازه‌ای» گروهی از خرابیهای راه هستند که موجب کاهش توان باربری روسازی شده و یا وظیفه محافظت از خاک بستر را در برابر رطوبت و یخبندان مختل میکنند .

در این بخش از بین مجموعه خرابیهای روسازی آسفالتی صرفا به بررسی انواع ترک خوردگیها پرداخته ودلائل بروز ترک در آسفالت ، عواقب ناشی از ترک خوردگی آسفالت ، روشهای ارزیابی ترکهای روسازی و روشهای تعمیر و مرمت ترک خوردگیها پرداخته می‌شود .

۲-۱- انواع ترک خوردگی ها

دلایل متعددی موجب بروز ترک خوردگی در سطح آسفالت می‌شوند که مهمترین آنها عبارتند از بارگذاری ترافیک ، خصوصیات مکانیکی نامناسب آسفالت ، تراکم پایین اساس یا زیراساس و یا بستر راه ، نفوذ آب به

بستر یا جسم راه و افت مقاومت آن و بالاخره روش اجرای لایه آسفالتی. این ترکها را می‌توان به دو گروه کلی شامل خرابیهای سطحی و سازه‌ای تفکیک نمود که هر یک از آنها با توجه به شدت و مساحت ترک خوردگی روش مرمت خاصی را نیاز دارد. در این فصل به اختصار مشخصات هر یک از انواع ترک خوردگیها، نحوه اندازه‌گیری مساحت و تعیین شدت آنها مرور می‌شوند.

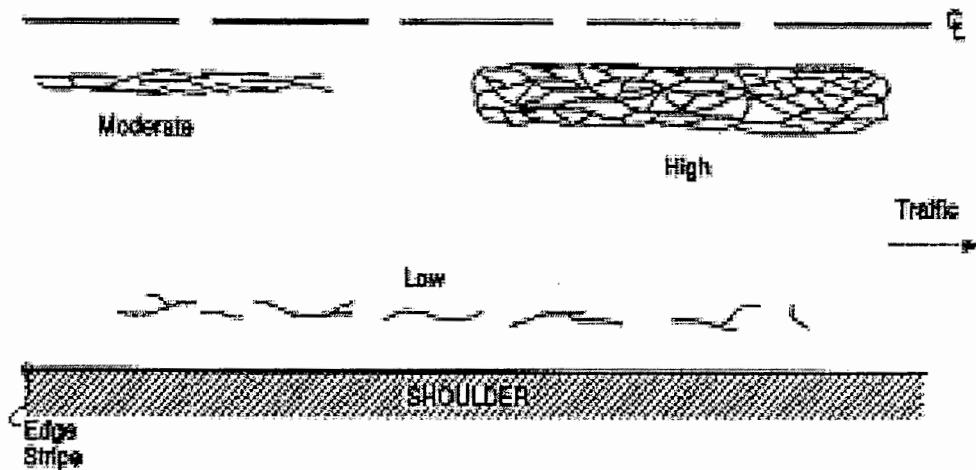
۲-۱-۱- ترکهای موزائیکی (پوست سوسماری)

این گروه از ترکها معمولا در قسمتهایی بوجود می‌آید که تحت اثر بارگذاری متناوب ترافیک قرار دارند و معمولا در مسیر عبور چرخ خودروها شروع شده و گسترش می‌یابند. در مراحل اولیه گسترش ترک، می‌توان تعداد نسبتا زیادی از ترکهای متقاطع و بهم پیوسته را مشخص نمود که در تمام جهات گسترش یافته‌اند، قطعاتی با گوشه‌های تیز و معمولا به طول 0.3 m در بزرگترین بعد آنها دیده می‌شوند. در مراحل پیشرفته، بهم پیوستن این ترکهای نامنظم و متقاطع الگویی شبیه به پوست سوسمار ایجاد می‌کند.

اگر قسمت دارای ترک موزائیکی بدون ترکهای متقاطع یا اندکی متقاطع دیده شود و اطراف ترکها خرد نشده باشد و مصالح ریزدانه از داخل ترک به سطح آسفالت پمپ نشده باشد در این صورت شدت ترک کم برآورد می‌شود. اگر ترکهای موزائیکی کاملا متقاطع باشند یا اطراف ترکها کمی خرد شده باشد یا ترکها پر شده و ریزدانه‌ها به سطح راه پمپ نشده باشند در این صورت شدت ترک در حد متوسط می‌باشد. همچنین ترکهای موزائیکی کاملا بهم پیوسته و متقاطع که احتمالا بعضی قطعات آن در هنگام عبور خودروها جابجا می‌شوند و یا پمپینگ اتفاق بیفتد به عنوان ترک با شدت زیاد برآورد می‌شوند.

برای اندازه‌گیری مساحت این نوع ترکها، سطح منطقه ترک خورده بر حسب متر مربع در هر یک از شدتهای کم، متوسط و زیاد بطور جداگانه ثبت می‌شود و اگر در یک منطقه کوچک چند نوع ترک دیده شود، بیشترین شدت خرابی ملاک قرار می‌گیرد. شکل (۱) الگوی کلی ترکهای موزائیکی را با شدتهای

مختلف نشان می‌دهد و در شکل (۲) چند نمونه از ترکهای موزائیکی با شدتهای کم و متوسط و زیاد ملاحظه می‌شوند.



شکل (۱) طرح عمومی ترکهای موزائیکی

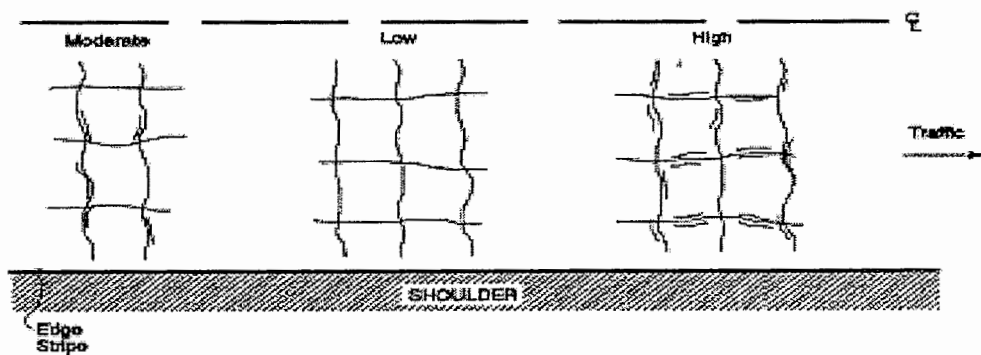


شکل (۲) شدتهای متفاوت در ترکهای موزائیکی

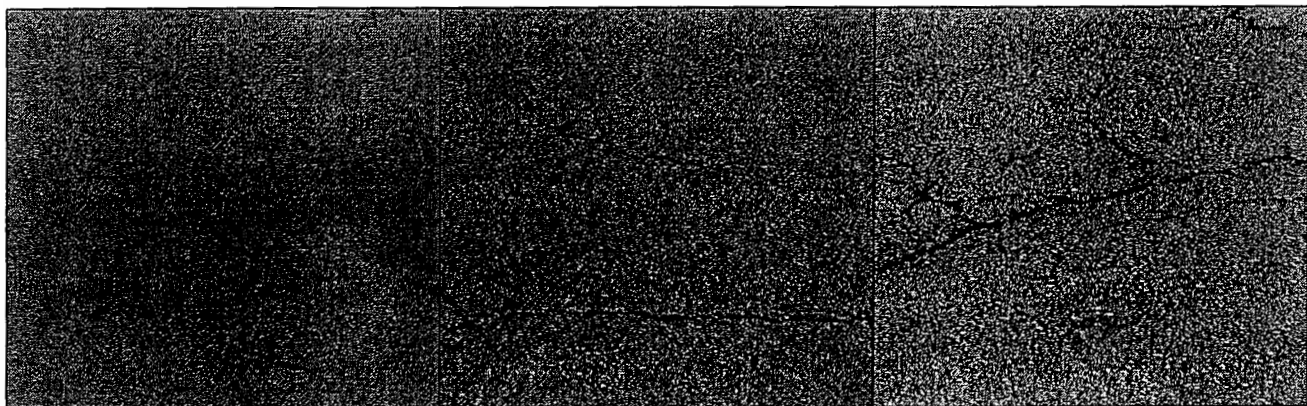
۲-۱-۲- ترکهای بلوکی

الگوی ترکهای بلوکی به گونه‌ایست که روسازی راه را به قطعات تقریباً مستطیلی شکل تقسیم می‌کنند. مساحت این قطعات با توجه به شدت ترک خوردگی از 0.1 m^2 تا 10 m^2 ممکن است تغییر یابد. عرض ترک بلوکی با شدت کم معمولاً کوچکتر از 6 mm بوده و ترکهای پر شده از کیفیت خوبی برخوردار

هستند بطوریکه عرض ترک قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. ترکهای بلوکی با شدت متوسط دارای عرضی در حدود ۶ mm تا ۱۹ mm بوده و یا ترکهای با عرض کمتر از ۱۹ mm که ترکهای پراکنده با شدت کم در اطراف ترک اصلی دیده شود. ترکهای بلوکی با شدت زیاد عموماً عرضی بیش از ۱۹ mm دارند و در اطراف ترک اصلی مجموعه‌ای از ترکهای پراکنده با شدت متوسط یا زیاد دیده می‌شود. برای ثبت مساحت منطقه ترک خورده برای هر یک از شدتهای مختلف خرابی، سطح منطقه تخریب شده بصورت متر مربع اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۳) طرح عمومی ترکهای بلوکی را نشان می‌دهد و در شکل (۴) ترکهای بلوکی با شدت کم و متوسط و زیاد مشخص شده‌اند.



شکل (۳) طرح عمومی ترکهای بلوکی



پ (شدت زیاد

ب (شدت متوسط

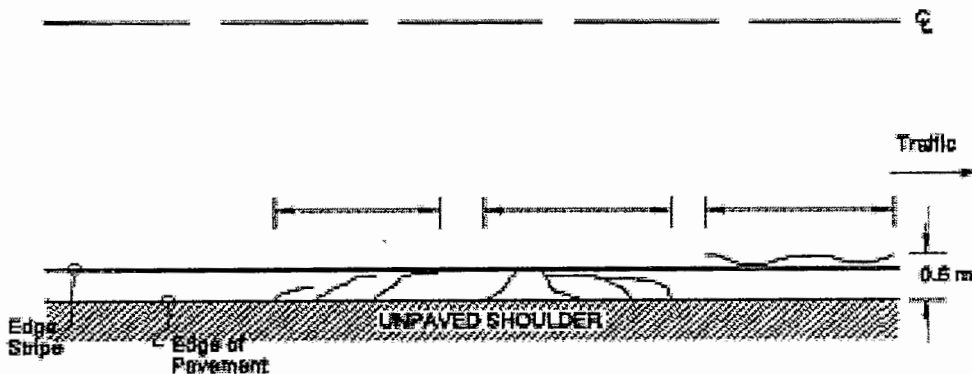
الف (شدت کم

شکل (۴) شدتهای متفاوت در ترکهای بلوکی

۲-۱-۳- ترکهای لبه‌ای (برشی)

در روسازی‌هایی که شانه راه آنها به خوبی متراکم نشده باشد و یا شیب عرضی شانه راه درست اجرا نشده باشد، به دلیل جمع شدگی آب در کناره شانه راه و در زیر آسفالت، خاک اساس در لبه‌های روسازی به صورت خاک اشباع در آمده و نشستهای بزرگی در آن پدید می‌آید. این نشستها موجب بروز ترکهای لبه‌ای در سطح آسفالت می‌شود و برای ترمیم آن باید تراکم اساس و شانه راه و نیز شیب عرضی شانه راه اصلاح شود. همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود، ترکهای لبه‌ای یا بصورت یک ترک طولی در فاصله تا ۶۰ cm از لبه سواره‌رو دیده می‌شوند و یا بصورت مجموعه‌ای از ترکهای متقاطع که به لبه آسفالت متصل هستند ظاهر می‌شوند.

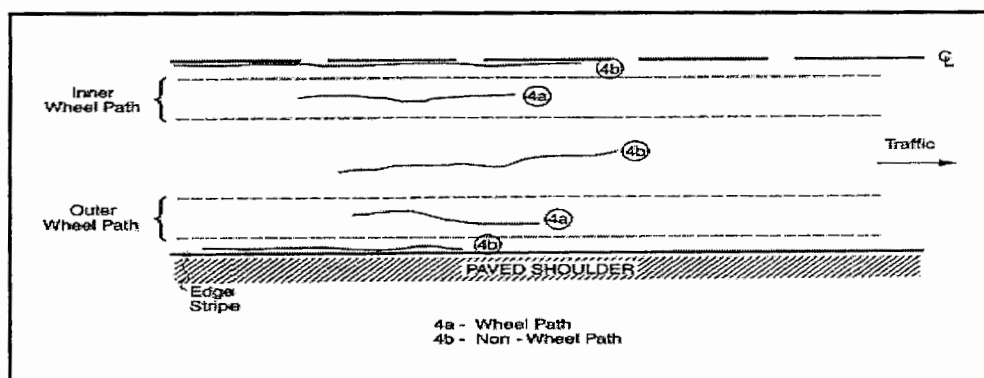
اگر ترک موجب شکستگی آسفالت نشود یا از مصالح روسازی کم نشده باشد به عنوان ترک با شدت کم ارزیابی می‌گردد. در ترکهای با شدت متوسط در برخی نقاط شکستگی آسفالت دیده شده و در بیش از ۱۰٪ طول مسیر کمبود مصالح بچشم می‌خورد. در ترکهای با شدت زیاد در بخش قابل توجهی از مسیر راه شکستگی آسفالت دیده می‌شود و بیش از ۱۰٪ طول مسیر کمبود مصالح وجود دارد. برای اندازه‌گیری مقدار این نوع ترک، طول مسیر در هر شدت ترک خوردگی ثبت می‌شود.



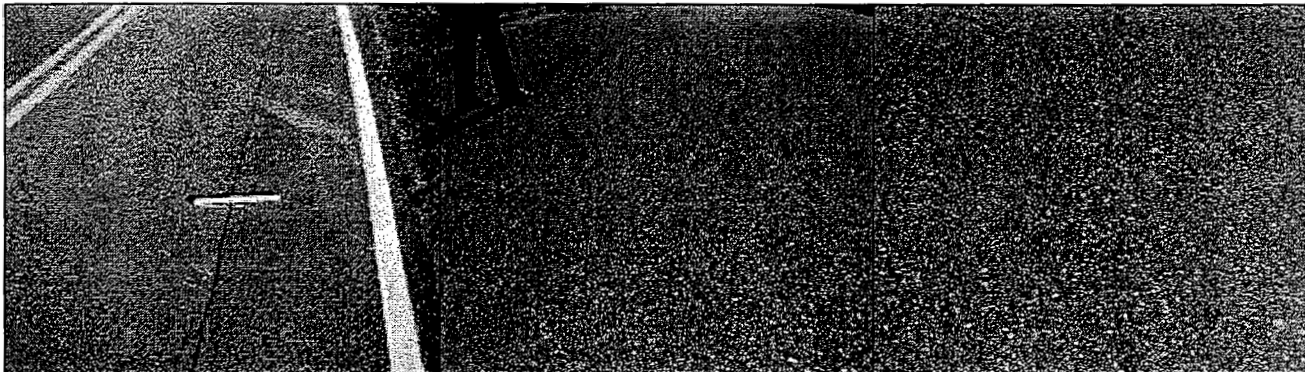
شکل (۵) طرح عمومی ترکهای لبه‌ای

۲-۱-۴- ترکهای طولی

ترکهای طولی به صورت خطی به موازات محور راه بر روی سطح آسفالت دیده می‌شوند. معمولاً این ترکها در امتداد درزهای اجرایی بین دو ردیف آسفالت ریزی مجاور یکدیگر ظاهر می‌شوند. گاهی اوقات ترکهای بلوکی در مراحل اولیه و با شدت کم ممکن است بصورت ترکهای طولی موضعی دیده شوند که با توجه به موقعیت آنها روی سطح راه می‌توان این دو را تفکیک نمود. ترکهای طولی با عرض کمتر از ۶ mm و یا پر شده در شرایط مطلوب، ترک طولی با شدت کم محسوب می‌شوند. ترک طولی با عرض متوسط بین ۶ mm تا ۱۹ mm همراه با ترکهای پراکنده با شدت کم در اطراف ترک اصلی به عنوان ترک طولی با شدت متوسط ارزیابی می‌شوند. ترک طولی با عرض بیش از ۱۹ mm یا ترک با عرض کمتر از ۱۹ mm همراه با ترکهای پراکنده با شدت متوسط تا زیاد در اطراف ترک اصلی، یک ترک طولی با شدت زیاد تعریف می‌شوند. در شکل (۶) ترکهای طولی با شدتهای مختلف ملاحظه می‌شود.



شکل (۶) طرح عمومی ترکهای طولی



ب (شدت زیاد

ب (شدت متوسط

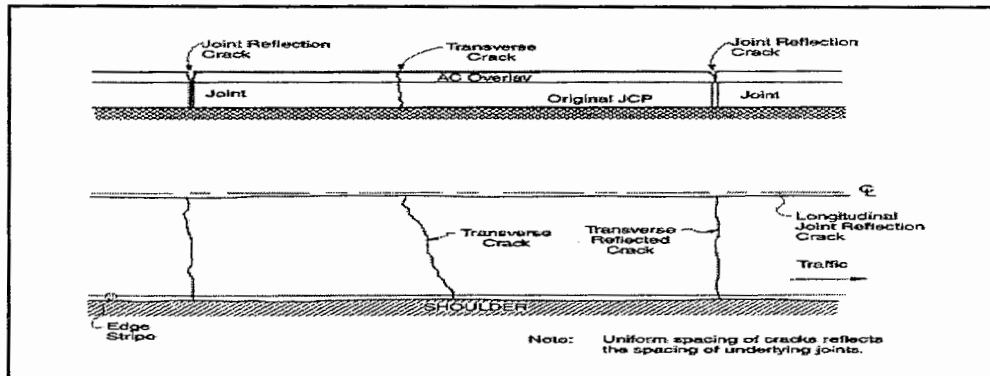
الف (شدت کم

شکل (۷) شدتهای متفاوت در ترکهای طولی

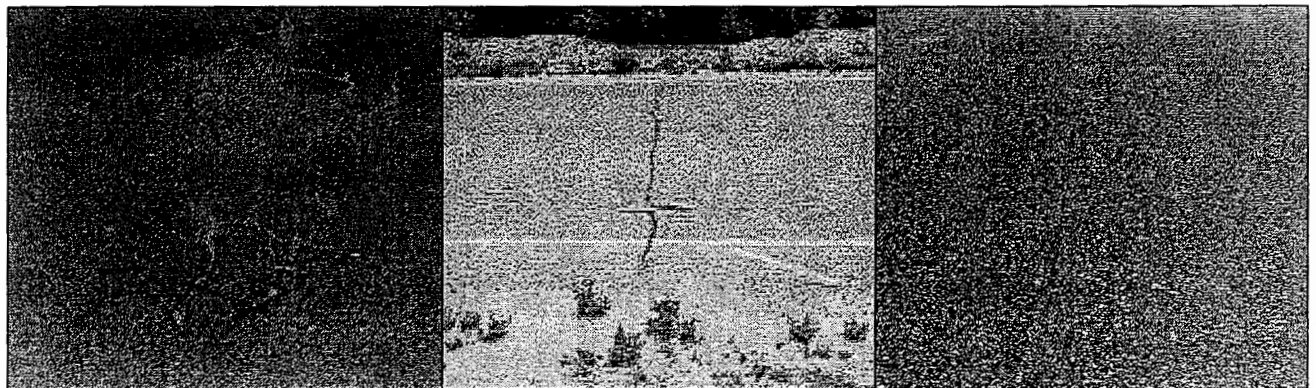
۲-۱-۵- ترکهای عرضی

ترکهای عمود بر امتداد محور راه که تمام عرض جاده را پوشانده و به دلیل انقباض آسفالت در فصل زمستان ایجاد شده یا گسترش می‌یابند را ترک عرضی می‌گویند. فاصله بین ترکهای عرضی به شرایط آب و هوایی محل و ضریب سختی آسفالت بستگی دارد. ترکهای عرضی با شدت کم معمولاً ضخامت کمتر از ۶ mm دارند و در صورت پر شدن نیز از کیفیت خوبی برخوردارند. اگر ضخامت ترک عرضی بین ۶ mm تا ۱۹ mm باشد و یا ضخامت ترک کمتر از ۱۹ mm بوده و همراه با ترکهای پراکنده با شدت کم در اطراف ترک اصلی باشد، به عنوان ترک عرضی با شدت متوسط ارزیابی می‌شود. چنانچه ضخامت ترک عرضی بیش از ۱۹ mm باشد و یا ضخامت متوسط کمتر از ۱۹ mm بوده و ترکهای پراکنده اطراف شدید یا متوسط باشند، ترک عرضی با شدت زیاد برآورد می‌گردد.

برای اندازه‌گیری مقدار ترکهای عرضی، طول و تعداد ترکها در هریک از شدتهای کم، متوسط و زیاد ثبت می‌شود. در شکل (۸) ترکهای عرضی با شدتهای مختلف نشان داده شده است.



شکل (۸) طرح عمومی ترکهای عرضی



پ (شدت زیاد

ب (شدت متوسط

الف (شدت کم

شکل (۹) شدتهای متفاوت در ترکهای عرضی

۲-۲- دلایل ترک خوردگی آسفالت

عوامل متعدد و بسیار متنوعی موجب بروز ترکهای سطح راه می‌گردند. این عوامل را می‌توان در سه گروه عمده تفکیک نمود:

- عوامل موثر بر ترکهای ناشی از بارگذاری روسازی و خستگی آسفالت
- عوامل موثر بر ایجاد ترکهای برودتی
- نشستهای موضعی در روسازی و ترکهای ناشی از آن

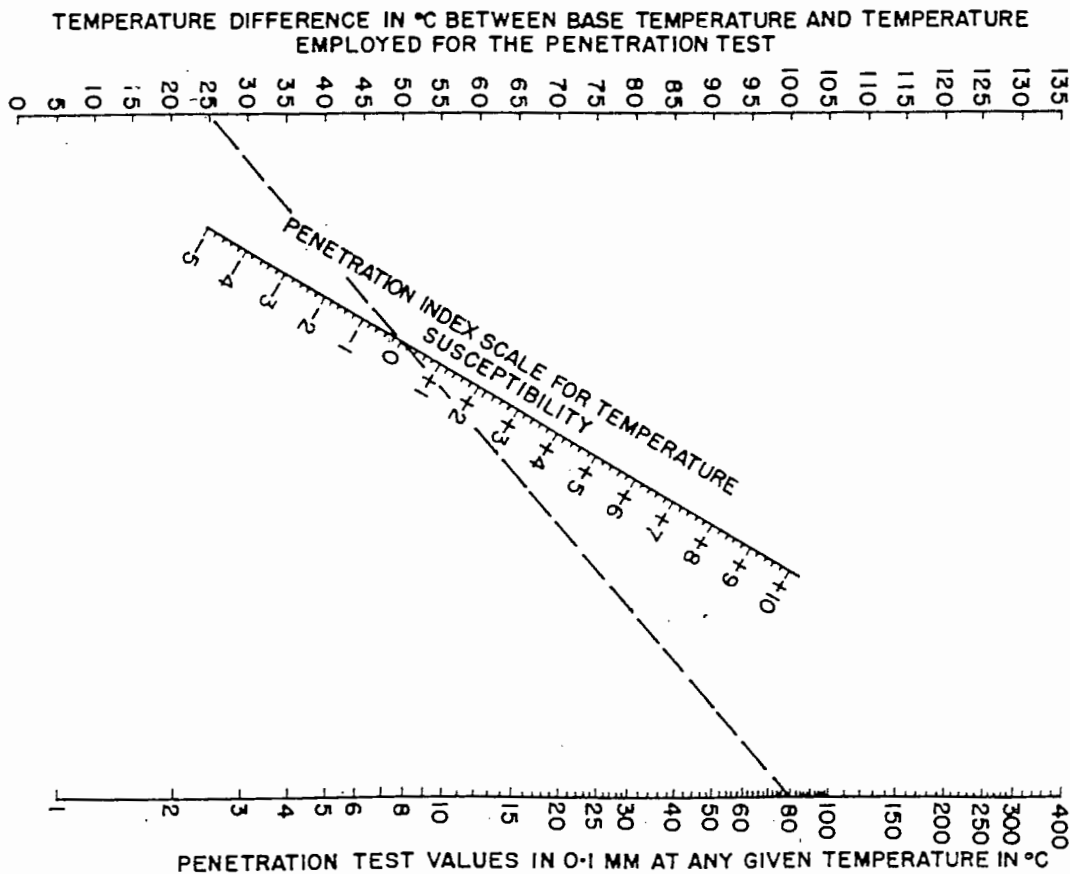
در ادامه این بخش فاکتورهایی را که در هر یک از سه گروه فوق قرار می‌گیرند به اجمال بررسی می‌شوند.

۲-۲-۱- بارگذاری روسازی و خستگی آسفالت

ترکهای موزائیکی که به دلیل بارگذاری روسازی و خستگی آسفالت رخ می‌دهند به شدت تحت تاثیر وضعیت بارگذاری می‌باشند. تعداد بار هم ارزی که در طول عمر بهره برداری از راه عبور می‌کند، سرعت حرکت خودروها، وزن چرخها، نوع محورها و توزیع فاصله زمانی بین عبور دو وسیله نقلیه متوالی از عوامل موثر بر ترکهای ناشی از خستگی است. آزمایش بزرگ آشتو نشان داده است شدت خرابی که در روسازی آسفالتی ایجاد می‌شود با توان چهارم وزن محورها متناسب است. به عبارت دیگر یک بار عبور محوری به وزن ۱۰ تن به اندازه عبور ۱۰۰۰۰ محور از همان نوع و با وزن ۱ تن در ایجاد خرابی روسازی آسفالتی تاثیر می‌گذارد. همچنین افزایش سرعت حرکت خودروها موجب افزایش ضریب ضربه دینامیکی شده و شدت خرابی را بیشتر می‌کند.

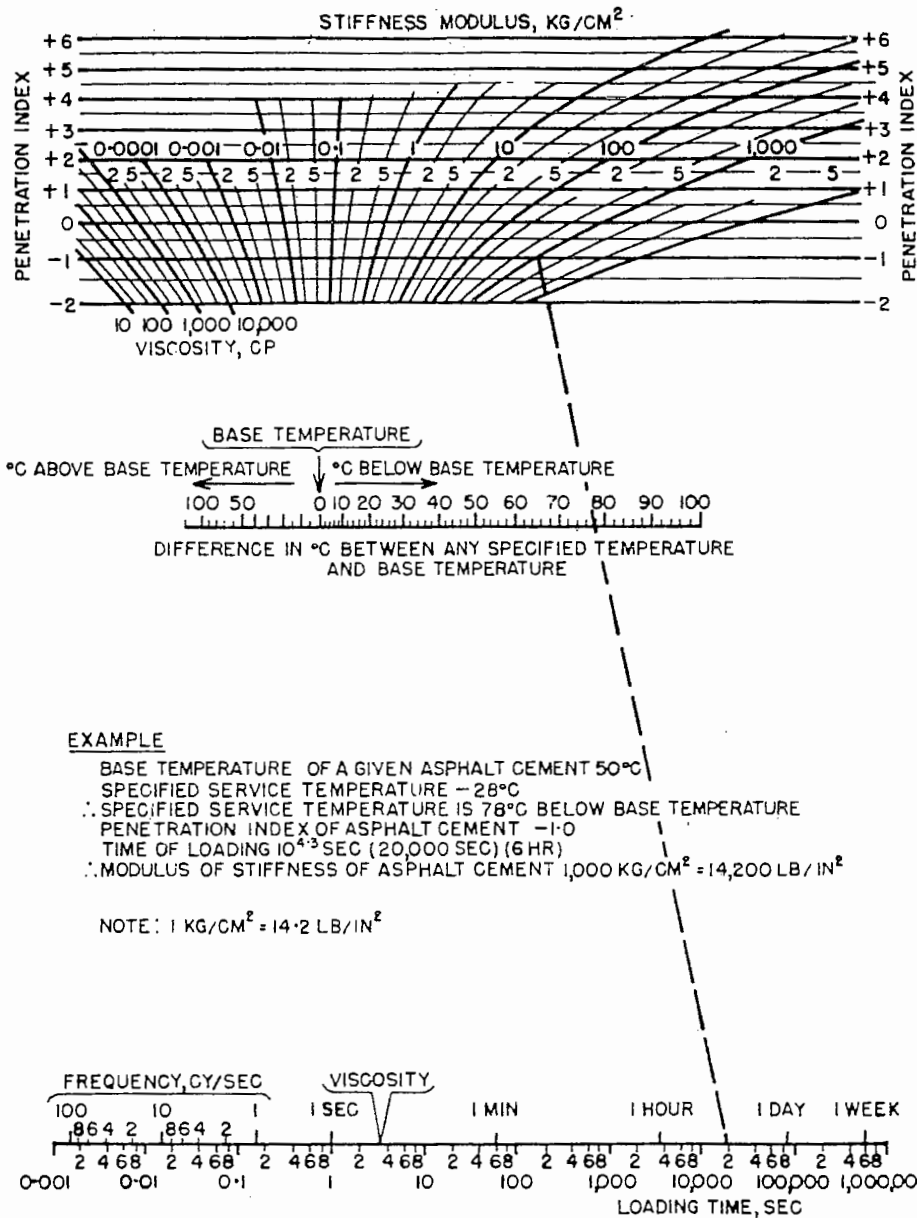
در عین حال سرعت بیشتر وسایل نقلیه به دلیل کاهش زمان بارگذاری می‌تواند ضریب سختی بزرگتری را در آسفالت نشان دهد. نتایج مشاهدات تجربی و نیز مطالعات تئوری تاثیر بسیار زیاد ضریب سختی آسفالت را در بروز ترکهای ناشی از خستگی ثابت می‌کنند. ضریب سختی آسفالت خود به عوامل متعددی وابسته است، بنابراین هر یک از آنها می‌توانند در گسترش شدت و وسعت ترکهای موزائیکی موثر باشند. استفاده از درصد قیر کمتر، کاربرد قیر با درجه نفوذ پائین، طرح اختلاط نامناسب آسفالت بدون توجه به شرایط آب و هوا و بارگذاری ترافیک، استفاده از دانه‌بندی درشت‌دانه برای ساخت آسفالت و کاهش درصد قیر در آسفالت از جمله این عوامل محسوب می‌شوند.

برای محاسبه ضریب سختی آسفالت ابتدا باید ضریب سختی قیر، درصد قیر و درصد سنگدانه‌ها در آسفالت تعیین شود. برای محاسبه ضریب سختی قیر می‌توان از روش اصلاح شده کمپانی Shell استفاده نمود. برای این منظور ابتدا دمای پایه قیر از نمودار زیر حساب می‌شود.



شکل (۱۰) نمودار شل برای تعیین دمای پایه قیر

در نمودار فوق ابتدا درجه نفوذ قیر در دمای t اندازه‌گیری میشود (محور سمت راست) و سپس بر اساس نتایج آزمایشهای درجه نفوذ و نقطه نرمی، مقدار شاخص درجه نفوذ قیر (PI) محاسبه می‌گردد. بنابراین تفاوت دمایی که درجه نفوذ در آن اندازه‌گیری شده است (t) با دمای پایه قیر (t_B) مشخص می‌شود (محور سمت راست) و مجموع آنها دمای پایه قیر را نشان می‌دهد. کمپانی Shell نموداری را برای محاسبه ضریب سختی قیر با توجه زمان بارگذاری، اختلاف دمای محیط با دمای پایه قیر و شاخص درجه نفوذ قیر ارائه کرده است که بعداً اصلاح گردید. نمودار اصلاح شده Shell در شکل زیر ملاحظه می‌شود. این نمودار بخوبی نحوه افزایش ضریب سختی را در هنگام کاهش دمای محیط نشان می‌دهد.



شکل (۱۱) نمودار شل برای تعیین ضریب سختی قیر

البته ضریب سختی آسفالت علاوه بر سختی قیر به درصد مصالح سنگی و در صد قیر نیز وابسته است. فرمول تجربی زیر برای محاسبه ضریب سختی آسفالت در صورتی که فضای خالی آن (e) کوچکتر یا مساوی ۳٪ باشد، قابل استفاده است.

$$S_m = S_b \left[1 + \frac{2.5 C_v}{n(1 - C_v)} \right]^n$$

که در آن :

S_m - ضریب سختی آسفالت (kg/cm^2)

S_b - ضریب سختی قیر (kg/cm^2) که از نمودار اصلاح شده Shell بدست آمده است

n - ضریب بدون بعدی است که به سختی قیر بستگی دارد و از رابطه زیر حساب می‌شود :

$$n = 0.83 \log (400000 / S_b)$$

C_v - ضریبی که نشان‌دهنده نسبت حجم مصالح سنگی (V_a) به کل حجم قیر (V_b) و حجم سنگدانه‌ها می‌باشد.

$$C_v = V_a / (V_a + V_b)$$

اگر درصد فضای خالی آسفالت $e < 3\%$ باشد و شرط $V_b / (V_a + V_b) > 0.66 (1 - C_v)$ برقرار باشد از C_v برای محاسبه ضریب سختی آسفالت استفاده می‌شود.

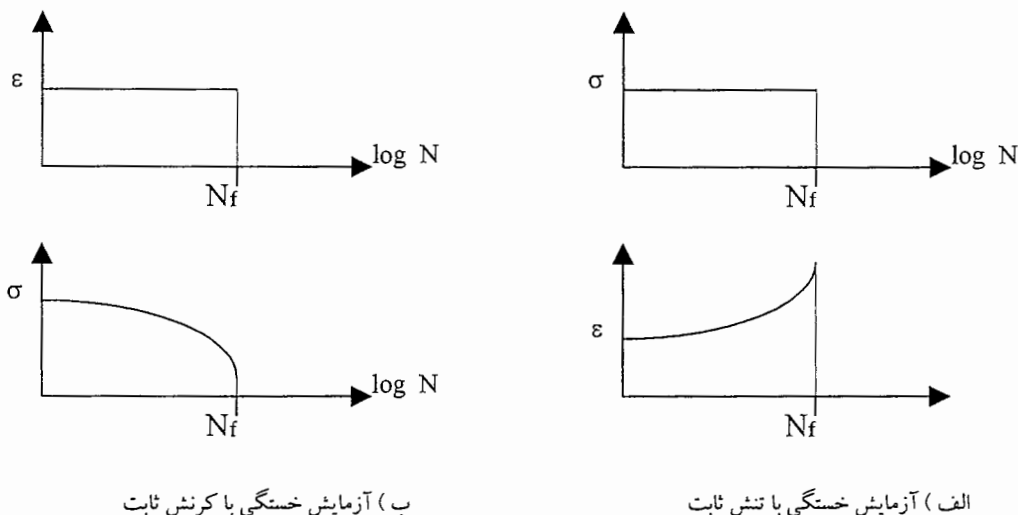
$$C_v = C_v / [1 - (e - 0.03)]$$

قابل ذکر است که ضریب سختی زیاد آسفالت و بارگذاری سنگین موجب افزایش تنش‌های متناوب و دینامیکی در روسازی می‌شود، در حالی که سختی زیاد آسفالت موجب ترد شدن و شکننده شدن آن شده و مقاومت روسازی را در برابر خستگی کاهش می‌دهد. واضح است که نتیجه چنین وضعیتی بروز ترک‌های پراکنده در سطح روسازی و در مناطق تحت بارگذاری باشد. برای بررسی مقاومت آسفالت در برابر خستگی و چگونگی کاهش مقاومت خستگی آسفالت آزمایش‌های تجربی و مطالعات تئوری بسیار زیادی انجام گرفته است. معمولاً هدف از این مطالعات پیش بینی شرایط ترک خوردگی در روسازی است بطوریکه بتوان پارامتر بحرانی در این فرآیند مشخص نموده و آن را کنترل نمود.

آزمایش خستگی را می‌توان به صورت ((آزمایش با تنش ثابت)) و یا ((آزمایش با کرنش ثابت)) انجام

داد و تعداد دفعات بارگذاری تا لحظه گسیختگی به عنوان مقاومت خستگی آسفالت (N_f) ثبت می‌شود.

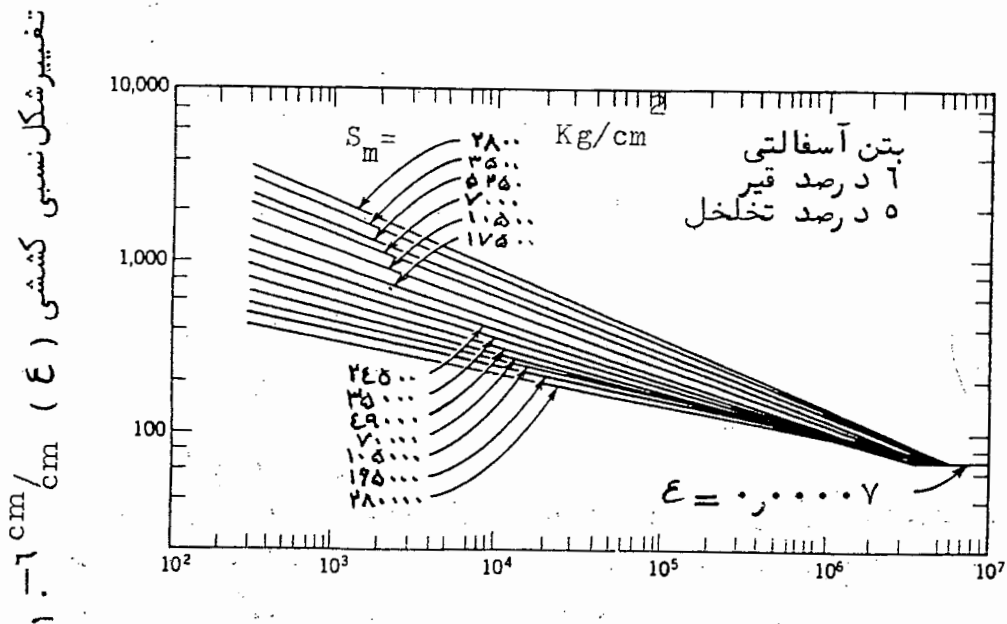
نتایج این آزمایش‌ها به صورت شکل (۱۲) قابل نمایش است.



شکل (۱۲) نمودار نتایج آزمایش خستگی

بارگذاری ترافیک تنشهای نسبتاً بزرگی در زیر لایه آسفالتی به وجود می‌آورد و معمولاً ترکهای ناشی از خستگی از زیر آسفالت شروع شده و به تدریج به سطح روسازی گسترش می‌یابند. اگر کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی در یک روسازی مفروض تحت اثر بار سنگین‌ترین محور عبوری محاسبه شود و آزمایش خستگی با کرنش ثابت و در چنین شرایطی انجام پذیرد می‌توان زمان ترک خوردگی و گسیختگی روسازی را برآورد نمود. آزمایش خستگی بر روی آسفالت با ضرایب سختی متفاوت نشان داده است که می‌توان یک حد آستانه برای کرنش کششی آسفالت بدست آورد که مانع ترک خوردن آسفالت شده و عمر گسیختگی را به مقدار نامحدودی افزایش می‌دهد.

نمودار شکل (۱۳) نمونه‌ای از این آزمایشها را که بر روی آسفالت با ۶٪ قیر و ۵٪ فضای خالی انجام گرفته است نشان می‌دهد. تغییر در نوع قیر، دمای آزمایش و سرعت بارگذاری موجب شده است که سختی‌های متفاوتی برای آسفالت حاصل شود. در این صورت اگر کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی به $\epsilon = 0.00007$ محدود شود احتمالاً گسیختگی ناشی از خستگی در این آسفالت به وجود نخواهد آمد.



تعداد دفعات بارگذاری و باربرداری تا شکست در اثر خستگی (N_f)

شکل (۱۳) تاثیر سختی آسفالت بر مقاومت خستگی آن

۲-۲-۲- ترکهای برودتی

ترکهای برودتی که بخش قابل توجهی از ترک خوردگی‌های روسازی آسفالتی را تشکیل می‌دهند، به دلیل گستردگی زیادشان یکی از پرهزینه‌ترین انواع خرابیها محسوب می‌شود و نتیجه آن به صورت ترکهای عرضی و یا ترکهای بلوکی قابل شناسایی است. کاهش دمای هوا موجب انقباض آسفالت شده و تنشهای کششی نسبتا بزرگی در آسفالت ایجاد می‌شود، این کشش همزمان با سخت شدگی و شکنندگی قیر اتفاق می‌افتد. بنابر این در زمانی که قیر و آسفالت کمترین مقاومت کششی را دارند، تنش کششی بزرگی در آن ایجاد شده و ترکهای برودتی ظاهر می‌شوند.

ترکهای برودتی را در دو گروه عمده می‌توان تقسیم نمود. گروه اول، ترکهایی هستند که ممکن است تا خاک بستر راه نیز امتداد داشته باشند. این گروه از ترکها در شرایطی ایجاد می‌شوند که شاخص برودت هوا خیلی زیاد باشد (سرمای شدید و طولانی) و عمق یخبندان روسازی به خاک بستر راه نیز برسد. گروه دوم، ترکهایی هستند که در هنگام برودت هوا به صورت ترکهای مؤین در آسفالت و معمولا در سطح تماس قیر

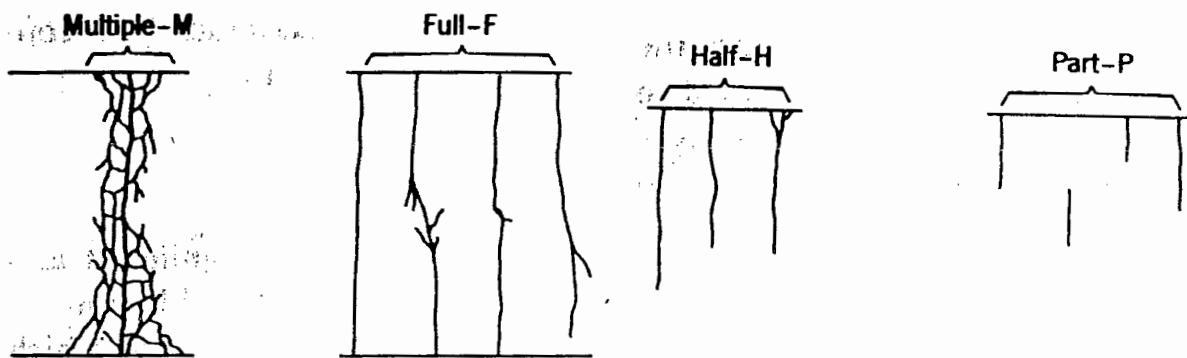
با سنگدانه‌ها ایجاد می‌شوند و به تدریج در عمق لایه آسفالتی گسترش پیدا می‌کنند. با توجه به فرم هندسی روسازی‌ها، جمع شدگی در امتداد راه اتفاق می‌افتد و ترکها در امتداد عمود بر محور راه ظاهر می‌شوند. مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که تغییرات متناوب دما تاثیر بسیار زیادی در گسترش ترکهای برودتی دارند. این تاثیر ممکن است به صورت زیاد شدن طول ترک، افزایش ضخامت ترک و یا ایجاد ترکهای عرضی در فواصل نزدیکتر باشد.

همچنین عمر روسازی نیز فاکتور مهمی در احتمال بروز ترکهای برودتی بشمار می‌رود. زیرا با افزایش عمر روسازی همراه با فرسوده شدن قیر، درصد آسفالتین آن افزایش یافته و قیر فرسوده سخت‌تر و شکننده‌تر می‌شود و از طرف دیگر روسازی با عمر بیشتر در واقع دارای دوره برگشت بزرگتری خواهد بود، پس مقدار حداقل دما و شاخص برودتی که در ایندوره برگشت اتفاق می‌افتد وضعیت نامناسب‌تری را ایجاد می‌کند. عوامل دیگری نیز در گسترش و تشدید ترکهای برودتی ممکن است موثر باشند. مثلاً ضریب سختی آسفالت که خود به دانه‌بندی مصالح سنگی و نوع قیر و درصد قیر وابسته است، یکی از پارامترهای بسیار مهم تلقی می‌شود. مسلماً آسفالت نرم‌تر کمتر دچار ترک خوردگی می‌شود و در مقابل استفاده از درصد کم قیر، قیر با درجه نفوذ کمتر، قیر با حساسیت حرارتی بیشتر، دانه‌بندی درشتدانه در مخلوط آسفالت و کاهش مقدار فیلر موجب افزایش ضریب سختی آسفالت شده و احتمال بروز ترکهای برودتی را افزایش می‌دهند.

با توجه به نقش ضریب سختی قیر در ایجاد ترکهای برودتی، این ایده را می‌توان مطرح نمود که با محدود کردن ضریب سختی قیر و به دنبال آن محدودیت در ضریب سختی آسفالت، احتمال بروز ترکهای برودتی در دماهای پائین کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشهای متعدد نشان داده است که اگر ضریب سختی آسفالت کمتر از 1000000 Psi باشد با مدت زمان بارگذاری معادل 20000 ثانیه، ترکهای برودتی در آسفالت ایجاد نمی‌شود.

تا کنون برای ارزیابی ترکها و تعیین شدت آنها روشهای متعددی پیشنهاد شده‌اند. یکی از روشهای بسیار رایج استفاده از پارامتری بنام شاخص ترک خوردگی روسازی (I) است. شکل (۱۴) حالت‌های مختلفی از ترکهای عرضی را نشان می‌دهد و شاخص ترک خوردگی روسازی بر اساس آن و طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$I = N m + N f + 0.5 N h$$



شکل (۱۴) حالت‌های مختلف ترک خوردگی آسفالت

که در آن I شاخص ترک خوردگی روسازی، Nm تعداد ترکهای از نوع مرکب، Nf تعداد ترکهای از نوع کامل و سراسری و Nh تعداد ترکهای ناقص و نیمه است. برای محاسبه شاخص ترک خوردگی روسازی مقادیر فوق به ازای ۵۰۰ فوت از یک راه با دو خط سواره‌رو اندازه‌گیری می‌شود.

شاخص ترک خوردگی روسازی تابعی از مشخصات مکانیکی آسفالت، شرایط آب و هوایی و خصوصیات خاک بستر راه است. بنابراین برای تخمین شاخص ترک خوردگی روسازی بدون بازدید از سطح راه می‌توان تابعی مانند f را پیشنهاد نمود.

$$I = f(s, a, d, m, t)$$

که در آن :

m - دمای طرح در زمستان (درجه سانتیگراد)

s - سختی قیر بکار رفته در آسفالت که با روش اصلاح شده شل برای زمان بارگذاری ۲۰۰۰۰ ثانیه و در

دمای طرح زمستان محاسبه شده باشد (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)

a - عمر روسازی بر حسب سال

d - فاکتور نشان دهنده نوع خاک بستر است که برای خاکهای رسی ۲، برای خاک لای ۳ و برای خاک ماسه‌ای ۵ می‌باشد.

T - ضخامت رویه آسفالتی بر حسب اینچ

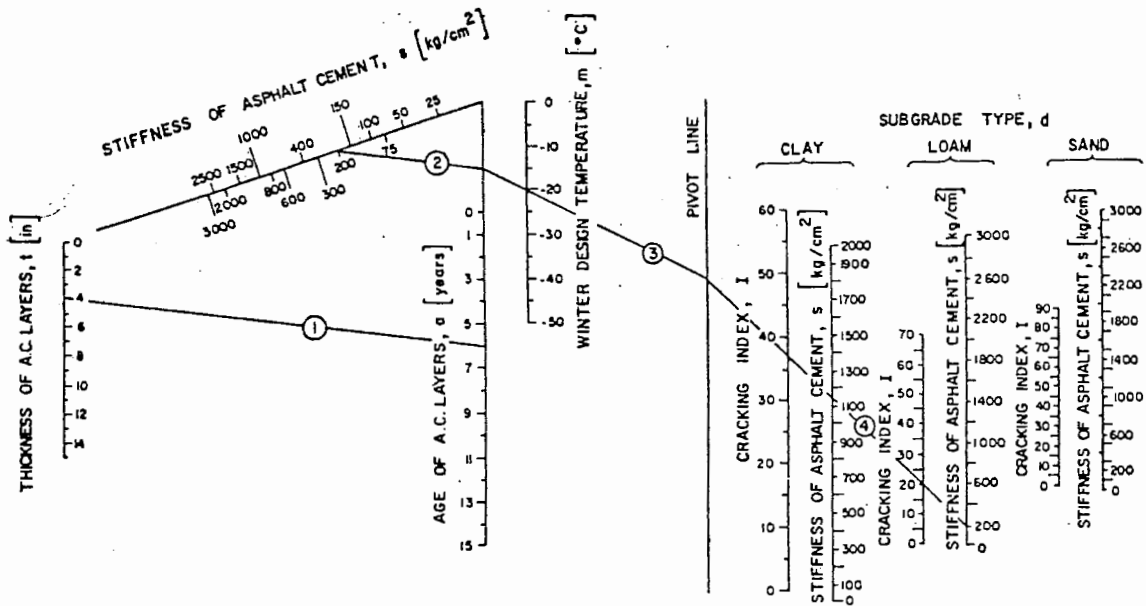
تابع پیشنهادی برای برآورد شاخص ترک خوردگی روسازی به صورت زیر است.

$$10^I = 2.497 * 10^{30} S^{(6.7966 - 0.87403 t + 1.33884 a)} [7.0539 * 10^{-3}]^{-d}$$

$$[3.1928 * 10^{-13}]^m d^{0.60263s}$$

برای حل معادله فوق از نمودار شکل (۱۵) هم می‌توان استفاده نمود. دمای طراحی در زمستان (m) طبق تعریف عبارتست از کمترین دمایی که به احتمال ۱٪ در سردترین ماه سال در یک دوره برگشت ده ساله اتفاق می‌افتد. این دما را به صورت تابعی از شاخص برودت هوا نیز می‌توان از نمودار شکل (۱۶) بدست آورد.

با توجه به کلیه موارد فوق می‌توان یک معیار تجربی پیشنهاد داد که با محدود نمودن شاخص ترک خوردگی بتواند از بروز و گسترش ترکهای برودتی در روسازی آسفالتی جلوگیری نماید. در معیار پیشنهادی پروفسور Haas برای جاده‌های درجه یک (با ترافیک روزانه بیش از ۲۰۰۰ وسیله در روز به ازای دو خط سواره‌رو) و جاده‌های درجه دو (با ترافیک روزانه کمتر از ۲۰۰۰ وسیله در روز به ازای دو خط سواره‌رو) حد مطلوب و حداکثر مجاز شاخص ترک خوردگی در سالهای مختلف عمر روسازی مطابق شکل (۱۷) تعیین می‌شود.



EXAMPLE:

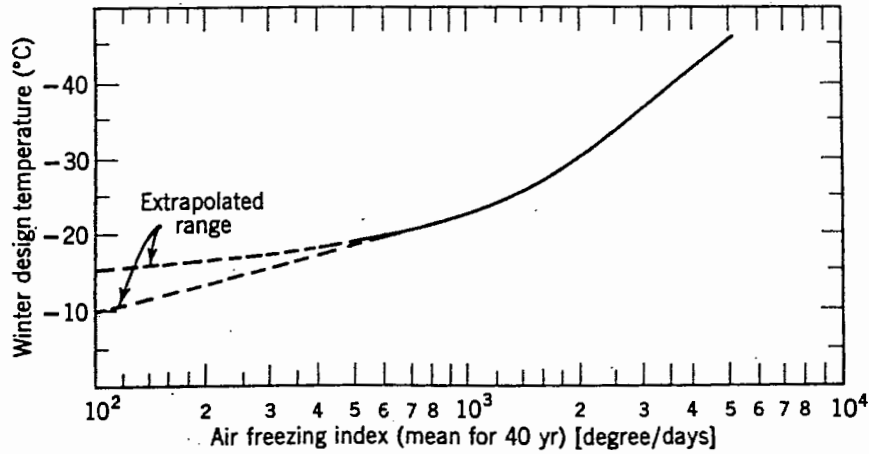
thickness = 4 inches
 age = 6 years
 stiffness of original asphalt cement = $200 \text{ kg}/\text{cm}^2$ *
 winter design temperature = -20°C
 subgrade type = loam
 * for temp. = m and time = 20000 sec

NOTE:

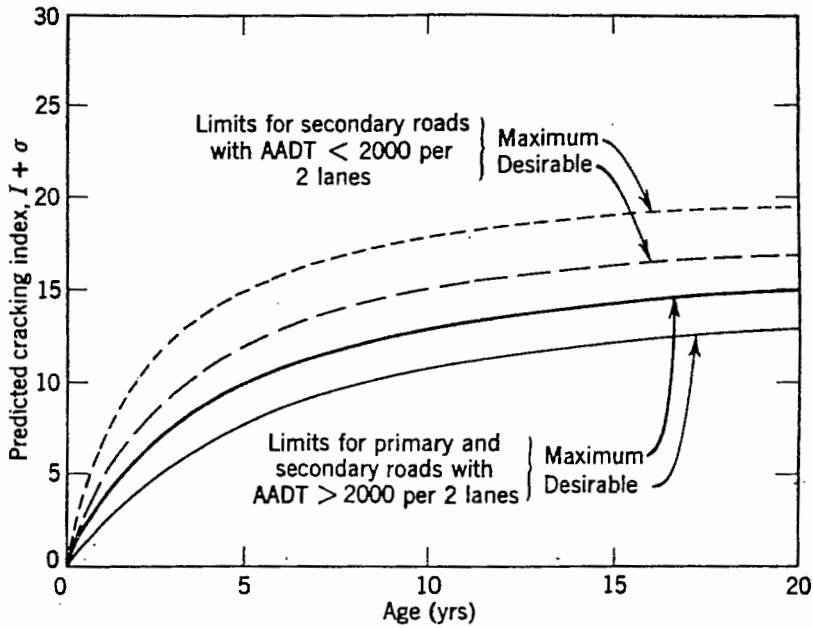
- A) lines ① and ② are parallels
- B) in step ④ select scales for the appropriate subgrade type

RESULT: cracking index = 20 at 6 years

شکل (۱۵) تعیین شاخص ترک خوردگی در آسفالت



شکل (۱۶) شاخص برودت هوا



شکل (۱۷) مقادیر مناسب شاخص ترک خوردگی در سالهای مختلف

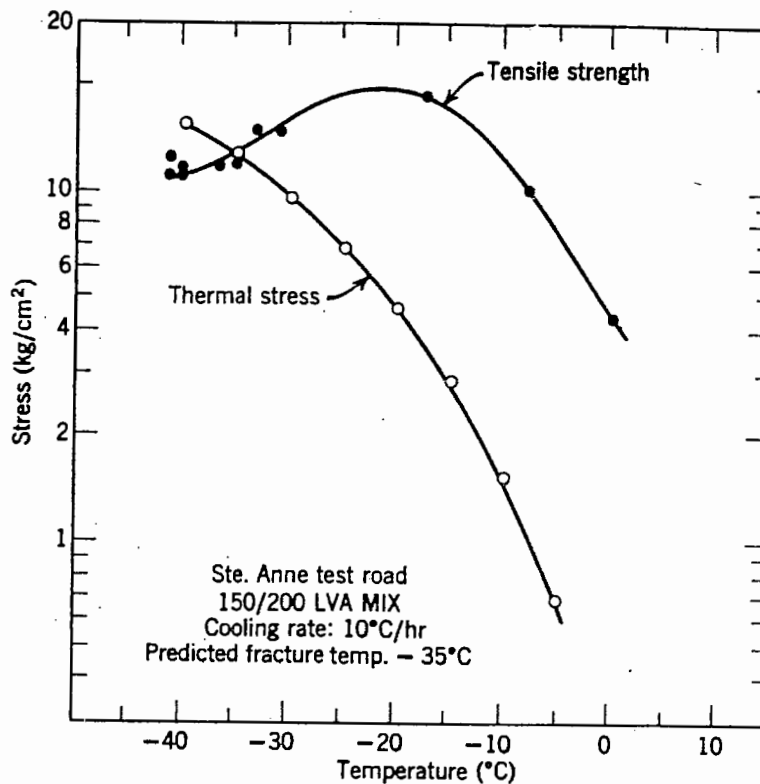
در عین حال که کنترل شاخص ترک خوردگی روسازی بسیار مفید است، تلاش‌های گروه دیگری از محققان بر موضوع محاسبه تنش‌های برودتی و پیش‌بینی شرایط ترک خوردگی آسفالت متمرکز شده است. در این صورت می‌توان در ضمن طراحی مکانیستیک روسازی زمان بروز ترک خوردگی‌ها را تا حد ممکن به تعویق انداخت. نتایج فعالیت‌های این گروه از محققان در قالب رابطه تجربی زیر برای محاسبه تنش‌های کششی ناشی از انقباض آسفالت ارائه شده است.

$$\sigma(t^*) = \alpha \sum S(?t) \cdot ?t$$

که در آن t^* نرخ تغییرات دما، $\sigma(t^*)$ تنش کششی ایجاد شده در اثر تغییرات دما با شدت α ، t میانگین ضریب انقباض حرارتی در هنگام افت دما از t_0 به دمای جدید t_f و $S(?t)$ ضریب سختی آسفالت که با توجه به زمان بارگذاری در فواصل دمایی $?t$ می‌باشد.

با استفاده از رابطه فوق می‌توان تنش کششی برودتی را به صورت تابعی از دما محاسبه نمود. همچنین مقاومت کششی آسفالت نیز به صورت تابعی از دما قابل اندازه‌گیری است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که ضریب α برای آسفالت در محدوده دمای ۲۰ - تا ۳۰ درجه فارنهایت، تقریباً 10^{-5} * ۱٫۵ می‌باشد.

در این صورت می‌توان نموداری مشابه شکل (۱۸) را برای مقایسه مقاومت کششی آسفالت و تنش کششی برودتی ارائه داد که شرایط ترک خوردگی آسفالت به وضوح در آن دیده می‌شود.



شکل (۱۸) مقایسه مقاومت کششی آسفالت و تنش کششی برودتی

نمودار فوق برای آسفالتی بدست آمده است که قیر آن از نوع ۱۵۰ / ۲۰۰ AC - بوده و نرخ تغییرات دما ۱۰ °C/hr می‌باشد. در این صورت دمایی که ترکهای برودتی از آن دما شروع می‌شوند $^{\circ}\text{C}$ -۳۵ برآورد می‌گردد.

۲-۲-۳- ترکهای ناشی از تغییر شکلهای موضعی روسازی

گاهی اوقات تغییر شکلهایی که در خاک بستر راه و یا در یکی از لایه‌های روسازی رخ می‌دهند موجب ترک خوردگی سطح آسفالت می‌شود. مسلماً اگر این تغییر شکلهای در محدوده وسیعی به وجود آیند موجب نشست سراسری راه شده و ترک قابل ملاحظه‌ای در سطح روسازی ایجاد نخواهد شد. معمولاً نشستهای موضعی و نامساوی در زیر آسفالت منجر به ترک خوردگی سطح روسازی و یا تشدید ترکهای قبلی می‌شود.

این نشستهای موضعی غالباً به دلیل تراکم تدریجی و تحکیم لایه‌های اساس و زیراساس تحت اثر بارگذاری ترافیک و یا به دلیل نفوذ آب به جسم راه و به دنبال آن افزایش رطوبت و کاهش مقاومت خاک ایجاد می‌شوند. همچنین در جاده‌هایی که اساس یا زیراساس آنها با سیمان یا آهک تثبیت شده است هنگام هیدراتاسیون آهک یا سیمان در مصالح تثبیت شده مقداری جمع شدگی رخ داده و ترک‌هایی که معمولاً عمود بر امتداد راه هستند در اساس یا زیراساس به وجود می‌آیند که بعداً به صورت ترک انعکاسی تا سطح آسفالت گسترش می‌یابند. ترکهای برشی یا لبه‌ای که در حاشیه سواره‌رو ظاهر می‌شوند نمونه بارزی از این نوع خرابیها هستند. علت اصلی وقوع این نوع ترکها، جمع شدگی آب در کناره‌های شانه‌های راه و نفوذ آب به داخل جسم راه است. پس از مدتی خاک بستر راه به حد اشباع رسیده و در چنین شرایطی به دلیل کاهش مقاومت، نشست خواهد کرد. بدیهی است این گونه تنشها فقط در حاشیه لبه خارجی سواره‌رو و در نقاطی که جمع شدگی آب روی شانه‌ها وجود دارد، ظاهر می‌شوند. نشستهای غیر یکسان در لبه‌های خارجی راه مقاومت برشی لایه آسفالتی را از بین برده و ترکهای لبه‌ای یا برشی در این قسمت بروز می‌کنند.

نکته مهم و قابل توجه این است که حتی اگر زیرسازی راه به خوبی اجرا شده باشد و هیچ نوع نشست یا کاهش مقاومت در لایه‌های خاکی روسازی به وجود نیاید، در عین حال معمولاً روسازی آسفالتی دارای ترکهای انقباضی (ترک بلوکی و عرضی) و یا ترکهای طولی خواهد بود. این ترکها خود تبدیل به محل نفوذ آب به داخل جسم راه شده و دقیقاً به همین دلیل پس از مدتی یک ترک با شدت کم تبدیل به یک ترک عریض همراه با ترکهای ریز و پراکنده در اطراف ترک اصلی می‌شود و به تدریج شدت آن افزایش می‌یابد. در واقع مکانیسم ایجاد ترکهای پراکنده اطراف یک ترک اصلی (طولی یا عرضی) مشابه مکانیسم ایجاد ترک برشی است. در این مورد می‌توان حجم دبی آبی را که از یک ترک به داخل روسازی نفوذ می‌کند محاسبه کرده و سیستم زهکشی مناسبی برای آن تعبیه نمود. در چنین مواردی استفاده از لایه اساس به عنوان زهکش توصیه می‌شود.

آزمایشات متعددی که در دهه ۱۹۷۰ در ایالات متحده صورت گرفت ، نشان داد که مقدار نفوذ سطحی با شدت ترک خوردگی و تراکم ترکها در واحد سطح راه رابطه مستقیم دارد. بر این اساس پارامتری بنام نرخ نفوذ (I_C) تعریف شده و مقدار آن برای مقاصد طراحی زهکش برابر با ۲/۴ فوت مکعب در روز به ازای هر ۱ فوت از طول ترک پیشنهاد گردید. به همین ترتیب می‌توان نرخ نفوذ از واحد سطح (q_i) را نیز محاسبه نمود.

$$q_i = I_c [(N_c / W_p) + (W_c / W_p.C_s)] + K_p$$

که در آن I_c نرخ نفوذ آب از داخل ترک ، N_c تعداد ترکهای طولی ، W_p عرض روسازی ، W_c طول ترکهای عرضی ، C_s فاصله ترکهای عرضی و K_p نرخ نفوذ آب از سطح روسازی بدون ترک است .

مقدار K_p از لحاظ عددی مساوی ضریب نفوذ پذیری آب در رویه آسفالتی است. این ضریب در رویه‌های آسفالتی بسیار ناچیز است اما برای رویه‌های شنی و خاکی مقدار قابل توجهی دارد و باید در محاسبات منظور گردد. برای محاسبه مقدار تراوش آب در واحد طول راه آسفالتی فرض می‌شود که $W_p = W_c$ و $K_p = 0$ و $N_c = N + 1$ بوده و نرخ نفوذ 0.1 ft^3 در ساعت در واحد طول ترک باشد. بنابراین می‌توان نوشت

$$q = q_i w_p = 0.01 [N + 1 + (w_p / c_s)]$$

مقدار C_s برای روسازی آسفالتی تقریباً ۴۰ فوت برآورد می‌گردد.

گروه دیگری از خرابیهای روسازی که ممکن است منجر به ترک خوردگی آسفالت شوند ، شیارهایی هستند که در امتداد مسیر چرخها ایجاد می‌شوند. شیارها بطور کلی در دو حالت متفاوت ایجاد می‌شوند که یکی مربوط به آسفالت نرم و دیگری مربوط به آسفالت سخت است. در حالت اول ، آسفالت نرم تحت اثر بارگذاری ترافیک دچار تغییر شکل شده و به طرفین جابجا می‌شود و سرانجام شیارهایی مانند شکل زیر - الف به وجود می‌آید.

شکل (۱۹) ایجاد شیار در مسیر حرکت چرخها

در حالت دوم ، گود افتادگی مسیر چرخها نه به دلیل تغییر شکل آسفالت بلکه بخاطر تراکم تدریجی و تحکیم لایه‌های خاکی ساختمان راه و یا حتی بستر راه اتفاق می‌افتد که نمونه آن در شکل بالا - ب ملاحظه می‌شود. در چنین شیارهایی گود افتادگی اساس به رویه آسفالتی نیز منتقل می‌شود. روی سطح آسفالت در دو امتداد گوشه شیار و زیر لایه آسفالتی در امتداد وسط شیار تنش کششی قابل توجهی ایجاد می‌شود که به صورت متناوب با هر بای عبور یک محور بر روسازی اعمال می‌شوند. با افزایش حجم تردد و در صورتی که کرنش ایجاد شده از حد آستانه تحمل آسفالت بیشتر باشد ترکهای ناشی از خستگی در این نقاط ظاهر شده و در طول زمان بهره‌برداری شدت و وسعت آنها گسترش پیدا می‌کند. معمولا ترکهای موزائیکی تحت اثر چنین مکانیسمی در روسازی‌های آسفالتی ایجاد می‌شوند.

در رویه آسفالتی راههایی با اساس یا زیراساس تثبیت شده ، بویژه اگر اساس و زیراساس با سیمان یا آهک تثبیت شده باشند ، ممکن است ترکهای انعکاسی در سطح راه دیده شود. استفاده از آهک به عنوان ماده تثبیت کننده خاک بیشتر در مورد خاکهای رسی انجام می‌گیرد و هدف از آن کاهش حدود روانی خاک ، کاهش جذب آب توسط خاک و کاهش قابلیت تورم خاک آهکی است. هنگام فرآیند هیدراتاسیون آهک ، کانیهای رسی با آهک واکنش شیمیایی نشان داده و در نتیجه آن کلیه خصوصیات مکانیکی خاک تثبیت شده نیز تغییر پیدا می‌کند. پس از اتمام هیدراتاسیون آهک و سیمان، همراه با کاهش رطوبت حجم خاک تثبیت شده نیز کاهش یافته و سرانجام ترکهای ناشی از جمع شدگی در اساس و زیراساس ایجاد می‌شود. هر

اندازه دامنه خمیری خاک بیشتر باشد درصد انقباض آن نیز بیشتر خواهد بود. این ترکها بعدا در رویه آسفالتی انعکاس یافته و تا سطح راه ادامه پیدا خواهند کرد. نکته بسیار مهم درباره این گونه ترکها این است که ترک از سطح راه تا خاک بستر راه امتداد می‌یابد، بنابراین یک منبع اصلی برای افزایش رطوبت خاک بستر بشمار می‌رود. چنین ترکهایی باید به موقع و به سرعت مرمت شده و در عین حال باید در راههایی که اساس یا زیراساس تثبیت شده در آنها بکار رفته است، حتما یک سیستم زهکش کارآمد و دقیق طراحی و اجرا شده باشد.

در عین حال این نوع ترکها عمود بر امتداد راه بوده و ممکن است در ابتدا با ترکهای عرضی از نوع ترک برودتی مشابه بنظر برسند. بنابراین لازم است در راههای با اساس یا زیراساس تثبیت شده علاوه بر ارزیابی فرم ظاهری ترک، چند نمونه بطور دقیقتر بازرسی شوند تا نسبت ترکهای انعکاسی به کل ترکهای عرضی مشخص شود.

۲-۳- روشهای ترمیم ترک

هرگونه فعالیت درزمینه تعمیر و نگهداری راه بدون حذف دلایل اولیه ایجاد خرابیها، اقدامی ناموثر و غیر کارآمد تلقی می‌شود. بنابراین هنگام ارائه روشهای مناسب برای ترمیم ترک خوردگی‌ها باید عواملی را که موجب بروز ترک خوردگی در روسازی آسفالتی می‌شوند، در نظر گرفت. بدین منظور خرابیهای روسازی راه را اعم از خرابیهای سطحی و خرابیهای سازه‌ای را می‌توان با توجه به دلایل احتمالی ایجاد خرابی در پنج گروه تقسیم نمود. گروه خرابیهای تعریف شده به شرح زیر می‌باشد.

- خرابیهای ناشی از بارگذاری ترافیک: این خرابیها به دلیل خستگی رویه آسفالتی و یا تغییر

شکلهای مداوم روسازی تحت تاثیر حجم زیاد تردد ترافیک بروز می‌کنند. خرابیهایی مانند ترک موزائیکی، ترک لبه‌ای، ترک هلالی، چاله، شیار، برآمدگی و فرورفتگی، کنار رفتگی آسفالت و موجهای سطح راه

در این گروه قرار می‌گیرند. بعضی از خرابیها مانند ترکهای موزائیکی صرفاً به دلیل اثر ترافیک اتفاق می‌افتند و برخی دیگر مانند شیارها، ترافیک فقط یکی از عوامل بروز خرابی است و عوامل دیگری هم در آن مؤثرند.

– خرابیهای ناشی از آب و هوا: خرابیهایی که در این گروه قرار می‌گیرند به دلیل کاهش مقاومت و یا تورم حاصل از نفوذ آب به خاک بستر و جسم راه و یا به دلیل تورم ناشی از یخزدگی در خاک ایجاد می‌شوند. مسلماً خرابیهای زیادی را در این گروه می‌توان جای داد که عبارتند از نشست شانه راه، ترک بلوکی، ترک طولی و عرضی، ترک لبه‌ای، تورم، چاله، برآمدگی و فرورفتگی.

– خرابیهای ناشی از آسفالت: آسفالت نرم موجب تغییر شکل زیاد رویه شده و آسفالت سخت موجب کاهش مقاومت در برابر خستگی می‌گردد. خرابیهایی مانند ترک بلوکی، ترک هلالی، شیار، کناررفتگی آسفالت، قیرزدگی و موج به دلیل کیفیت نامناسب آسفالت ایجاد می‌شود. در این مورد باید در طرح اختلاط آسفالت، نوع قیر و نوع سنگدانه‌ها تجدید نظر نمود.

– خرابیهای ناشی از زیرسازی ضعیف: تراکم پائین لایه‌های اساس، زیراساس و بستر راه موجب بروز خرابیهای متعددی در راه می‌گردد. چنین خرابیهایی معمولاً در کوتاه مدت زمان برای جاده‌های پر تردد و در میان مدت برای جاده‌های کم تردد اتفاق می‌افتند. در این گروه می‌توان از خرابیهایی مانند شیار، چاله، تورم، تورفتگی و ترک لبه‌ای نام برد.

– خرابیهای ناشی از سایر عوامل: برخی از انواع خرابیها به دلیل اجرای بد و مرمت نامناسب اتفاق می‌افتند و یا مانند فرسودگی آسفالت در دراز مدت اتفاق افتاده و اجتناب ناپذیر هستند. خرابیهایی مانند وصله کاری، فرسودگی، گذرگاه راه آهن و صیقلی شدن دانه‌ها در این گروه جای دارند و عامل مشخصی که قابل پیشگیری باشد ندارند.

با توجه به موارد فوق، می‌توان انواع مختلف خرابی‌های روسازی آسفالتی را با توجه به عوامل بروز خرابی

در یک یا چند گروه از جدول (۱) قرار داد.

جدول (۱) طبقه بندی خرابیها بر اساس دلایل ایجاد خرابی در روسازی آسفالتی

ردیف	گروه خرابی	خرابیهایی که در این گروه قرار می گیرند
۱	خرابیهای ناشی از ترافیک	ترک موزائیکی - ترک لبه‌ای - ترک هلالی - چاله - شیار - کناررفتگی - موج - برآمدگی و فرورفتگی
۲	خرابیهای ناشی از آب و هوا	نشست شانه راه - ترک بلوکی - ترک طولی و عرضی - ترک لبه‌ای - تورم - چاله - برآمدگی و فرورفتگی
۳	خرابیهای ناشی از آسفالت	ترک بلوکی - ترک هلالی - شیار - کناررفتگی آسفالت - قیرزدگی - موج - برآمدگی و فرورفتگی
۴	خرابیهای ناشی از زیرسازی ضعیف	شیار - چاله - تورم - تورفتگی - ترک لبه‌ای
۵	خرابیهای ناشی از سایر عوامل	وصله کاری - فرسودگی - گذرگاه راه آهن - صیقلی شدن دانه‌ها

همانطور که قبلا ذکر شد ، ترمیم هر یک از خرابیها و بویژه ترکها مستلزم حذف عوامل بروز خرابی و سپس ترمیم خرابیهاست. روشهای مناسب برای تعمیر و ترمیم انواع ترک خوردگیها در سطوح مختلف شدت خرابی طبق دستور العمل روش PCI در جدول (۲) درج شده است.

جدول (۲) روش مناسب تعمیر و مرمت ترک خوردگی روسازی آسفالتی

نوع خرابی	شدت زیاد	شدت متوسط	شدت کم
ترک طولی	پر کردن ترکها - وصله نیمه عمیق	پر کردن ترکها	بدون اقدام - پر کردن ترکها
ترک بلوکی	پر کردن ترکها - باز یافت رویه - شخم گرم و روکش	پر کردن ترکها - باز یافت رویه - شخم گرم و روکش	اندود سطحی - پر کردن ترکها
ترک عرضی	پر کردن ترکها - وصله نیمه عمیق	پر کردن ترکها	بدون اقدام - پر کردن ترکها
ترک موزائیکی	وصله عمیق یا نیمه عمیق - روکش - بازسازی	وصله عمیق یا نیمه عمیق - روکش - بازسازی	بدون اقدام - اندود سطحی - روکش
ترک لبه‌ای	وصله نیمه عمیق	پر کردن ترکها - وصله نیمه عمیق	بدون اقدام - پر کردن ترکها
ترک هلالی	وصله نیمه عمیق	وصله نیمه عمیق	بدون اقدام - وصله نیمه عمیق

در جدول (۲) ملاحظه می‌شود که بعضی از روشهای تعمیر و مرمت ترک خوردگی برای چند نوع ترک قابل استفاده هستند. بنابراین موارد زیر را می‌توان استخراج نمود.

- آسفالت سطحی: برای ترک خوردگی بلوکی با شدت متوسط و زیاد - ترک موزائیکی با هر شدت

- آسفالت سرد مخلوط در جا: برای ترک موزائیکی با هر شدت - ترک بلوکی با شدت متوسط و زیاد

- پرکردن ترکها: برای ترک بلوکی با هر شدت - ترک طولی و عرضی با هر شدت - ترک لبه‌ای با شدت متوسط و کم

- تسطیح و تراکم شانه راه: برای ترک لبه‌ای با هر شدت

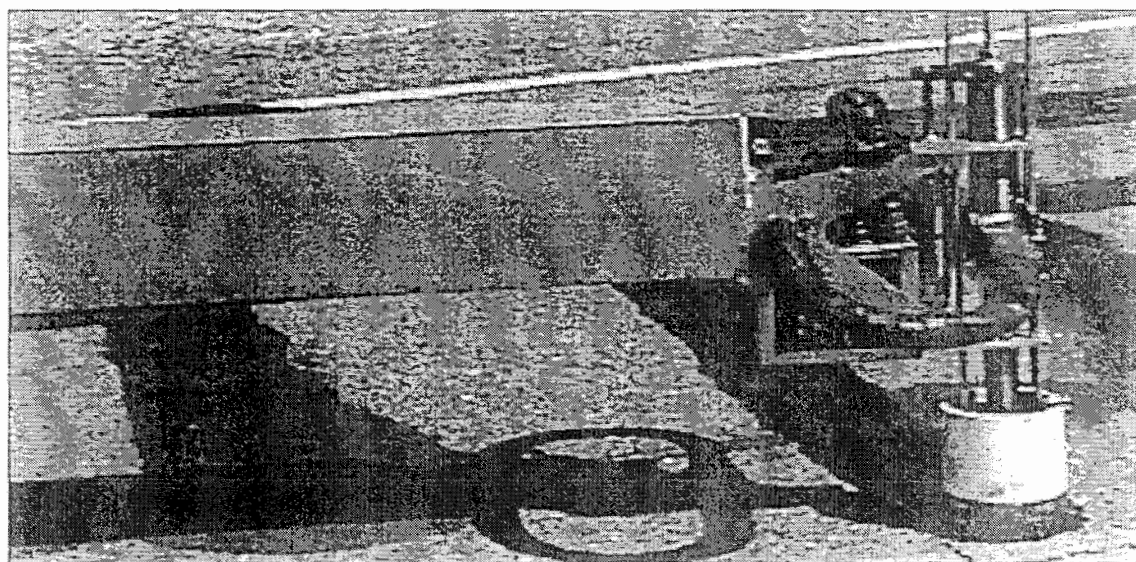
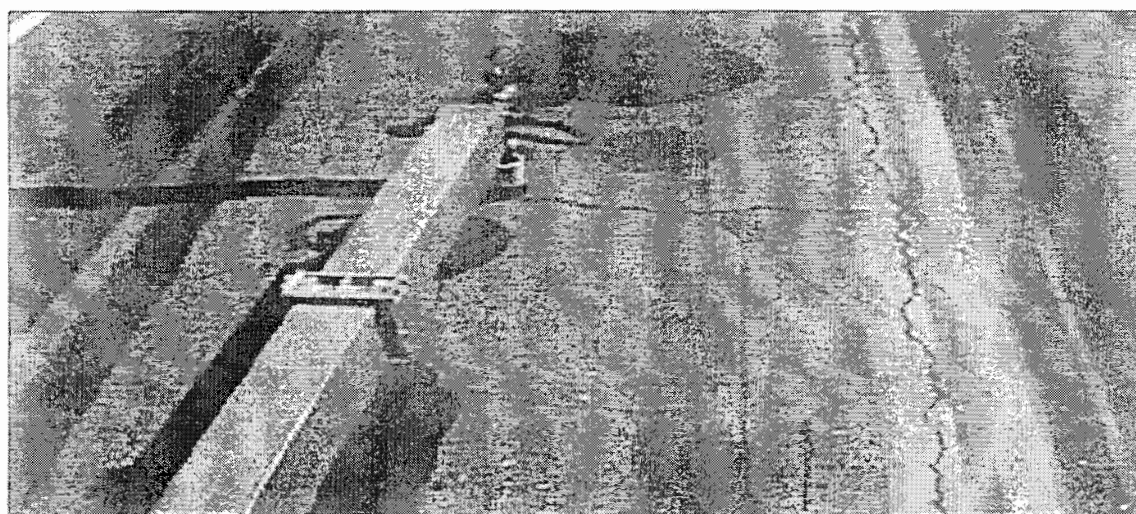
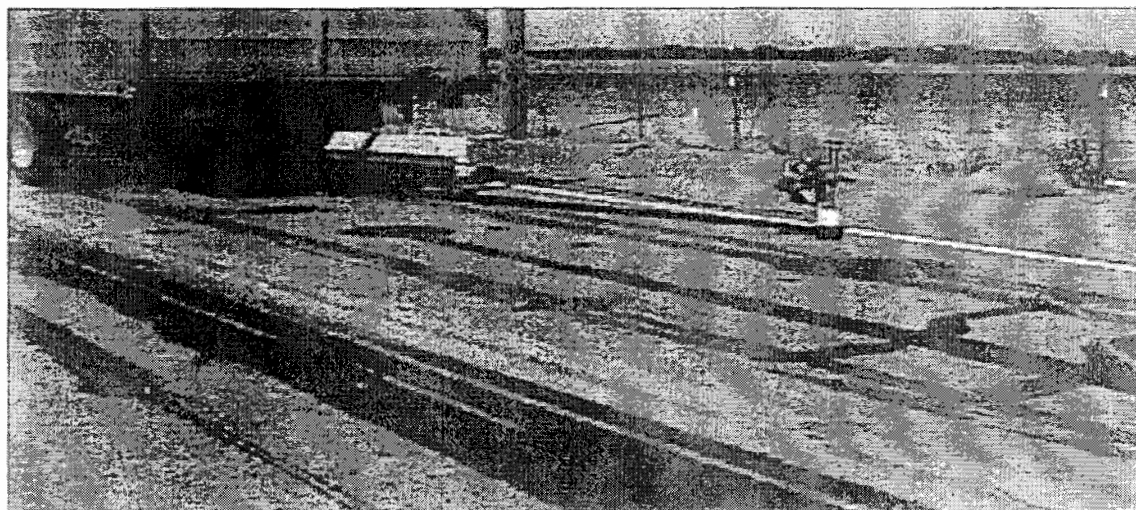
- وصله نیمه عمیق: برای ترک موزائیکی با شدت متوسط و زیاد - ترک طولی و عرضی با شدت زیاد - ترک

لبه‌ای با شدت متوسط و زیاد - ترک هلالی با هر شدت

- وصله عمیق: برای ترک موزائیکی با شدت متوسط و زیاد

- بازسازی راه: برای ترک موزائیکی با شدت متوسط و زیاد

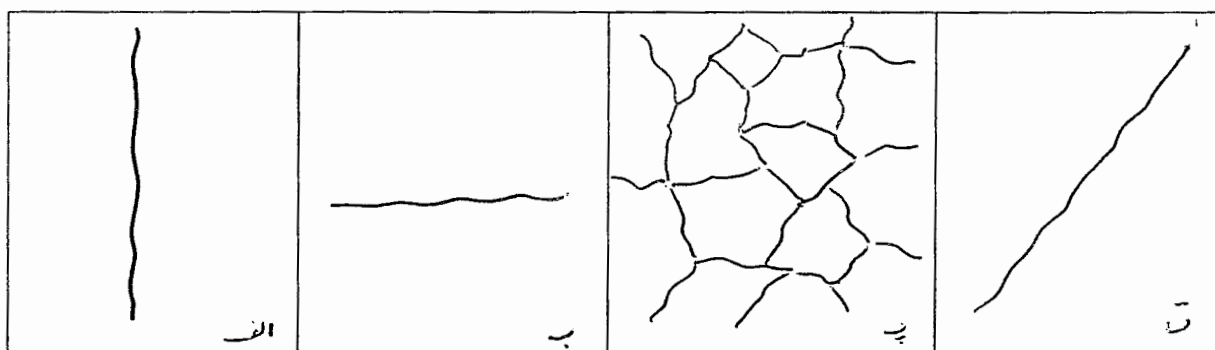
لازم به ذکر است با توجه به اینکه تعمیر و مرمت ترکهای طولی و عرضی که تقریباً در تمام راههای آسفالتی دیده می‌شوند و بخش عمده‌ای از ترکها را به خود اختصاص می‌دهند معمولاً با پر کردن ترکها انجام می‌شود، تا کنون تلاشهای زیادی جهت طراحی و ساخت سیستمهای خودکار برای پر کردن ترکهای طولی و عرضی انجام گرفته است. نمونه‌ای از این سیستمها در شکل (۲۰) ملاحظه می‌شود که قادر به شناسایی ترکهای طولی و عرضی با ضخامت بیش از ۳ میلیمتر بوده و به صورت خودکار می‌تواند ترکها را با مصالح چسبنده مناسب پر کند.



شکل (۲۰) نمونه دستگاه پرکننده ترک

۳- شناسایی و طبقه‌بندی ترکها با استفاده از الگوریتم فازی

ترکهای سطح راه یک الگوی هندسی کاملاً نامنظم و پیچیده را بر روی سطح راه به وجود می‌آورند. برخی از ترکها از لحاظ فرم و موقعیت مکانی خود تشابه بسیار زیادی دارند و تفکیک آنها توسط کارشناسان مختلف به نتایج متفاوت منجر میشود. علت این امر نامعینی، غیر دقیق بودن و کیفی بودن مشخصات ظاهری انواع ترکهاست. به عنوان مثال در شکل (۲۱- الف) یک ترک طولی، در شکل (۲۱- ب) یک ترک عرضی و در شکل (۲۱- پ) یک ترک موزائیکی بطور واضح و بدون هیچگونه ابهامی قابل تشخیص است. اما شکل (۲۱- ت) ترکی را نشان می‌دهد که توصیف و طبقه‌بندی آن با ابهام و نامعینی بسیار زیادی همراه است.



شکل (۲۱) نمونه‌ای از الگوهای مختلف ترک خوردگی

طبقه‌بندی یک ترک ساده مورب در سطح راه نه تنها برای سیستمهای خودکار بلکه برای جمعی از کارشناسان نیز با شک و تردید و ابهام انجام می‌گیرد. در چنین شرایطی تئوری فازی می‌تواند کاربرد قابل توجهی در مدلسازی‌ها داشته باشد. آنچه از تئوری فازی انتظار می‌رود این است که بتواند براساس توصیفات کیفی و متغیرهای زبانی، مدلسازی نموده و برای آموزش یک سیستم یادگیری هوشمند یا برای پیش‌بینی و وضعیت جدید یک سیستم پویا کارآیی داشته باشد. با توجه به آنچه ذکر شد، استفاده از تئوری فازی به عنوان اولین گزینه قابل استفاده در این طرح پژوهشی مورد توجه قرار گرفت که نتیجه آن ارائه یک الگوریتم ساده برای شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح راه می‌باشد. بنظر نگارندگان، الگوریتم پیشنهادی

از آن جهت اهمیت دارد که بسیار ساده بوده و محاسبه خروجی آن با سرعت زیاد امکان پذیر است. این امر امکان استفاده از این الگوریتم را در سیستمهای متحرک ارزیابی روسازی فراهم می‌سازد.

در این فصل، پس از مقدمه‌ای درباره تئوری فازی و بویژه مفهوم اشتراک فازی به معرفی الگوریتم فازی برای شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح راه پرداخته و با ارائه چند مطالعه موردی و مثال نمونه چگونگی استفاده از این الگوریتم تشریح می‌گردد. در انتهای فصل نیز راجع به عوامل موثر بر دقت جوابها بحث شده و صحت نتایج الگوریتم بررسی خواهد شد.

۳-۱- مبانی تئوری فازی

طبق مبانی فازی، پارامتر X می‌تواند تقریباً عضو مجموعه $A(X)$ باشد. درجه عضویت X در مجموعه $A(X)$ با μ_x نشان داده می‌شود که در یکی از سه وضعیت زیر است.

$\mu_x = 0$: در اینصورت X عضو مجموعه A نیست.

$\mu_x = 1$: در اینصورت X کاملاً عضو مجموعه A است.

$0 < \mu_x < 1$: در اینصورت X تا حدودی عضو مجموعه A است و مقدار μ_x درجه عضویت آنرا تعیین میکند.

مفهوم درجه عضویت این اجازه را می‌دهد که پارامترهای نامعین و غیر دقیق آنالیز شوند و در یک یا چند مجموعه جای گیرند. بعنوان مثال اگر A مجموعه ترکهای طولی و B مجموعه ترکهای عرضی و C مجموعه ترکهای موزائیکی فرض شود می‌توان گفت تصویر (۲۱-ت) تا حدودی عضو هر سه مجموعه است. در عین حال ممکن است درجه عضویت آنرا در مجموعه A برابر ۰٫۶، در مجموعه B برابر ۰٫۱ و در مجموعه C برابر ۰٫۳ پیشنهاد داد. در بخش ۳-۲ راجع به اینکه چه معیارهایی برای تعیین درجه عضویت یک تصویر در گروه ترک خوردگیهای مختلف قابل استفاده‌اند به تفصیل بحث می‌شود.

در مجموعه های پیوسته می توان یک تابع عضویت تعریف کرده و با استفاده از آن درجه عضویت هر پارامتر دلخواه X را محاسبه نمود. مثلاً ممکن است برای مجموعه A در محدوده $0 < x < 10$ تابع عضویت $\mu_A(X)$ با یکی از توابع زیر تعریف شود.

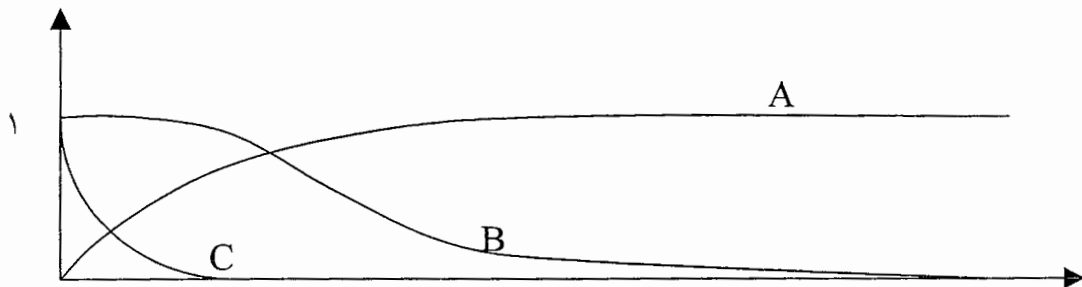
$\mu_A(X) = 1$: تمام اعداد ۰ تا ۱۰ کاملاً عضو مجموعه A هستند.

$\mu_A(X) = 0$: هیچیک از اعداد ۰ تا ۱۰ عضو مجموعه A نیستند.

$\mu_A(X) = 1 - x / 10$: عدد صفر کاملاً عضو A است و اعداد کوچکتر درجه عضویت بزرگتری دارند.

$\mu_A(X) = x^2 / 100$: اعداد بزرگتر درجه عضویت بیشتری در A دارند و عدد ۱۰ کاملاً عضو A است.

بنابراین مجموعه‌های مختلف را می توان بصورت گرافیکی بارسم توابع عضویت آنها نیز نمایش داد.

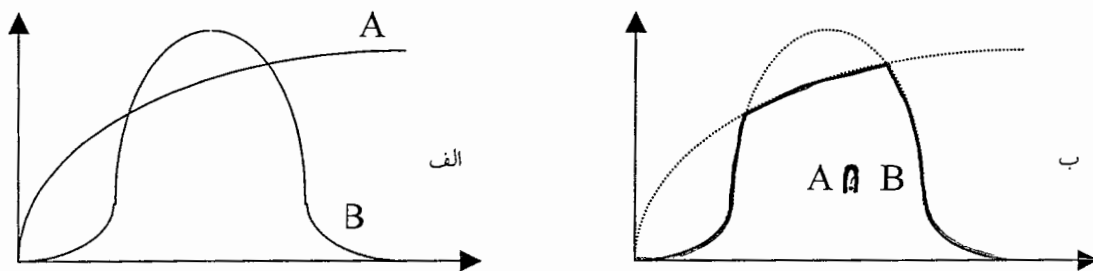


شکل (۲۲) نمونه توابع فازی

مفهوم اشتراک فازی نیز در عین سادگی دارای کاربردهای متنوع و فراوانی است. طبق تعریف بلمان و

لطفی زاده اشتراک دو مجموعه عبارتست از حداقل درجه عضویت آنها. در شکل (۲۳ - الف) دو مجموعه A

و B و در شکل (۲۳ - ب) اشتراک آنها ($A \cap B$) ملاحظه می شود.



شکل (۲۳) اشتراک فازی

حال اگر مشخصات دانشجویان X و Y و Z بصورت زیر باشد می‌توان براساس سه شرط فوق یکی را انتخاب نمود.

دانشجوی X : معدل = ۱۹، تعداد ترمهای فارغ التحصیلی = ۸ ترم، مشخصات عمومی = عالی

دانشجوی Y : معدل = ۱۹، تعداد ترمهای فارغ التحصیلی = ۷ ترم، مشخصات عمومی = خوب

دانشجوی Z : معدل = ۲۰، تعداد ترمهای فارغ التحصیلی = ۷ ترم، مشخصات عمومی = متوسط

در اینصورت درجه عضویت هر یک در مجموعه تصمیم (D) چنین است: $D = A \cap B \cap C$

$$\mu_D(X) = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(Y), \mu_C(Z)] = \text{Min} [0.9, 0.7, 1] = 0.7$$

$$\mu_D(Y) = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(Y), \mu_C(Z)] = \text{Min} [0.9, 1, 0.75] = 0.75$$

$$\mu_D(Z) = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(Y), \mu_C(Z)] = \text{Min} [1, 1, 0.5] = 0.5$$

پس دانشجوی Y با درجه عضویت ۰/۷۵ بیشترین عضویت را در مجموعه تصمیم دارد و دانشجوی Z با درجه عضویت ۰/۵ کمترین عضویت را در مجموعه تصمیم دارد. لذا انتخاب نهایی دانشجوی Y خواهد بود. ملاحظه می‌شود که دانشجوی Z به علت نداشتن یکی از شرایط (C) حذف شد. در واقع هنگام تصمیم‌گیری براساس اشتراک فازی گزینه‌های نامناسب حذف شده و سرانجام مناسبترین گزینه باقی خواهد ماند. مفهوم دیگری که کاربردهای بسیار زیادی در تحلیل مسائل مبهم و نامعین پیدا کرده است، استنتاج فازی است. روشهای مختلفی برای استنتاج فازی پیشنهاد شده‌اند که از جمله ساده‌ترین آنها قانون ترکیبی استنتاج (CRI) می‌باشد. فرض کنید که قانون عمومی $P1$ بصورت زیر تعریف شود.

$P1$: اگر X عضو مجموعه A باشد آنگاه Y عضو مجموعه B خواهد بود.

حال اگر مشاهده انجام شده با قانون $P2$ نمایش داده شود می‌توان نوشت:

$P2$: X در A^* مشاهده شده است.

در اینصورت می‌توان نتیجه گرفت که Y در B^* خواهد بود.

قاعده P1: اگر X عضو A باشد آنگاه Y عضو B است.

قاعده P2: X عضو A* است.

نتیجه: Y عضو B* خواهد بود.

مجموعه B* را می‌توان با عملگر ترکیب محاسبه نمود:

$$B^* = A^* \circ (A \times B)$$

برای عملگر ترکیب (O) روابط مختلفی پیشنهاد شده است که از بین آنها بنظر می‌رسد عملگر max - min رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد.

$$R(x, y) = \text{Min} [A(x), B(y)]$$

$$B^*(y) = A^* \circ R = \text{Max} [A^*(x), R(x, y)]$$

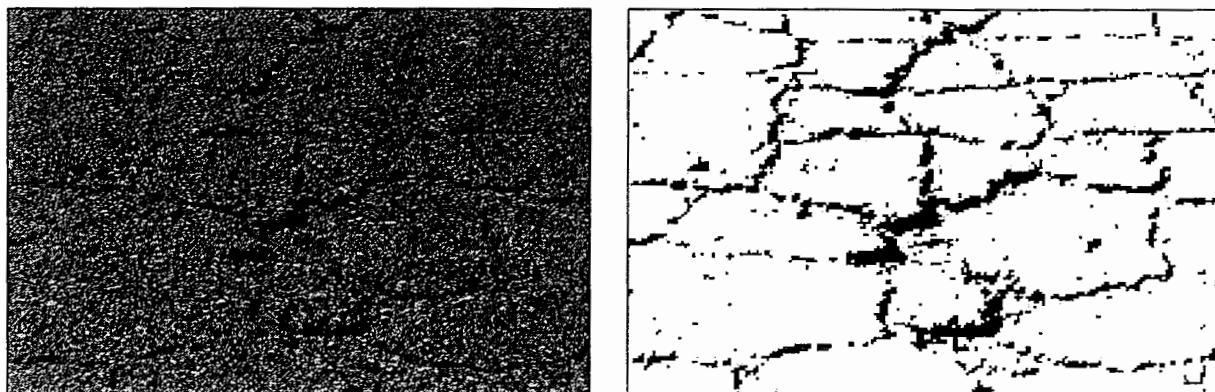
مزیت بزرگ روش استنتاج فازی این است که می‌توان حتی درباره شرایطی که در قاعده اولیه P 1 تعریف نشده است بحث و نتیجه‌گیری کرد. این روش برای چند قاعده P 1 و P 2 و ... و P n هم تعمیم یافته و قابل استفاده است.

۳-۲- الگوریتم فازی برای شناسایی و طبقه‌بندی ترک

برای تشخیص نوع ترک، معیارهایی مورد نیاز هستند که اولاً براحتی قابل اندازه‌گیری باشند و ثانیاً خصوصیات آنها در هر نوع ترک با بقیه انواع ترکها متفاوت باشد. برای این منظور می‌توان به تعریف عمومی ترکها مراجعه نمود. طبق تعریف، ترکهای طولی در امتداد راه، ترکهای عرضی عمود بر امتداد راه، ترکهای بلوکی در دو جهت موازی و عمود بر امتداد راه و ترکهای موزائیکی معمولاً بصورت مورب و زاویه‌دار با یکدیگر و بصورت غیر منظم ایجاد می‌شوند. بنابراین اگر بتوان مقدار گسترش ترک را در هر امتداد اندازه‌گیری کرد، معیار مورد نظر فراهم شده است.

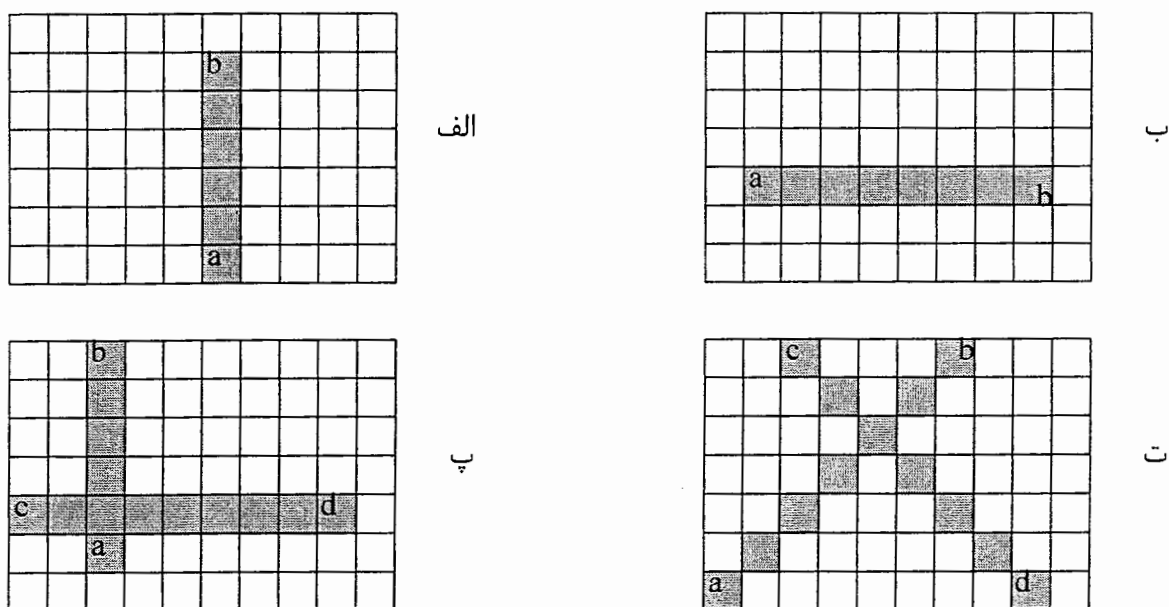
برای شروع کار ابتدا تصاویر رنگی تهیه شده از سطح راه به تصاویر سیاه و سفید تبدیل می‌شود و سپس

به فرم باینری در می‌آیند که در این مرحله طرح کلی ترک خوردگی‌ها روی تصویر به وضوح نمایان است.



شکل (۲۴) تصاویر اولیه و تصاویر باینری از ترکهای سطح راه

تصاویر سیاه و سفید بصورت یک تصویر دیجیتال شامل $۶۴۰ * ۴۸۰$ پیکسل تهیه شده‌اند و به هر پیکسل عددی از صفر تا ۲۵۶ تعلق می‌گیرد. عدد صفر رنگ سیاه، ۲۵۶ رنگ سفید و هر مقدار بین آنها رنگ خاکستری با شدتهای متفاوت را نشان میدهد. در تصاویر باینری، تصویر شامل $۶۴۰ * ۴۸۰$ پیکسل با مقادیر صفر و یک می‌باشد. بنابراین می‌توان این گروه از تصاویر را با یک ماتریس شامل $۶۴۰ * ۴۸۰$ المان جایگزین نمود که مقادیر المانهای آن صفر و یک است. حال با توجه به شکل (۲۵) می‌توان یک تعریف عمومی از مقادیر گسترش ترک ارائه داد.



شکل (۲۵) مقادیر گسترش ترک در جهت‌های مختلف

بر اساس هریک از معیارهای پیشنهادی محاسبه نمود. بعنوان مثال $\mu_T(P1)$ درجه عضویت تصویر در گروه ترکهای طولی براساس معیار P1 و $\mu_T(P2)$ درجه عضویت تصویر در گروه ترکهای موزائیکی براساس معیار P2 میباشد. توابع عضویت μ با استفاده از نتایج آنالیز ترکها در تصاویر متعدد و با تعداد کافی بر اساس معیار درصدهای گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی‌ها به صورت زیر بدست آمده است.

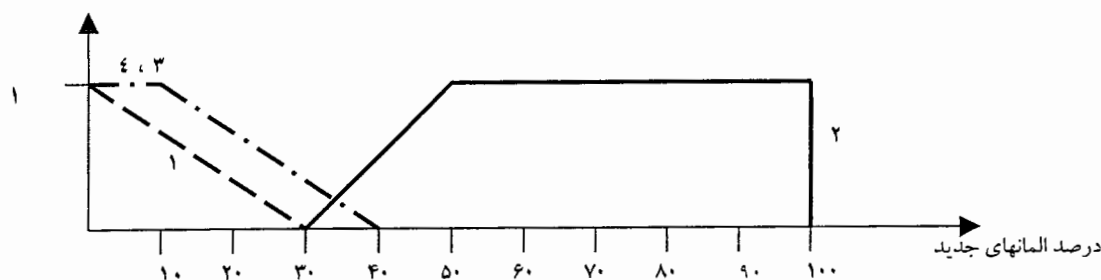
۳-۲-۱- گروه ترکهای طولی

اگر X_i درصد گسترش ترک در جهت i باشد و $\mu(t, i)$ درجه عضویت معیار i ام در گروه ترکهای طولی (t) باشد، می‌توان نوشت:

$$\mu_{(t,1)} = \begin{cases} (30 - x_1) / 30 & 0 < x_1 < 30 \\ 0 & 30 < x_1 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(t,2)} = \begin{cases} 0 & 0 < x_2 < 30 \\ (x_2 - 30) / 20 & 30 < x_2 < 50 \\ 1 & 50 < x_2 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(t,3)} = \mu_{(t,4)} = \begin{cases} 1 & 0 < x_3, x_4 < 10 \\ (40 - x) / 30 & 10 < x_3, x_4 < 40 \\ 0 & 40 < x_3, x_4 < 100 \end{cases}$$



شکل (۲۶) توابع فازی مربوط به ترکهای طولی

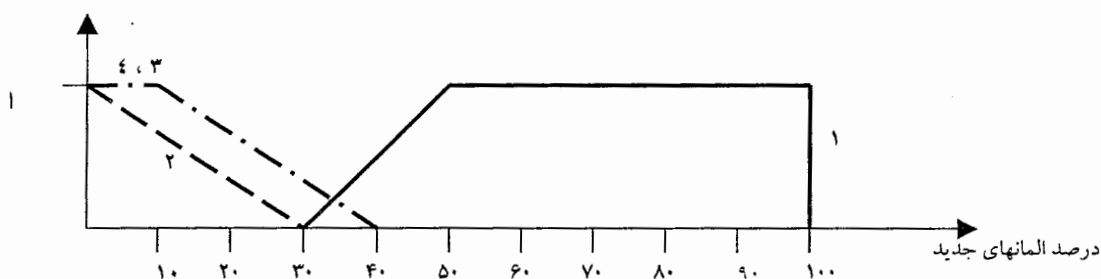
۳-۲-۲- گروه ترکهای عرضی

مشابه حالت قبل x_i درصد گسترش ترک در جهت i و $\mu(A, i)$ درجه عضویت معیار i ام در گروه ترکهای عرضی (A) است.

$$\mu_{(A,1)} = \begin{cases} 0 & 0 < x_1 < 30 \\ (x_1 - 30) / 20 & 30 < x_1 < 50 \\ 1 & 50 < x_1 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(A,2)} = \begin{cases} (30 - x_2) / 30 & 0 < x_2 < 30 \\ 0 & 30 < x_2 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(A,3)} = \mu_{(A,4)} = \begin{cases} 1 & 0 < x_3, x_4 < 10 \\ (40 - x) / 30 & 10 < x_3, x_4 < 40 \\ 0 & 40 < x_3, x_4 < 100 \end{cases}$$



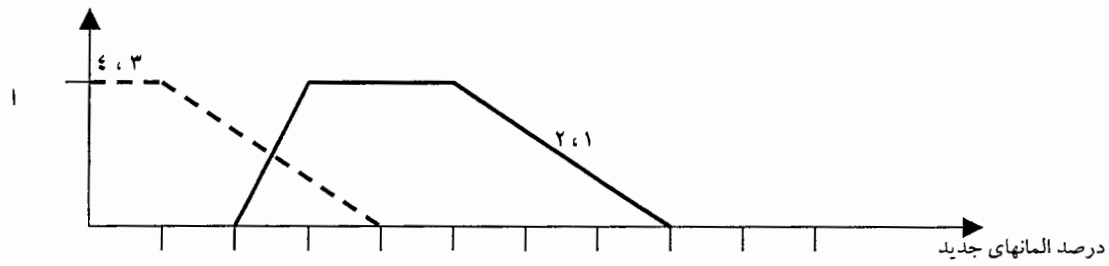
شکل (۲۷) توابع فازی مربوط به ترکهای عرضی

۳-۲-۳- گروه ترکهای بلوکی

روابط زیر درجه عضویت معیار شماره i را در گروه ترکهای بلوکی (B) نشان می‌دهد.

$$\mu_{(B,1)} = \mu_{(B,2)} = \begin{cases} 0 & 0 < x_1, x_2 < 20 \\ (x - 20) / 10 & 20 < x_1, x_2 < 30 \\ 1 & 30 < x_1, x_2 < 50 \\ (80 - x) / 30 & 50 < x_3, x_4 < 80 \\ 0 & 80 < x_3, x_4 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(B,3)} = \mu_{(B,4)} = \begin{cases} 1 & 0 < x_3, x_4 < 10 \\ (40 - x) / 30 & 10 < x_3, x_4 < 40 \\ 0 & 40 < x_3, x_4 < 100 \end{cases}$$



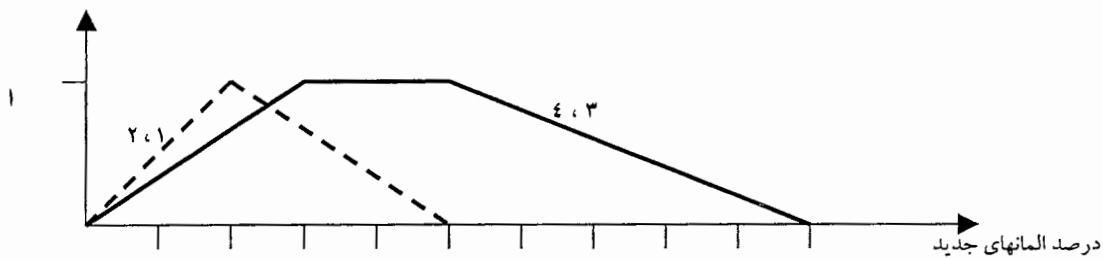
شکل (۲۸) توابع فازی مربوط به ترکهای بلوکی

۳-۲-۴- گروه ترکهای موزائیکی

درجه عضویت معیار شماره i در گروه ترکهای موزائیکی (M) توسط روابط زیر تعریف می‌گردد.

$$\mu_{(M,1)} = \mu_{(M,2)} = \begin{cases} x / 20 & 0 < x_1, x_2 < 20 \\ (50 - x) / 30 & 20 < x_1, x_2 < 50 \\ 0 & 50 < x_1, x_2 < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{(M,3)} = \mu_{(M,4)} = \begin{cases} x / 30 & 0 < x_3, x_4 < 30 \\ 1 & 30 < x_3, x_4 < 50 \\ (100 - x) / 50 & 50 < x_3, x_4 < 100 \end{cases}$$



شکل (۲۹) توابع فازی مربوط به ترکهای موزائیکی

از جمله نکاتی که در ضمن کار مشخص گردید این است که بهترین زمان برای تصویر برداری از سطح راه در فاصله دو تا سه ساعت پس از بارندگی است. در اینصورت سطح آسفالت کاملاً خشک شده و ترکها هنوز خیس و مرطوب هستند و در تصویر بصورت خطوط کاملاً سیاه روی زمینه خاکستری روشن دیده می‌شوند.

بررسی شدت رنگ در قسمت‌های مختلف تصویر نشان می‌دهد که در تصاویر سیاه و سفید، شدت رنگ پیکسل‌های واقع در زمینه آسفالت بین ۱۰۰ تا ۲۵۶ است و پیکسل‌های منطبق بر امتدادهای ترک خوردگی معمولاً شدت رنگی بین صفر تا ۵۰ را دارند بنابراین می‌توان بدون تبدیل تصویر اولیه به فرم باینری و بطور مستقیم ترکها را شناسایی نمود. اگر C مجموعه پیکسل‌های روی ترک تعریف شود، تابع زیر می‌تواند درجه عضویت یک پیکسل را در مجموعه C نشان دهد. این تابع با بررسی سطح رنگ ترکها در بیش از یکصد تصویر پیشنهاد شده است.

$$\mu(C, x) = \begin{cases} 1 & 0 < x < 50 \\ (100 - x) / 50 & 50 < x < 100 \\ 0 & 100 < x \end{cases}$$

که در آن X نشان‌دهنده شدت رنگ در پیکسل شماره I میباشد. حال با داشتن درجه عضویت هر پیکسل در مجموعه C می‌توان امتداد ترک را مشخص نمود. اگر درجه عضویت پیکسل‌های متوالی a و b و c و d به ترتیب $\mu_a = 1$ و $\mu_b = 1$ و $\mu_c = 0.7$ و $\mu_d = 0$ باشد، ترک در امتداد $abcd$ به اندازه یک واحد در امتداد bc به اندازه 0.7 واحد و در فاصله cd به اندازه صفر واحد گسترش یافته است. بنابراین مقدار گسترش ترک در امتداد $abcd$ مساوی 1.7 واحد میباشد. بنابر آنچه گفته شد هر تصویر با یک ماتریس جایگزین می‌شود که مقادیر المانهای آن مساوی با درجه عضویت پیکسل‌های متناظر در مجموعه C می‌باشند. پس مقادیر گسترش ترک در امتدادهای اصلی طولی، عرضی و مورب (۳۵ و ۴۵) در یک تصویر سیاه و سفید بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۱} = S_1 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i,j+1})$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۲} = S_2 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j})$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۳} = S_3 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i-1,j+1})$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۴} = S_4 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j+1})$$

$$\text{مجموع مقادیر گسترش ترک در تصویر} = S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

بنابراین بدون نیاز به پیش پردازش تصویر و فقط با استفاده از یک تصویر سیاه و سفید می‌توان نسبتهای گسترش ترک $(P1, P2, P3, P4)$ را محاسبه نموده و سپس با محاسبه درجه عضویت تصویر در گروههای مختلف ترک خوردگی ، نوع ترک را محاسبه نمود. مقایسه نسبتهای گسترش ترک در تصاویر سیاه و سفید با تصاویر پردازش شده (به فرم باینری) نشان میدهد که در مقادیر نسبتهای $P4, P3, P2, P1$ تغییر قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد و می‌توان از توابع درجه عضویت فازی که قبلا پیشنهاد شده بودند همچنان استفاده نمود . براساس هریک از معیارهای P_i یک درجه عضویت برای تصویر در گروه ترک خوردگی $\mu (i)$ محاسبه می‌شود.

درجه عضویت هر تصویر $\mu (I)$ در هرگروه بصورت اشتراک درجه عضویت معیارهای چهارگانه $\mu (P_i)$ تعریف می‌شود و سرانجام تصویر در گروهی قرار می‌گیرد که بیشترین درجه عضویت را در آن گروه داشته باشد.

۳-۳- مطالعه موردی

در این قسمت با دو مطالعه موردی روش کار این الگوریتم تشریح می‌گردد.

الف) در شکل (۳۰) یک نمونه از ترک طولی ملاحظه می‌شود. مقدار گسترش ترک خوردگی در امتدادهای مختلف را می‌توان با روابط زیر محاسبه نمود.

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۱} = S_1 = \sum \text{Min} (\mu_{i,j}, \mu_{i,j+1}) = 413,62$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۲} = S_2 = \sum \text{Min} (\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j}) = 131,06$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۳} = S_3 = \sum \text{Min} (\mu_{i,j}, \mu_{i-1,j+1}) = 316,26$$

$$\text{مقدار گسترش ترک در جهت ۴} = S_4 = \sum \text{Min} (\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j+1}) = 451,26$$

به همین ترتیب درصد گسترش ترک در هر یک از جهات اصلی توسط معادلات زیر محاسبه می‌شود.

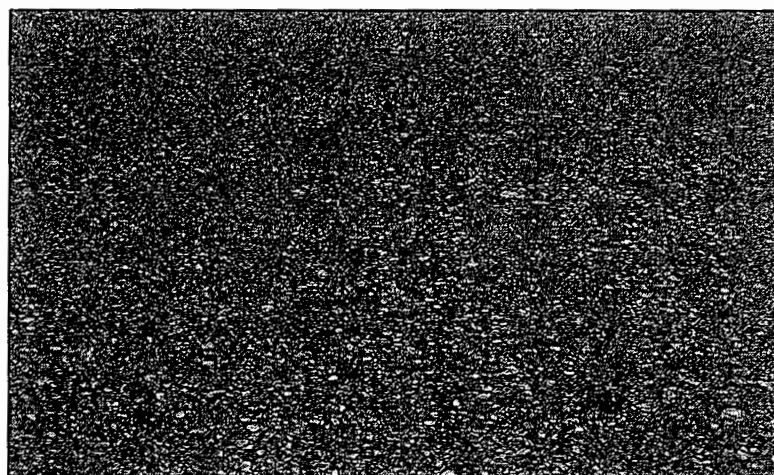
$$P_1 = S_1 / \sum S = 16,6 \text{ درصد گسترش ترک در جهت ۱}$$

$$P_2 = S_2 / \sum S = 52,6 \text{ درصد گسترش ترک در جهت ۲}$$

$$P_3 = S_3 / \sum S = 12,7 \text{ درصد گسترش ترک در جهت ۳}$$

$$P_4 = S_4 / \sum S = 18,1 \text{ درصد گسترش ترک در جهت ۴}$$

جدول (۳) با منظور نمودن درصد گسترش ترک در جهات مختلف و بر اساس توابع عضویت فازی بخش قبل تهیه شده و طبقه‌بندی ترک را مشخص می‌نماید. در ردیف انتهایی جدول (۳) بیشترین مقدار عضویت متعلق گروه ترک‌های طولی است، بنابراین شکل (۳۰) یک ترک طولی را نشان می‌دهد.

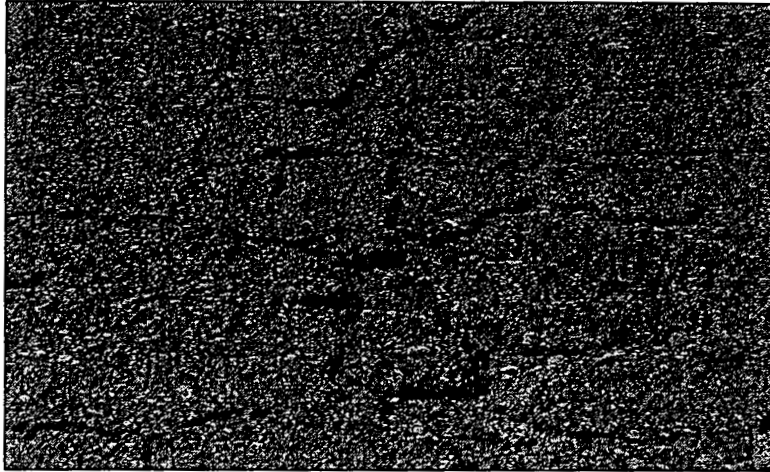


شکل (۳۰) ترک طولی

جدول (۴) آنالیز نحوه گسترش ترک و طبقه‌بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی‌ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰,۸۳	۰	۰	۰,۴۴۷	۱۶,۶	۱
۰	۰,۹۱۳	۰	۱	۵۲,۶	۲
۰,۴۲۳	۰,۹۱	۰,۹۱	۰,۹۱	۱۲,۷	۳
۰,۶۰۴	۰,۷۳	۰,۷۳	۰,۷۳	۱۸,۱	۴
۰	۰	۰	۰,۴۴۷	اشتراک درجه عضویت	

ب) شکل (۳۱) یک نمونه ترک موزائیکی را نشان می‌دهد. در این مورد نیز مقدار گسترش ترک خوردگی در امتدادهای مختلف با روابط فوق الذکر محاسبه می‌شود.



شکل (۳۱) ترک موزائیکی

$$\begin{aligned}
 \text{مقدار گسترش ترک در جهت ۱} &= S_1 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i,j+1}) = 10574 \\
 \text{مقدار گسترش ترک در جهت ۲} &= S_2 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j}) = 10842 \\
 \text{مقدار گسترش ترک در جهت ۳} &= S_3 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i-1,j+1}) = 9746 \\
 \text{مقدار گسترش ترک در جهت ۴} &= S_4 = \sum \text{Min}(\mu_{i,j}, \mu_{i+1,j+1}) = 7271
 \end{aligned}$$

به همین ترتیب درصد گسترش ترک در هر یک از جهات اصلی محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \text{درصد گسترش ترک در جهت ۱} &= P_1 = S_1 / \sum S = 27,5 \\
 \text{درصد گسترش ترک در جهت ۲} &= P_2 = S_2 / \sum S = 28,2 \\
 \text{درصد گسترش ترک در جهت ۳} &= P_3 = S_3 / \sum S = 25,4 \\
 \text{درصد گسترش ترک در جهت ۴} &= P_4 = S_4 / \sum S = 18,9
 \end{aligned}$$

جدول (۴) با منظور نمودن درصد گسترش ترک در جهات مختلف و بر اساس توابع عضویت بخش قبل تهیه شده و طبقه‌بندی ترک را مشخص می‌نماید. در ردیف انتهایی جدول (۴) بیشترین مقدار عضویت متعلق گروه ترکهای موزائیکی است، بنابراین شکل (۳۱) یک ترک موزائیکی را نشان می‌دهد.

جدول (۵) آنالیز نحوه گسترش ترک و طبقه بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰,۷۵	۰,۷۵۱	۰	۰,۸۳	۲۷,۵	۱
۰,۷۲۶	۰,۸۲۱	۰,۰۵۹	۰	۲۸,۲	۲
۰,۸۴۵	۰,۴۸۸	۰,۴۸۸	۰,۴۸۸	۲۵,۴	۳
۰,۶۳۱	۰,۷۰۳	۰,۷۰۳	۰,۷۰۳	۱۸,۹	۴
۰,۶۳۱	۰,۴۸۸	۰	۰	اشتراک درجه عضویت	

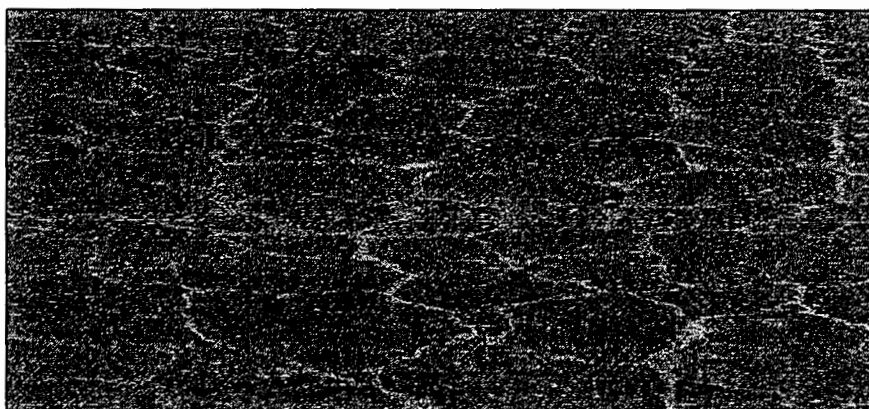
۳-۴- بررسی دقت نتایج

الگوریتمی که در این بخش معرفی شد در برخی شرایط به جوابهای اشتباه منتهی می شود. در این بخش عوامل بروز خطا بررسی شده و در هر مورد روشی برای کاهش یا حذف خطاها ارائه می شود.

خطاهای ناشی از رنگ روشن ترکها نسبت به زمینه آسفالتی

در بعضی از تصاویر ترکها با رنگ بسیار روشن تر از زمینه آسفالتی دیده می شوند که نمونه آن در شکل (۳۲) ملاحظه می شود. از آنجا که الگوریتم فازی ترکها را براساس شدت رنگ پیکسلهایشان (کمتر از ۱۰۰) شناسایی می کند و در این گونه تصاویر ترکها روشن بوده و حتی ممکن است شدت رنگ پیکسلها در آنها بیش از ۲۰۰ باشد بنابراین ممکن است هیچگونه ترکی در تصویر قابل تشخیص نباشد و یا فقط ترکهای تیره در بخش کوچکی از تصویر شناسایی شود. برای حذف چنین خطایی دوروش پیشنهاد میشود. روش اول به شرایط عمومی تصویربرداری از راه مربوط می شود و همانطور که قبلا ذکر شد اگر تصویربرداری در حدود ۲ تا ۳ ساعت پس از باران انجام شود کیفیت تصاویر و وضوح ترکها در آن بسیار بالا بوده و الگوریتم فازی با دقت بسیار خوبی قادر به تشخیص ترکها خواهد بود. حتی برای ارزیابی راه در فصل تابستان می توان با استفاده از یک ماشین آبپاش سطح روسازی را مرطوب نموده و با فاصله زمانی حدود یک ساعت بعد اقدام به

تهیه تصاویر از سطح راه نمود. دومین روش حذف خطا ، پیش پردازش تصویر قبل از استفاده از الگوریتم فازی است بطوریکه ابتدا تصویر به فرم باینری در آمده و سپس براساس آنالیز تصویر پردازش شده شناسایی و طبقه بندی ترک انجام شود. در اینصورت ملزومات اجرایی خاصی در هنگام تصویربرداری از راه ضرورت ندارد و درعین حال در حین پردازش اولیه نیز بخشی از نویزها قابل حذف می‌باشند.

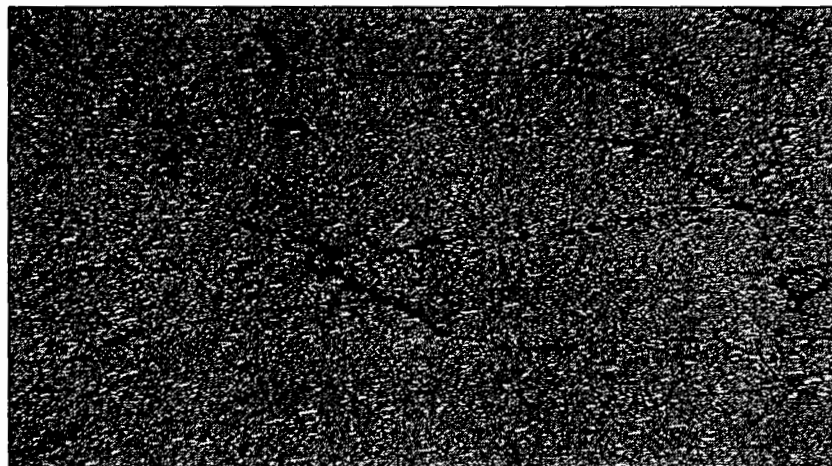


شکل (۳۲) ترکهای با رنگ روشنتر از زمینه

- خطاهایی که به دلیل فرم خاص ترکهای موزائیکی ظاهر می شوند

گاهی اوقات ترکهای موزائیکی با شدت زیاد مانند شکل (۳۳) بوجود می‌آیند. طرح کلی اینگونه ترکها ، بصورت خطوط عمود برهم بوده که ممکن است خطوط بصورت مورب با زاویه های ۴۵ و ۱۳۵ نسبت به امتداد راه و یا بصورت طولی و عرضی باشند. در حالت دوم تنها دلیل تمایز ترکهای موزائیکی با ترکهای بلوکی ابعاد و اندازه های ترکها و قطعاتی است که بین آنها ایجاد می‌شوند. بنابراین در ترکهای بلوکی مجموع مقادیر گسترش ترک در مقایسه با ترکهای موزائیکی بسیار کمتر خواهد بود. با توجه به آنچه گفته شد برای حذف خطا در تصاویر ی مانند شکل (۳۳) در صورتی که الگوریتم فازی نوع ترک را بلوکی تشخیص داد ، یک کنترل جداگانه بر روی مجموع مقادیر گسترش ترک انجام شود.

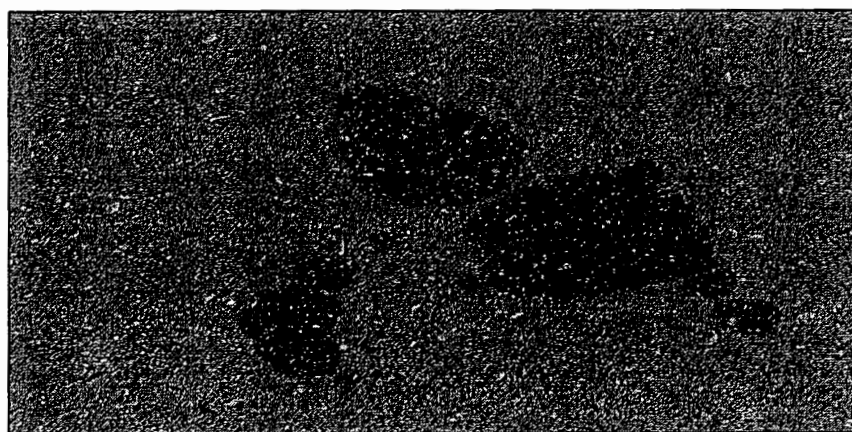
در عین حال این نکته نیز نباید نادیده گرفته شود که حتی در ارزیابیهای دستی ، گاهی اوقات یک ترک توسط چند کارشناس مختلف در گروههای متفاوت قرار می‌گیرد و این امر دقیقا به دلیل خصوصیت ابهام و نامعینی است که در فرم ترکها وجود دارد.



شکل (۳۳) ترک موزائیکی با شدت زیاد و قطعات مستطیلی شکل

- خطاهای ناشی از سایه و لکه روغن روی سطح راه

این گروه از خطاها در الگوریتم فازی منجر به اشتباه در تشخیص ترک یا نوع آن می‌شود. برای حذف چنین خطاهایی در الگوریتم پیش بینی خاصی صورت نگرفته و توصیه می‌شود که از ورود چنین تصاویری به سیستم صرف‌نظر شود .



شکل (۳۴) تصویر همراه با سایه یا لکه روغن باید حذف شود

۴- بینایی ماشین و پردازش تصویر

۴-۱- مقدمه

سیستم بینایی مهم‌ترین نعمتی است که به انسان اعطا شده است. تجزیه و تحلیل داده‌هایی که به صورت تصاویر سیاه و سفید و یا رنگی هستند، بهترین منابع اطلاعاتی می‌باشند که اطلاعات مورد نیاز برای کنترل فرآیند و یا کنترل کیفیت را فراهم می‌آورد. تلاش‌های فراوانی صورت می‌گیرد تا با استفاده از سیگنال‌های مناسب، تصویری از داخل اشیا که نورمرئی به داخل آن‌ها نفوذ نمی‌کند، تهیه شود. به عنوان مثال استفاده از اشعه‌های ایکس و گاما، امواج فراصوت، امواج الکترومغناطیس نمونه‌هایی از تلاش انسان برای ایجاد تصویر مرئی از داخل بدن انسان، داخل بتن و قطعات ریخته‌گری فلزی و یا اعماق فضاست که نتیجه نهایی آن ماشینی است که توانایی ایجاد تصاویر مرئی را دارد. مرحله بعد تجزیه و تحلیل تصاویر قابل رویت به کمک رایانه است. این بخش تحت عنوان پردازش تصویر مورد بحث قرار می‌گیرد که محصول نهایی آن خارج نمودن اطلاعات با ارزش و دارای تشخیص از تصویر است. مرحله نهایی استفاده از این اطلاعات استخراج شده به منظور کنترل کیفیت، کنترل فرآیند و یا دسته‌بندی است. به طور کلی بینایی مبتنی بر ماشین را می‌توان تحت سه عنوان مورد بررسی قرار داد:

۱- ایجاد تصویر به شکل دیجیتالی

۲- استفاده از روش‌های پردازش تصویر برای اصلاح و یا استخراج اطلاعات مورد نیاز

۳- بکارگیری اطلاعات به دست آمده برای تصمیم‌گیری

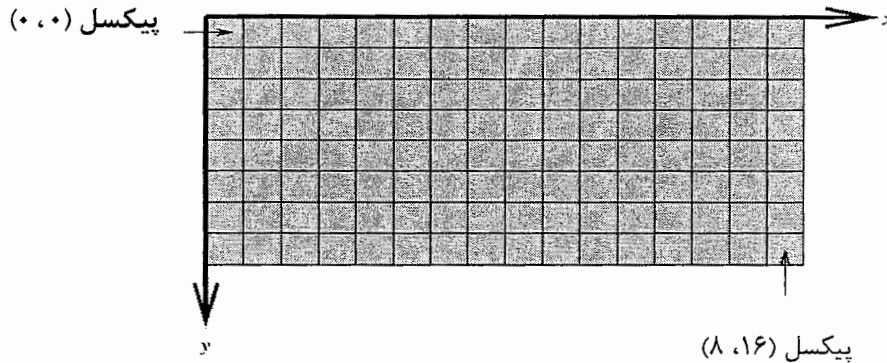
در ادامه هر بخش به اختصار توضیح داده می‌شود.

۲-۴- ایجاد تصویر دیجیتالی

گام اول در هر سیستم مبتنی بر ماشین‌بینایی تولید تصویر دیجیتالی است. قبل از بحث در نحوه ایجاد تصویر کاربردهای آن را مطابق با جدول (۶) دسته‌بندی می‌کنیم. در هر یک از موارد فوق راه رسیدن به تصویر و سیگنالی که برای ایجاد آن‌ها به کار گرفته می‌شود، متفاوت است. اما همه آن‌ها دارای ساختاری به شکل نشان داده شده در شکل (۳۵) هستند. این تصاویر به صورت ماتریسی از اعداد نشان داده می‌شوند. عنصر (i, j) ام ماتریس متناظر با پیکسلی (کوچکترین جز تصویر) از تصویر است که مختصات آن بر روی محورهای مختصات برابر (i, j) است. اگر تصویر تک رنگ (سیاه و سفید) باشد، آن‌گاه هر عنصر ماتریس عددی است که سطح خاکستری آن‌را که بین سیاه کامل تا سفید کامل است را نشان می‌دهد. در مورد تصاویر رنگی هر عنصر حاوی سه عدد است که متناظر با رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (RGB) می‌باشند. اگر تصویر به صورت ۸ بیتی ذخیره شود آن‌گاه این اعداد بین صفر تا ۲۵۵ هستند. برای تعیین تطابق هر پیکسل با واقعیت باید ابعاد شی واقعی بر ابعاد تصویر تقسیم شود تا مقیاس طول و عرض مشخص شود.

جدول (۶) زمینه و کاربردهای تصاویر دیجیتال

کاربرد	زمینه
افزایش کیفیت تصاویر حاصل از اشعه ایکس، اسکن MRI و فراصوت	پزشکی
ایجاد تصویر برای تست‌های غیر مخرب اجسام صلب	مهندسی
تهیه نقشه‌های با مقیاس متفاوت از مناطق مختلف با نمایش معادن، نوع پوشش و وضعیت آب و هوا	جغرافی
بازسازی تصاویر مات و یا مخدوش حاصل از آثار تاریخی	معماری
از تولید تصاویر دارای افکت‌های مختلف تا دانه‌بندی میوه	تجاری



شکل (۳۵) الگوی ماتریسی یک تصویر دیجیتال ۸ در ۱۶

۳-۴- پردازش تصویر

عملیاتی که بر روی تصویر انجام می‌شود با استفاده از رایانه‌های دیجیتال است. لذا با پیشرفت فن‌آوری این روش‌ها نیز به سرعت پیشرفت نموده‌اند. پردازش تصویر به چهار گام اساسی اکتساب تصویر، پیش‌پردازش تصویر، تحلیل تصویر و تعبیر تصویر تقسیم می‌شود که در ادامه به اختصار به آن‌ها می‌پردازیم.

۳-۴-۱- اکتساب تصویر

بسته به نوع سیگنالی که برای ثبت عکس‌العمل سیستم مورد بررسی به کار می‌رود نوع ابزار اکتساب تصویر متفاوت است. اگر از نور مرئی برای ثبت تصویر استفاده شود ابزار آن دوربین‌های فیلم و عکس‌برداری است که به وفور وجود دارد. اگر تصویر اکتسابی آنالوگ باشد باید برای ارسال به رایانه و انجام عملیات پردازشی تبدیل به گسسته و دیجیتال شود. با توجه به استفاده از دوربین دیجیتال در این پروژه از توضیح شرایط و روش گسسته‌سازی و دیجیتال نمودن تصاویر آنالوگ خودداری می‌شود. تصاویر ضبط شده به صورت دیجیتال و با فرمت JPEG است. تصاویر به صورت رنگی و با دقت ۴۸۰ در ۶۸۰ پیکسل است که برای ثبت رنگ از ۸ بیت استفاده می‌کند. لذا سطح رنگ از صفر تا ۲۵۵ که حداقل و حداکثر سطح رنگ می‌باشد، ضبط

می‌شود. ابزاری دیگری که برای ثبت تصویر به کار می‌رود ارتباطی به این پروژه ندارند و مورد بحث قرار نمی‌گیرند.

۴-۳-۲ - پیش‌پردازش تصویر

این روش‌ها به دو گروه عمده خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. روش‌های خطی شامل آلوگوریتم‌هایی چون تبدیل فوریه، کانولوشن و تشخیص لبه است. گروه دوم عملیات سطح بالاتری چون ریخت‌شناسی و تابع ژنریک آن فرسایش را در بر می‌گیرد. از نظر عملیات بر روی تصویر تبدیلات به دودسته نقطه‌ای و گروهی تقسیم می‌شوند. در گروه نقطه‌ای همه عملیات پیکسل به پیکسل انجام می‌شود. در این گروه مقدار اصلاح شده یک پیکسل فقط وابسته به مقدار اولیه همان پیکسل است. اما در نوع گروهی پیکسل‌های همسایه نیز در مقدار اصلاح شده یک پیکسل تاثیر دارند. معمولاً ۹ نقطه به شکل یک مربع و یا ۷ نقطه به صورت یک لوزی حول پیکسل مورد اصلاح در نظر گرفته می‌شود.

همه این روش‌ها منجر به ساده‌سازی داده‌های خام و بیرون کشیدن اطلاعات سطح بالا از آن می‌شود. با توجه به این‌که پیش‌بینی می‌شود از تشخیص لبه و ریخت‌شناسی استفاده شود، در ادامه به طور کامل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۴-۳-۳- تحلیل تصویر

گام سوم پردازش تصویر بیرون کشیدن اطلاعات سمبولیکی است که یک پدیده را به صورت کمی توصیف می‌کند، مثل تعداد، جهت، اندازه و هیستوگرام و یا مشخصات پیچیده‌ای چون ناحیه‌گراف‌ها و درخت را نشان می‌دهد. به طور کلی نوع نمایش انتخابی بستگی به سطح اطلاعات مورد نیاز برای تفسیر تصویر دارد. به عنوان مثال رباتی که داخل یک توقفگاه در حال حرکت است اطلاعاتی مشابه با دوربینی که برد مدار چاپی را مورد بررسی قرار می‌دهد تا خرابی آن را پیدا کند یکی نیست. مورد اول نقشه زمان واقعی توقفگاه و فهرستی از موانع را نیاز دارد ولی مورد دوم فقط باید پاسخ قبول و یا رد بدهد.

۴-۳-۴ - تعبیر تصویر

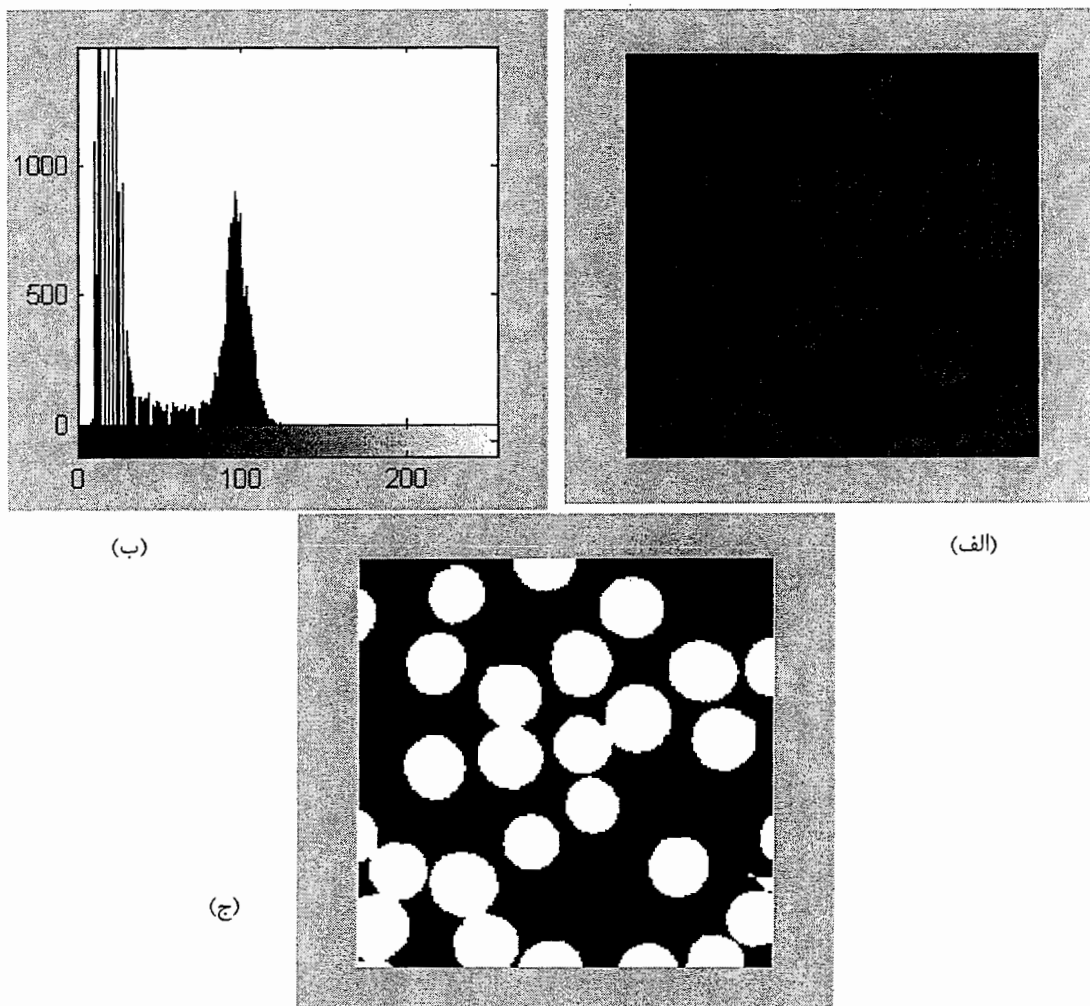
آخرین گام در پردازش تصویر تعبیر کردن تصویر است. به عنوان مثال در تصویر یک خیابان یا توقف‌گاه نشان دادن وضعیت ترافیکی و یا تعداد خودرو متوقف شده هدف از تعبیر تصویر است. بعضی وقت‌ها تعبیر تصویر نیاز به الگوریتم‌های پیچیده فازی و عصبی دارد.

۴-۴ - عملیات حد آستانه دودویی

نظر به اهمیت احتمالی عملیات حد آستانه دودوئیدر ادامه پروژه این روش را به تفصیل مورد بررسی قرار می‌دهیم. این عملیات تصویر سیاه و سفید را به پیکسل‌های مربوط به زمینه و شی تقسیم می‌کند. به همین دلیل آن را آستانه دودویی یا دو سطحی نامند. شکل (۳۶) که با خطوط برنامه زیر در محیط مطلب کاربردی از این روش را نشان می‌دهد:

```
I=imread('image2.bmp');
    imshow(I)
    figure, imhis(I)
    I2=im2bw(I2,60/255); imshow(I2)
```

خط اول تصویر را از فایل می‌خواند و خط دوم آن را ترسیم می‌کند. خط سوم هیستوگرام تصویر را محاسبه و رسم می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دره هیستوگرام سطح خاکستری ۶۰ است. لذا سطح دودویی نسبت ۶۰ به ۲۵۵ فرض و تصویر به صورت شی و زمینه تبدیل می‌شود. روش‌هایی که تصویر را به بیش از دو سطح برای تشخیص بیش از دوشی متفاوت در تصویر تقسیم می‌کنند را روش‌های آستانه‌گیری چند سطحی نامند. اگر تصویر بیش از دو شی قابل تشخیص داشته باشد، آن‌گاه نمودار هیستوگرام آن دارای همان تعداد قله است که نقاط حداقل محلی و یا دره‌ها به عنوان حدود آستانه انتخاب می‌شوند.



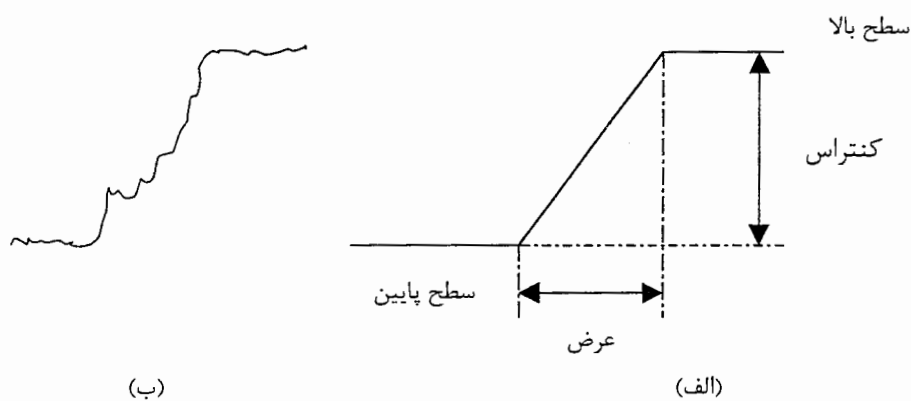
شکل (۳۶) عملیات حد آستانه دودویی (الف) تصویر مینا، (ب) هیستوگرام تصویر و (ج) تصویر دودویی شده

۵-۴- تشخیص لبه

با توجه به این که در محل ترک‌های آسفالت انتظار می‌رود که سطح خاکستری با طرفین آن متفاوت باشد، لذا به نظر می‌رسد که استفاده از الگوریتم‌های تشخیص لبه بتواند در شناسایی آن‌ها بکار رود. به همین منظور لبه را تعریف نموده راه‌های تشخیص آن‌را مورد بحث قرار می‌دهیم.

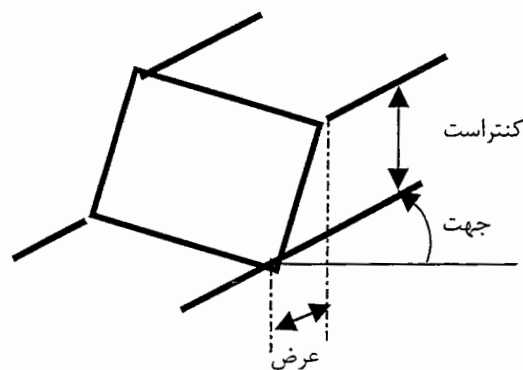
۴-۵-۱- لبه تصویر

لبه در یک سیگنال به عنوان تغییر در شدت و یا دامنه آن تعریف می‌شود که به عنوان گسستگی نیز شناخته می‌شود. در عمل لبه یک بعدی به صورت پله‌ای از شدت کم به شدت زیاد تعریف می‌شود. اما چون در واقعیت سیگنال مخلوط با نویز است لذا لبه را به صورت تغییر از متوسط کم به متوسط بالاتر تعریف می‌کنیم (شکل ۳۷).



شکل (۳۷) نمایش لبه الف) ایده‌آل و ب) واقعی

همان‌گونه که در شکل (۳۷) آمده است عرض سیگنال شیب تغییرات و اختلاف بین سطح پایین و بالا به عنوان کنتراست را نشان می‌دهد. این گسستگی در دو بعد در راستای خطوط خاصی اتفاق می‌افتد که به جهت‌یابی شناخته می‌شود. شکل (۳۸) نمونه ایده‌آل گسستگی دو بعدی را نشان می‌دهد. مشابه با حالت یک بعدی شیب تغییرات، سطح پایین و بالایی وجود دارد. بعلاوه در این حالت جهت نیز اضافه شده است.



شکل (۳۸) لبه دو بعدی

تذکر این نکته ضروری است که این مدل یکتا نیست و مدل‌های دیگری نیز برای نمایش لبه مثل لبه بافت‌ها نیز ارائه شده است. برای تعیین لبه از گرادیان و لاپلاسیان به ترتیب برای تعیین لبه یک بعدی و دوبعدی استفاده می‌شود.

۴-۵-۲- گرادیان

در حالت پیوسته گرادیان تصویر $I(x, y)$ در راستای دو محور قائم با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$G_x(x, y) = \partial I(x, y) / \partial x \quad G_y(x, y) = \partial I(x, y) / \partial y$$

این عمل‌گر در حالت گسسته با روابط تفاضلی زیر در راستای افقی و قائم تعریف می‌شوند:

$$\Delta_1(i, j) = I(i, j+1) - I(i, j) \quad \Delta_2(i, j) = I(i+1, j) - I(i, j)$$

همچنین روابط

$$\Delta_3(i, j) = I(i+1, j+1) - I(i, j) \quad \Delta_4(i, j) = I(i+1, j-1) - I(i, j)$$

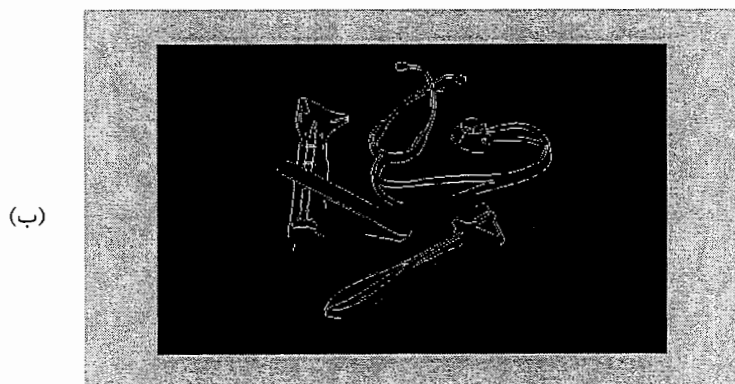
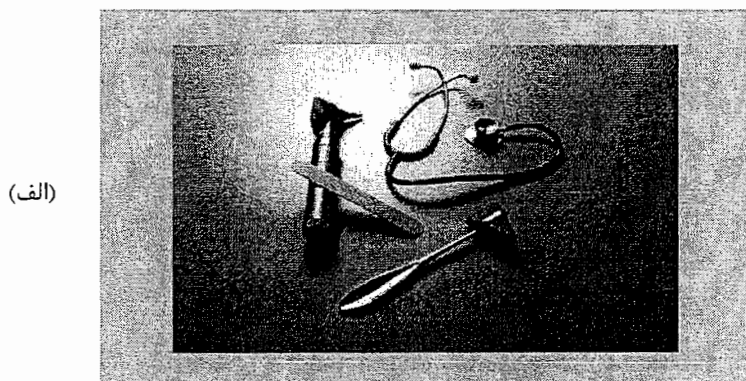
گرادیان در راستای دو قطر را نشان می‌دهند.

این عمل‌گرها را می‌توان با استفاده از کرنل‌های زیر که با تصویر کانولوشن می‌شوند به ترتیب در راستای (۰،۹۰) و (۱۳۵،۴۵) بدست آورد.

$$\begin{array}{cccc} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ 0^\circ & 90^\circ & 45^\circ & 135^\circ \end{array}$$

عمل‌گرهای مشتق صافی فرکانس بالا به حساب می‌آیند. این بدان معنی است که جزئیات تصویر مورد تاکید قرار می‌گیرند. یکی از نگرانی‌ها در استفاده از این نوع صافی حساسیت بالای آن‌ها به نویز در استفاده آن‌ها برای تشخیص لبه در تصاویر دارای نسوج و دانه‌ایاست. در مواردی که به تصویر اعمال می‌شوند، ضمن نمایش لبه‌ها (تغییرات درخشندگی) حاوی نویز ناشی از نسوج و دانه‌هاست. برای غلبه بر این نویز از

کرنل‌های بزرگتر برای تقریب عمل‌گرهای مشتق استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این نوع کرنل‌ها ماسک‌هایی 3×3 است که به پری‌ویت یا سابل معروف بوده و در ادامه نمایش یافته‌اند.



شکل (۳۹) نمایش نتیجه استفاده از کرنل سابل (الف) تصویر لوازم و (ب) لبه تصویر

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{پری‌ویت}$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{سابل}$$

شکل (۳۹) نمونه‌ای از نمایش لبه را با استفاده از کرنل سابل نشان می‌دهد.

۴-۵-۳- لاپلاسیان

برای تابع دو بعدی $I(x, y)$ عمل گر لاپلاسیان را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\nabla^2(x, y) = \partial^2 I(x, y) / \partial x^2 + \partial^2 I(x, y) / \partial y^2$$

گسسته این تابع با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$L(i, j) = I(i-1, j) + I(i+1, j) + I(i, j-1) + I(i, j+1) - 4I(i, j)$$

کرنل زیر برای پیاده‌سازی این رابطه به کار می‌رود:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

چون لاپلاسیان مشتق مرتبه دو است، به مراتب از گرادیان به نوبت حساس‌تر است. ضمن این که اطلاعاتی از جهت را نشان نمی‌دهد.

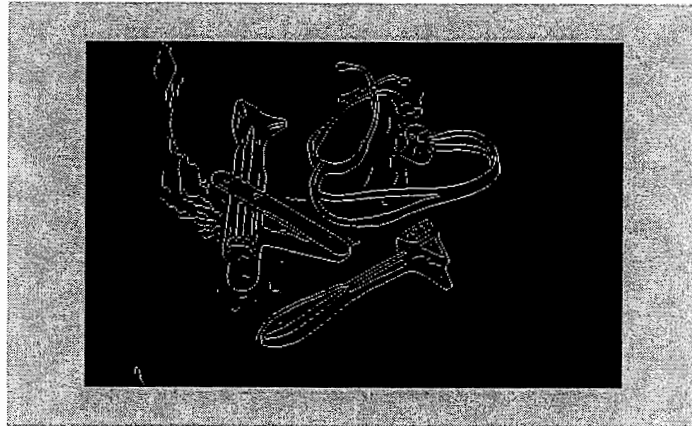
۴-۵-۴- فیلترهای کانی - دریشه

تابع دو بعدی این فیلتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h(x, y) = (1 + \alpha|x|)e^{-\alpha|x|} \times (1 + \alpha|y|)e^{-\alpha|y|}$$

با این فیلتر عمل هموار کردن و مشتق‌گیری بطور هم‌زمان صورت می‌گیرد. تصویر (۳۹- الف) با این فیلتر به

شکل (۴۰) تبدیل می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود لبه‌ها بهتر نمایش یافته‌اند.



شکل (۴۰) نمایش نتیجه استفاده از کرنل کانی - درپشله

۴-۶- عملیات ریخت‌شناسی

عملیات ریخت‌شناسی بر مبنای استفاده از عمل‌گرهای مجموعه‌ها مثل اجتماع، اشتراک، متمم و ... تصویر را به تصویر جدیدی تبدیل می‌کند. نتیجه این نوع عملیات تصویر جدیدی است که هر پیکسل بر اساس پیکسل‌های همسایه تعیین می‌شود. با تعیین اندازه و شکل همسایگی عملیات حساس به اشکال خاصی در تصویر ورودی می‌شود. اکنون عمل‌گرهای مهم این گروه را مورد بحث قرار می‌دهیم.

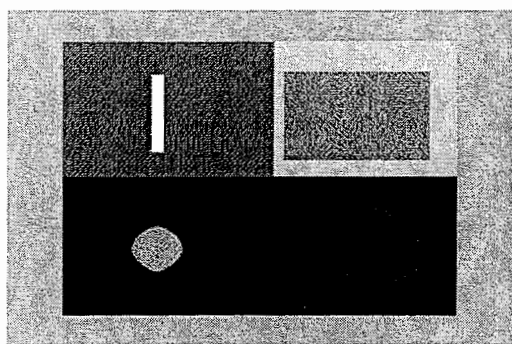
۴-۶-۱- عملیات اتساع و فرسایش

این دو عمل‌گر اساسی از ریخت‌شناسی مرز نواحی اشیا را در تصویر گسترش و یا کاهش می‌دهد. این عمل با افزودن و یا کاستن پیکسل به مرز اشیا صورت می‌گیرد. در عملیات اتساع حداکثر مقدار یک پیکسل در همسایگی تعیین شده به همه نسبت داده می‌شود و در عملیات فرسایش این عمل برای حداقل صورت می‌گیرد. در عملیات اتساع پیکسل پشت مرز حداقل و در عملیات فرسایش حداکثر می‌شود. حداقل و حداکثر در تصویر دودویی به ترتیب صفر و یک است. خطوط برنامه زیر این عملیات را نشان می‌دهند. خط اول تعریف یک مستطیل به عرض ۵ و طول ۱۵ پیکسل است. در عملیات فوق باید مرز طبق توابعی که تعریف می‌شوند از قبل تعیین شوند. از این توابع خط با طول دلخواه و زوایای قابل تعریف توسط کاربر

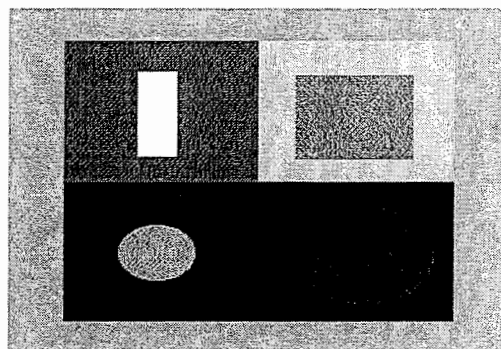
می‌باشد. چون بحث اصلی در ارتباط با تعیین ترک‌های آسفالت می‌باشد ممکن است توابعی چون خط و یا مستطیل از توابع دیگر بیشتر به کار آید.

```
se = strel('rectangle',[5 15]);
) BW =imerode(s,se);imshow(BW)
)BW =imdilate(s,se);imshow(BW)
```

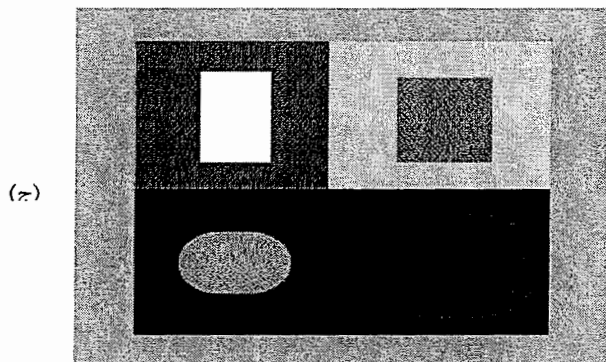
همان‌گونه که در شکل (۴۱) نمایش یافته است، شکل (۴۱-الف) شکل مینا می‌باشد که دارای اشیا مربع، مستطیل و دایره شکل می‌باشد. با استفاده از مستطیل ۵ در ۱۵ پیکسل عملیات فرسایش سبب کوچک شدن اشیا مستطیل شکل در تصویر تبدیل یافته شده است (شکل ۴۱-ب). با همان مرز مستطیلی عملیات اتساع شکل (۴۱-ج) را نتیجه داده است که سبب بزرگتر شده مرز گردیده است. تغییر اشکال دایروی با توجه به انتخاب مرز مستطیلی قابل توجه است. این بدان معنی است که تعیین نوع مرز در جداسازی اشیا موجود در یک تصویر نکته کلیدی است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۴۱) نمایش نتیجه استفاده از فرسایش و اتساع (الف) تصویر اصلی (ب) فرسایش و (ج) اتساع

۴-۶-۲- عملیات اسکلت‌بندی

برای بدست آوردن نمایش ساده‌ای از اشیا موجود در یک تصویر با حفظ ساختار هندسی آن از عملیات اسکلت‌بندی استفاده می‌شود. دو عملیاتی که به نظر می‌رسد دارای اهمیت برای این طرح می‌باشد در ادامه توضیح داده می‌شود. اولین عمل‌گر تبدیل اشیا به خط است. خط برنامه زیر در محیط MatLab این کار را انجام می‌دهد.

$$BW = \text{bwmorph}(im, 'skel', Inf);$$

Inf تعداد دفعات عملیات را برابر بی‌نهایت قرار می‌دهد. این پارامتر به مقادیر دیگر قابل تغییر است. شکل (۴۲) - (ب) نمونه‌ای از کاربرد این عمل‌گر را نشان می‌دهد. دومین عملیات مورد توجه تعیین پیرامون اشیا است. این عملیات با دستور زیر در محیط MatLab اجرا می‌شود و نمونه خروجی آن در شکل (۴۲) - (ج) آمده

است. $BW2 = \text{bwperim}(im);$



(ب)

(الف)



(ج)

شکل (۴۲) نمایش نتیجه استفاده از اسکلت‌بندی (الف) تصویر اصلی (ب) خط و (ج) پیرامون

۵- شبکه عصبی مصنوعی و تشخیص الگو

۵-۱ مقدمه

مغز آدمی که ابزار ارتباط او با روح او برای انجام ادراکاتی است که نقطه تمایز او با حیوانات می‌باشد. مغز انسان سیستم پردازش اطلاعات با ساختاری موازی است که از ۱۰۰ تریلیون 10^{11} جزء به نام نرون تشکیل شده است که این نرون‌ها با 10^{16} ارتباط به هم مربوط شده‌اند. اجتماعی از نرون‌ها بافت‌های عصبی را که محمل پیام‌ها و اطلاعات هستند، از یک قسمت بدن به قسمت دیگر منتقل می‌کنند. نرون‌ها در مغز، نخاع و سیستم‌های عصبی جانبی تمرکز دارند. همه نرون‌ها کارکرد یکسانی دارند اما اندازه و شکل آن‌ها به محلی که استقرار یافته‌اند بستگی دارد.

سه قسمت اساسی نرون‌ها بدنه سلول، دندریت و اکسون است. دندریت و اکسون عناصر ارتباطی نرون هستند. پیام‌های عصبی به طور یکطرفه از دندریت به بدنه سلول و سپس به اکسون می‌رسد. در نقطه تحریک برای یک لحظه داخل سلول دارای بار مثبت و خارج آن منفی می‌شود، این تغییر ناگهانی که پتانسیل تحریک نامیده می‌شود در طول اکسون حرکت میکند. در طول زندگی بشر تجربیات سبب تقویت و یا تضعیف اتصالات سیناپسی می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای پیچیدگی مغز نیستند، اما در هر دو شبکه زیستی و مصنوعی اجزا اصلی تشکیل دهنده ابزارهای محاسباتی خیلی ساده هستند و در شبکه مصنوعی ساده‌تر نیز می‌باشند. در هر دو شبکه ارتباط بین نرون‌ها عمل کرد شبکه را توصیف می‌کنند.

نرون‌های زیستی حدود یک میلیون بار کندتر از نرون‌های شبکه عصبی مصنوعی ساخته شده با مدارهای الکترونیکی است. اما به دلیل موازی کار کردن نرون‌های زیستی سرعت آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای از رایانه بیشتر است.

۵-۲- ساختار شبکه عصبی

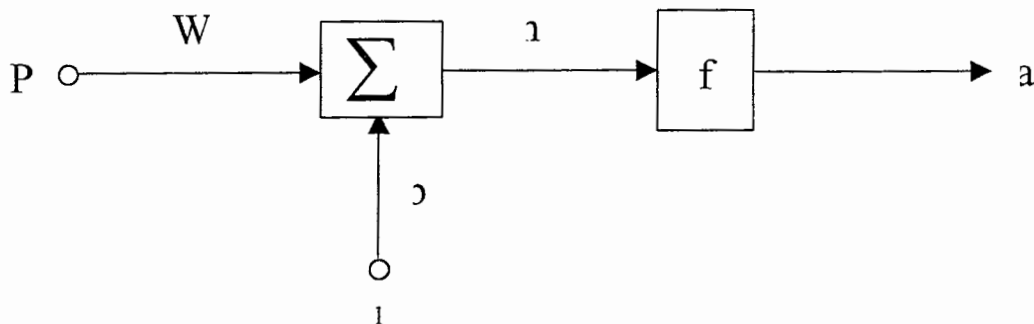
در این بخش ضمن معرفی مدل نرون مصنوعی اجزا ساختاری شبکه عصبی را مورد بحث قرار می‌دهیم.

۵-۲-۱- مدل نرون

کوچکترین واحد پردازشگر در شبکه عصبی نرون است که به صورت تک ورودی و یا چند ورودی مدل می‌شود. شکل (۴۳) مدل تک ورودی نرون را نشان می‌دهد. اعداد p و a به ترتیب ورودی و خروجی نرون می‌باشند. عدد w نشان دهنده تاثیر ورودی بر خروجی است. ورودی ثابت یک در بایاس b ضرب شده و ورودی خالص n را تشکیل می‌دهد. تابع انتقال یا تابع محرک ورودی به خروجی f با معادله زیر داده می‌شود.

$$a = f(wp + b)$$

در مقایسه با نرون زیستی w شدت سیناپس، جمع کننده و تابع محرک f معادل با هسته سلول و a همان سیگنال گذرنده از اکسون است. جمله بایاس b مشابه w یک وزنه است که هر دو پارامترهای قابل تنظیمی هستند که با تغییر آنها در ضمن آموزش شبکه کاری می‌کنیم که رابطه ورودی و خروجی با هدف مورد نظر تطابق داشته باشد.



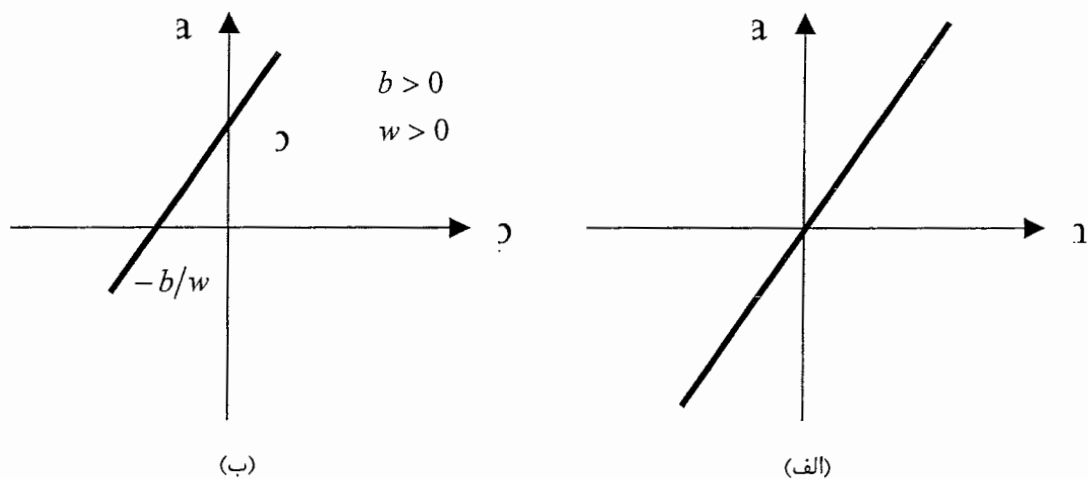
شکل (۴۳) مدل ریاضی نرون تک ورودی

تابع f که خطی یا غیرخطی است، بر اساس نوع مسئله‌ای که قرار است توسط شبکه حل شود توسط طراح شبکه انتخاب می‌گردد. در ادامه تعدادی از این توابع را مورد بحث قرار می‌گیرد.

– **تابع محرک خطی:** این تابع که با رابطه زیر تعریف می‌شود دارای خروجی برابر ورودی است.

$$a = f(n) = n$$

شکل (۴۴) این تابع را نشان می‌دهد. در شکل (۴۴ - الف) ارتباط ورودی و خروجی تابع که خطی است نشان داده می‌شود. شکل (۴۴ - ب) ارتباط بین ورودی و خروجی نرون را نشان می‌دهد. در این شکل جمله بایاس b و دلیل این نام‌گذاری نیز نشان داده شده است.



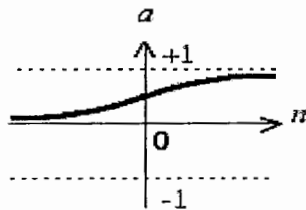
شکل (۴۴) تابع خطی (الف) ارتباط ورودی و خروجی تابع محرک (ب) ارتباط ورودی و خروجی نرون

توابع دیگری چون خطی مثبت، خطی متقارن آستانه‌ای، خطی آستانه‌ای، آستانه‌ای دو مقداری و آستانه‌ای دومقداره متقارن تعریف می‌شود که علاقه‌مندان به منابع اعلام شده ارجاع داده می‌شوند.

– **تابع محرک غیرخطی:** دو نمونه تابع محرک غیرخطی در شکل (۴۵) آمده است. روابط توصیف کننده آن‌ها در ادامه آمده است. این دو تابع معروف به تانژانت هایپربولیک و زیگموئید هستند.

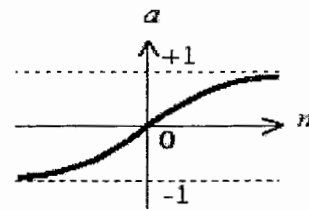
$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$$

$$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$$



$$a = \text{logsig}(n)$$

(ب)



$$a = \text{tansig}(n)$$

(الف)

شکل (۴۵) توابع محرک غیرخطی الف) تانژانت هایپربولیک ب) زیگموئید

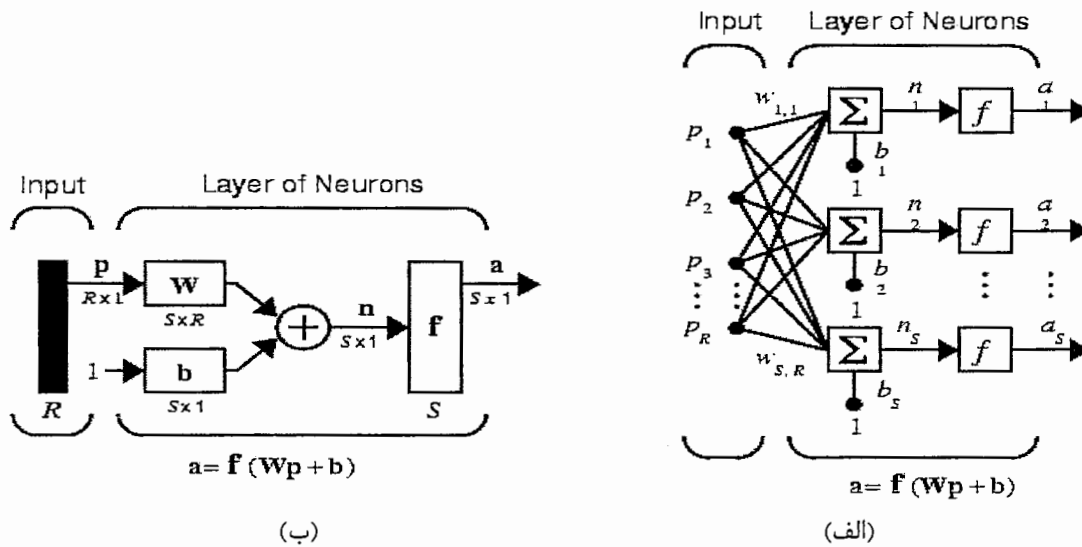
توابع غیرخطی دیگری وجود دارند که در مراجع انتهائی قابل مشاهده هستند.

۵-۲-۱- شبکه تک لایه

با کنار هم قراردادن نرون‌ها در یک ردیف شبکه تک لایه بدست می‌آید. همان‌گونه که در شکل (۴۶) آمده است، در این شبکه تعداد R گره ورودی، S نرون و به همین تعداد گره خروجی وجود دارد. هیچ دلیلی ندارد که $R = S$ باشد. یعنی تعداد ورودی‌های شبکه و تعداد نرون‌ها اغلب متفاوت هستند. ماتریس W که ماتریس وزنی و به صورت زیر است:

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \Lambda & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \Lambda & w_{2,R} \\ M & M & \Lambda & M \\ w_{S,1} & w_{S,1} & \Lambda & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

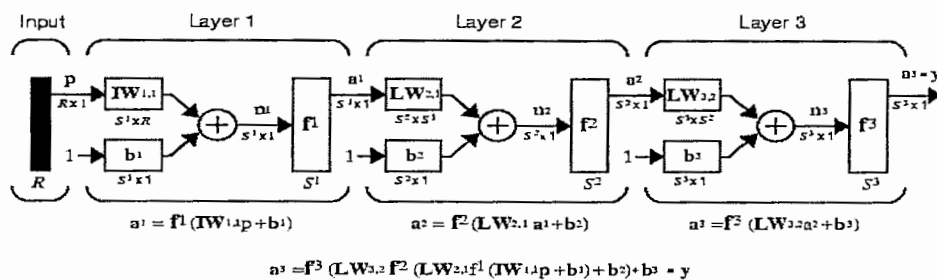
میزان تقویت سیگنال از ورودی‌های شبکه به نرون‌ها را مشخص می‌سازد. درایه $w_{i,j}$ وزنی را نشان می‌دهد که ورودی i ام در آن ضرب و به نرون j ام وارد می‌شود.



شکل (۴۴) الف) نمونه‌ای از شبکه عصبی تک لایه به تعداد R ورودی و S خروجی ب) نمایش خلاصه شده

۵-۲-۲- شبکه چند لایه

این امکان وجود دارد که شبکه‌های تک لایه پشت سرهم قرار گیرند. در این صورت ورودی یک لایه خروجی لایه قبل است. این شبکه‌ها را چند لایه گویند. به طور کلی لایه‌های شبکه به ورودی، پنهان و خروجی تقسیم می‌شوند. لایه(های) ورودی لایه‌ای است که داده‌ها از طریق آن وارد شبکه می‌شوند. در لایه(های) پنهانی داده‌ها پردازش و از طریق لایه خروجی نتایج حاصل از پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌ها خارج می‌شود. ماتریس وزنی ورودی به لایه اول با WI و ماتریس‌های وزنی بین لایه‌ها با WL نشان داده می‌شود. بنا به تجربیات عملی تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان در حدود تعداد مثال‌هایی انتخاب می‌شود که برای آموزش شبکه به کار می‌روند. هر قدر نرون‌های لایه ورودی بیشتر باشد عمل کرد شبکه بهتر است، اما محدودیت‌های سخت افزاری در موقع پیاده‌سازی و سرعت مورد نیاز در محاسبات نرم‌افزاری معیاری برای انتخاب تعداد نرون‌ها در لایه ورودی می‌باشد.



شکل (۴۷) نمونه‌ای از شبکه عصبی چند لایه خلاصه شده

در این پروژه به دلایلی که خواهد آمد، از شبکه عصبی دارای دو لایه پنهان استفاده می‌شود.

۵-۳- آموزش شبکه عصبی

مشابه با آموزش شبکه عصبی زیستی هر شبکه مصنوعی باید آموزش ببیند تا آمادگی حل مسائل را داشته باشد. عمل آموزش در شبکه عصبی مصنوعی به معنی تغییر مقادیر ماتریس (های) وزنی W و بایاس b است. روش‌های آموزش شبکه به طور کلی به سه دسته به شرح ادامه تقسیم می‌شوند.

- آموزش مدیریت شده: در این روش مثال‌هایی که برای آموزش در نظر گرفته شده‌اند در بردار ورودی p و خروجی مطلوب در بردار a قرار داده می‌شود. آموزش آن‌قدر ادامه می‌یابد تا برای هر ورودی خروجی شبکه منطبق بر خروجی مطلوب شود. روش آموزش مدیریت شده نیاز به معلم دارد. وظیفه معلم اصلاح خطاهای شبکه در فرآیند آموزش و یا تقویت یادگیری آن در مواردی است که پردازش را صحیح انجام می‌دهد.

- آموزش بدون مدیریت: در این روش شبکه خودش بدون حضور معلم آموزش می‌بیند. برای داده ورودی تلاش می‌کند که با مورد آزمایش قرار دادن آن خواصی شاخص از آن را استخراج و با حدس خروجی را تعیین نماید.

- آموزش تقویتی: این روش به آموزش تشویق و تنبیه معروف است که ترکیبی از دو روش فوق می‌باشد. داده‌های ورودی به شبکه اعمال و خروجی مشاهده می‌شود، اگر خروجی خوب به نظر برسد، آن‌گاه شبکه مورد تشویق قرار گرفته و وزن‌ها افزایش می‌یابد. در غیر این صورت شبکه با کاهش وزن‌ها تنبیه می‌شود. آموزش را برخط گویند، اگر فرآیند آموزش و عملیات هم‌زمان باشد. در غیر این صورت غیر برخط است. آموزش بدون مدیریت می‌تواند برخط و آموزش مدیریت شده از نوع دوم است.

۵-۴- یادگیری شبکه عصبی

یادگیری توانائی یک نرون تنها نیست، بلکه شامل همه نرون‌های شبکه و نتیجه فرآیند آموزش است. عملیاتی که در مغز برای یادگیری صورت می‌گیرد به طور دقیق مشخص نیست، اما قوانین ژنتیکی وجود دارند که کشف شده و به کار می‌روند.

یکی از قوانین مهم که پایه قوانین دیگر است، قانون یادگیری هب است. این قانون می‌گوید، سیناپس متصل کننده دو نرون i و j قدرت خود w_{ij} را افزایش می‌دهد، اگر این دو نرون بطور مکرر و هم‌زمان بوسیله محرک ورودی تحریک شوند. تغییر در وزن سیناپس با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta w_{ij} = c.a_i.a_j$$

قانون بعدی که مورد استفاده قرار می‌گیرد قانون فراموشی است. این در حالتی است که برای مثال سیگنال ورودی u_i از نرون‌های j ($j=1,2,\dots,n$) متصل به نرون i ام با مدل زیر محاسبه می‌شود.

$$u_i(i+1) = -d_i.u_i(t) + \sum_j o_j(t).w_{ji}.I_i(t+1)$$

در این فرمول u_i ورودی تجمعی (خالص) به نرون i ام، o_j سیگنال خروجی از نرون j ام متصل به i ام، t و $(t+1)$ فواصل زمانی گسسته، I_i سیگنال ورودی خارجی به نرون i ام و d_i ضریب میرا کننده است. این ضریب میرا کننده فرآیند فراموشی را نشان می‌دهد.

۵-۵- تشخیص الگوی ترک‌ها

برای دسته‌بندی ترک‌ها ساختار شبکه مورد استفاده دارای سه لایه از نوع پرسپترون است. تعداد لایه مخفی یک و نرون‌های مخفی با توجه به تعداد تصویرهائی که برای آموزش استفاده می‌شود برابر ۱۴۰ انتخاب شده است. با توجه به ابعاد تصویر ورودی که 63×93 پیکسل است، تعداد نرون‌های ورودی حدود ۵۰۰۰ است. برنامه طوری است که اگر واگرایی اتفاق افتد عملیات را متوقف و پیغام مناسبی را چاپ می‌کند. جزئیات کامل در مقاله پیوست که در کنفرانس بین‌المللی پرتغال ارائه شده، قابل مشاهده است.

۶- مراحل بعدی تحقیق

پروژه حاضر را می‌توان به عنوان نخستین گام در طراحی و ساخت یک سیستم خودکار و هوشمند برای ارزیابی کیفیت روسازی راه تلقی نمود. در این طرح بخش عمده‌ای از خرابیهای روسازی یعنی انواع ترکهای سطح آسفالت مورد بررسی قرار گرفتند و برای شناسایی و طبقه‌بندی آنها چهار روش مختلف ارائه گردید. فعالیتهای بعدی می‌تواند بر همین موضوع متمرکز باشد و در جهت افزایش دقت روشها و بالا بردن سرعت پردازش سیستم ادامه یابد و یا سایر زمینه‌های مرتبط با این موضوع را شامل شود. هر یک از گزینه‌های زیر معرف زمینه مناسبی برای ادامه این تحقیق است و نگارندگان امیدوارند در آینده بتوانند آنها را به انجام رسانند. مسلماً هرگونه پیشنهاد، راهنمایی و همکاری از طرف سایر افراد و موسسات کمک بزرگی بوده و مزید امتنان خواهد بود.

- محاسبه ضخامت ترکها: از آنجا که تعیین شدت ترکها بر اساس ضخامت آنها انجام میگیرد، ضروری است که در اولین مرحله از ادامه تحقیق اقدام به بررسی نحوه محاسبه ضخامت ترکها نمود. کمترین کاری که در این زمینه می‌توان انجام داد تفکیک ترکها به سه گروه شامل ترکهای با عرض کمتر از ۱ میلی‌متر، ترکهای با عرض ۱ تا ۳ میلی‌متر و ترکهای با عرض بیشتر از ۳ میلی‌متر است. در ادامه می‌توان با تثبیت موقعیت دوربین و زاویه دید آن نسبت به سطح راه نتایج حاصل از آنالیز تصاویر را کالیبره نمود و طول ترک را در هر تصویر و ضخامت آنها را تعیین نمود.

- ترکیب تصاویر همزمان حاصل از چند دوربین: با توجه به اینکه عرض هر خط عبور در سواره‌روی راههای اصلی $3/6$ متر است می‌توان بطور همزمان از سه دوربین استفاده کرد بطوریکه هر یک از آنها منطقه‌ای به ابعاد $1/2 * 1/2$ متر را تصویر برداری نماید. سپس در روشهای آنالیز تصویر با در نظر گرفتن نوع و موقعیت ترک در سطح راه در سه تصویر مربوط به یک مقطع، آن را بررسی نمود. مثلاً یک ترک طولی در حاشیه

کناری راه، ترک برشی با شدت متوسط محسوب می‌شود و اگر در داخل یک خط سواره‌رو قرار داشته باشد احتمالاً ترک موزائیکی با شدت کم بوده و اگر در بین دو خط سواره‌رو باشد احتمالاً یک درز اجرایی است.

- استفاده از سیستمهای لیزری برای تعیین عمق ترک: چنانچه از سیستمهای لیزری استفاده شود علاوه بر تعیین دقیق ضخامت ترکها می‌توان عمق آنها را نیز محاسبه نمود. در این صورت علاوه بر ترکهای سطح راه می‌توان تعداد، ابعاد و عمق چاله‌های روی آسفالت را نیز مورد بررسی قرار داد. بدیهی است روش مرمت ترک به عمق ۵ میلیمتر با روش مرمت ترک به عمق ۵ سانتیمتر کاملاً متفاوت است و از این لحاظ تعیین عمق ترکهای آسفالت ضروری بنظر می‌رسد.

- تهیه نقشه از ترکهای سطح راه در طول مسیر: اگر تصاویر متعددی که بطور متوالی تهیه شده‌اند، پردازش شده و نتایج آنها بر روی نقشه راهها یا یک شبکه بزرگ راه نمایش داده شود، می‌توان یک نقشه از ترکهای سطح آسفالت در طول مسیر ارائه داد. برای این منظور پیشنهاد می‌شود که تصاویر با اطلاعات حاصل از یک دستگاه GPS کد گذاری شود و سپس نتایج حاصل از پردازش تصاویر بر اساس کد آنها مرتب شده و به صورت متوالی نمایش داده شود.

- طراحی سیستم متحرک بر اساس پردازش فیلم: مجموعه موارد فوق در صورتی کامل خواهد شد که بتواند فیلم تهیه شده از سطح آسفالت را مورد پردازش و تجزیه و تحلیل قرار دهد، بطوریکه دوربین فیلمبرداری روی یک اتومبیل نصب شده و با سرعت متوسط جریان ترافیک (۷۰ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت) در طول مسیر حرکت کرده و از سطح آسفالت فیلمبرداری نماید. البته برای این منظور باید هر یک از آیتمهایی که در بالا ذکر شد ابتدا بر روی تصاویر تکی مورد آزمایش قرار گرفته و سپس از حاصل مجموعه آنها یک سیستم متحرک ارزیابی روسازی راه طراحی و اجرا شود.

۷- تقدیر و تشکر

تامین کلیه امکانات مورد نیاز این طرح و حمایت مالی از پروژه توسط معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است که نگارندگان بدینوسیله مراتب تقدیر و امتنان خود را ابراز می‌دارند.

۸- منابع و مراجع

- 1) Asphalt Institute Report (2004) *Automated Management of Pavement Inspection Systems*.
- 2) R.E.Bellman, L.A.Zadeh (1970) *Decision Making in a Fuzzy Environment*. Management Science, pp:4-17.
- 3) C.J.Chao, F.P.Cheng (1998) *Fuzzy Pattern Recognition Model for Diagnosing Cracks in RC Structures*. Journal of Computing in Civil Eng. Vol:12 , No:2, pp:111-119.
- 4) H.D.Cheng, et.al. (1999) *Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory*. Journal of Computing in Civil Eng. Vol:13, No:4, pp:270-280
- 5) CSIRO Report (2002) *Automated Detection of Road Pavement Cracks*.
- 6) COST-325 (1996) *New Pavement Monitoring Equipment and Methods*.
- 7) W.Gowan (1996) *Optical Character Recognition Using Fuzzy Logic*. Motorola Application note.
- 8) Y.H.Huang (1993) *Pavement Analysis and Design*. PrenticeHall Publication.
- 9) R.Haas, W.R.Hudson, J.Zaneiewski (1994) *Modern Pavement Management*. Krieger Publication.
- 10) A.C.Heath, et.al. (2003) *Modeling Longitudinal, Corner and Transvers Cracking in Jointed Concrete Pavements*. The International Journal of Pavement Eng. Vol:4, No:1, pp:51-58.
- 11) A.K.Jain (1989) *Fundamentals of Digital Image Processing*. PrenticeHall Pub.
- 12) A.Jada, T.Hamieh (2001) *Removal by Surfactant of Asphalt Adsorbed onto Clays*. IEEE01, Vol: 1, pp:154-158.
- 13) D.Kaur, D.Tekedil (2000) *Fuzzy Expert System for Asphalt Pavement Performance Prediction*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceeding. Pp:428-433.
- 14) D.Kaur, E.Chao (1999) *Applying Neuro-Fuzzy Techniques for Intelligent Highway Pavement Performance Prediction Model*. IEEE, Vol:5, pp:922-924.
- 15) N. K. Kasabov (1998) *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*. MIT Press, Second Printing.
- 16) J.J.Lu (2002) *Development of an Automatic Detection System for Measuring Pavement Crack Depth on Florida Roadways*. University of South Florida. Project Report: BB-884.

- 17) B.J.Lee, H.D.Lee (2002) *A Robust Position Invariant Artificial Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis*. TRB Annual Meeting.
- 18) Y. Liu, et.al. (2001) *Inspection of Defects in Optical Fibers Based on Back Propagation Neural networks*. Elsevier Journal of Optics Communications, Vol: 198.
- 19) I.Nedeljkovic (2002) *Image Classification Based on Fuzzy Logic*. The International Archives of the Photogrametry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol: 34, Part: XXX.
- 20) A.Oloufa, H.Mahgoub (2003) *GPS-Aided Asphalt Condition Rating Using Infrared Thermograph*. University of Central Florida. Project Report No:43.
- 21) P.Offrell, et.al. (2002) *Crack Geometry Analysis in Asphalt Samples Obtained from a Heave Vehicle Simulator Test Site*. ISAP 9th International Conference on Asphalt Pavement. Copenhagen.
- 22) P.Offrell, R.Magnusson (2002) *Computerised Tomography as a Tool for Crack Analysis in Asphalt Layers*. International Journal of Materials and Pavement Design. Vol: 3, No: 1, pp: 49-72
- 23) P.Offrell (2003) *Methods for Measurment and Analysis of Cracks in Flexible Pavement*. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology(KTH), sweden.
- 24) P.Offrell (2000) *Crack Geometry Analysis in Asphalt Cores Using Computerised Tomography*. Summary of Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), sweden.
- 25) B.Ravi, M.Ang (2000) *Fuzzy Logic Based Character Recognizer*. PCSC Proceeding. pp:69-74.
- 26) R.Robinson, U.Danielson, M.Snaith (1998) *Road Maintenance System : Concept and System*. Macmilan Publication.
- 27) R.Ranawana, V.Palade (2003) *An Efficient Fuzzy Method for Handwritten Character Recognition*. IEEE.
- 28) L.Sjogren, P.Offrell (2001) *Automated Crack Measuermant in Sweden*. LTPP Report.
- 29) SHRP-338 (1999) *Road Distress Identification*.
- 30) K.Sarabandi, E.Li (2000) *Polamrimetric Characterization of Debris and Faults in the Highway Environment at Millimeter-Wave Friquencies*. IEEE Transaction on Antennes and Propagtion, Vol: 48 , No:11 , pp: 1756-1768.
- 31) C.Scheffy, E.Diaz (1999) *Aspahlt Concrete Fatigue Crack Monitiring and Analysis Using Digital Image Analysis Techniques*. University of California at Berkeley, Pavement Research Center, Report:CS4-2.
- 32) T.Tomikava (1999) *A Study of Road Crac Detection by the Meta-Genetic Algorithm*. IEEE99, Vol: 1 , pp:543-548.
- 33) TRB Report:E-CO12 (1999) *Use of Artificial Neural Networks in Geomechanical and Pavement Systems*.
- 34) WDM Report (2003) *Road Assessment Vehicle*.
- 35) K.Wang, R.Elliott (1999) *Investrigation of Image Archiving for Pavement Surface Distress Survey*. University of Arkansaas at Fayetteville, Research Project Report.
- 36) Yoder (1975) *Principles of Pavement Design*.
- 37) J.Ze, et.al. (1997) *Content-Based Image Indexing and Searching Using Daubechies Wavelets*. International Journal of Digital Libraries, pp:311-328.

پیوست الف

مقالات حاصل از طرح

الگوریتم فازی برای طبقه بندی تصاویر پردازش شده ترکهای سطح راه

مهندس حسین قاسم‌زاده پهرانی
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه صنعتی شاهرود
h_ghasemzadch@shahrood.ac.ir

دکتر حیدر طوسی‌ان شاندیز
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق
دانشگاه صنعتی شاهرود
Hshandiz@shahrood.ac.ir

چکیده: ترکهای سطح آسفالت یکی از مهمترین و شایعترین انواع خرابیها در روسازی راه می‌باشد و علی‌رغم اهمیت زیادی که دارند شناسایی و طبقه‌بندی آنها با روشهای دستی به دلیل زمان و هزینه زیادی که لازم دارد و نتایج غیر یکسان آن در یک شبکه بزرگ راه عملی و امکان‌پذیر نیست. لذا استفاده از روشهای خودکار و هوشمند برای شناسایی ترکها، تعیین موقعیت آنها در شبکه راه و تعیین شدت و مساحت ترک خوردگی بطور روز افزون مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله برای طبقه‌بندی ترکهای سطح آسفالت که تصاویر آنها قبلاً پردازش شده‌اند، یک الگوریتم جدید مبتنی بر تئوری فازی پیشنهاد شده است. همچنین چند نمونه از تصاویر ترک خوردگی‌های آسفالت نیز با استفاده از این الگوریتم طبقه‌بندی شده‌اند.

واژه های کلیدی: تئوری فازی، روسازی آسفالتی، شناسایی ترک، پردازش تصویر.

۱ - شرح مسئله

ترک خوردگی سطح آسفالت یکی از مهمترین و شایعترین انواع خرابیها در روسازی راه می‌باشد. بروز ترک در آسفالت به دلایل متعدد موجب افت باربری روسازی شده و عمر مفید راه را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین شناسایی مناطق ترک

خورده، طبقه‌بندی ترکها و تعیین شدت و مساحت آنها در سیستمهای مدیریت روسازی راه اهمیت خاصی پیدا می‌کند. برای این منظور، یک روش ساده و رایج برداشت مشخصات ترکها در طول راه توسط یک شخص ارزیاب است که صرفاً با بازرسی وضعیت روسازی بطور چشمی انجام می‌گیرد. در این روش قضاوت شخصی ارزیاب در نتایج بازرسی تأثیرگذار بوده و نتیجه بازدید یک مسیر توسط چند نفر لزوماً یکسان نخواهد بود. همچنین این روش بسیار پر هزینه، وقتگیر و البته خطرناک است و عملاً در یک شبکه گسترده راه قابل استفاده نمی‌باشد. با توجه به موارد مذکور از دهه ۱۹۹۰ در ایالات متحده امریکا و کانادا در قالب طرح تحقیقاتی SHRP و در کشورهای اروپایی در قالب طرح تحقیقاتی COST، روشهای خودکار و هوشمند برای شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح راه مورد توجه قرار گرفته است. نظر به اهمیت موضوع و با هدف توسعه روشهای غیرمخرب در ارزیابی روسازی راهها، طرح پژوهشی «شناسایی و طبقه‌بندی ترکهای سطح آسفالت با استفاده از پردازش تصویر» در دانشگاه صنعتی شاهرود به اجرا در آمده است. در این طرح ابتدا تصاویر دیجیتالی از سطح راه تهیه شده و سپس با استفاده از تکنیکهای پردازش تصویر، ترکهای موجود در سطح راه شناسایی می‌شوند. سپس اطلاعات مربوط

به ترکها تجزیه و تحلیل شده و سرانجام نوع ترک، شدت ترک و مساحت منطقه ترک خورده تعیین می‌گردد. در مقاله حاضر برای طبقه‌بندی ترکها، روشی مبتنی بر تئوری فازی پیشنهاد شده و سپس با استفاده از این روش چند نمونه از تصاویر بررسی شده و طبقه‌بندی ترکها انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است روش مورد بحث فقط برای طبقه‌بندی ترکها بکار می‌رود و موضوع تعیین شدت و مساحت ترکها را شامل نمی‌شود.

۲ - انواع ترکهای سطح آسفالت

ترکهایی که در سطح راه ظاهر می‌شوند با توجه به فرم هندسی و محل ترک خوردگی در گروههای زیر تقسیم می‌شوند.

الف) ترکهای طولی: این ترکها به موازات امتداد راه و در محل درزهای اجرایی در اطراف خطوط سفید وسط جاده دیده می‌شوند. شدت ترکهای طولی با توجه به عرض ترک، عمق ترک و پراکندگی ترکهای ریز در اطراف ترک اصلی در سه رده شدت کم، متوسط و زیاد تفکیک می‌شوند.

ب) ترکهای عرضی: این ترکها عمود بر امتداد راه و با فاصله‌های مشخصی از یکدیگر قرار داشته و به دلیل انقباض آسفالت در هوای خیلی سرد ایجاد می‌شود. شدت ترکهای عرضی با توجه به فاصله آنها از یکدیگر، عرض ترکها و پراکندگی ترکهای ریز در اطراف ترک اصلی بصورت شدت کم، متوسط و زیاد تعریف می‌شود.

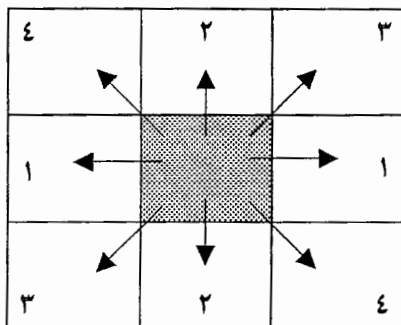
پ) ترکهای بلوکی: این ترکها به دلیل انقباض موضعی آسفالت و بصورت تعدادی خطوط تقریباً عمود بر هم در قسمتهای وسط یک خط سواره‌رو ایجاد می‌شود. شدت ترک بلوکی با توجه به شکل (۲ - الف) تعیین می‌گردد.

ت) ترکهای برشی: این ترکها به دلیل اشباع شدن مصالح سنگدانه‌ای در کناره‌های شانه راه و کاهش مقاومت برشی آنها در فاصله‌ای حدود ۳۰ Cm از لبه راه بچشم می‌خورند. شکل (۲ - ب) چگونگی اندازه‌گیری وسعت و تعیین شدت ترکهای برشی را نشان می‌دهد.

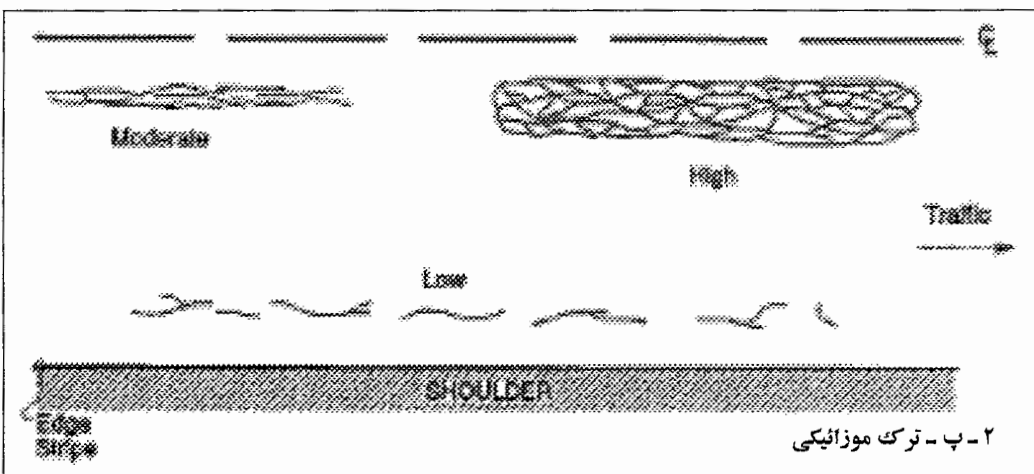
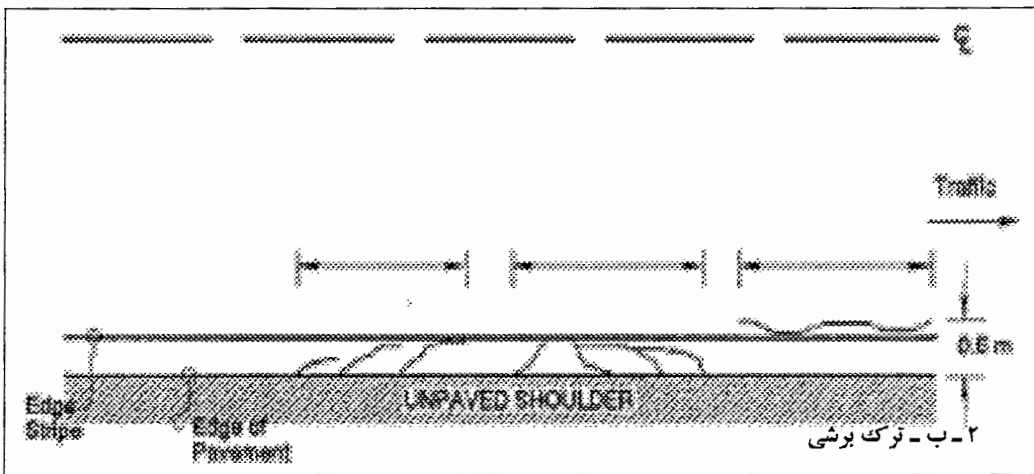
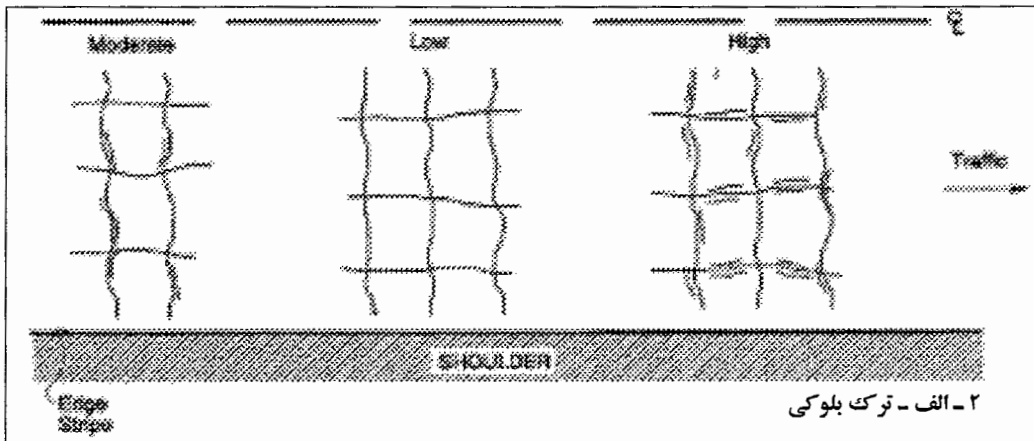
ث) ترکهای موزائیکی: این ترکها به دلیل خستگی در آسفالت، در مناطق پر تردد و در مسیر عبور چرخ وسایل نقلیه ظاهر می‌شوند. شکل (۲ - پ) نحوه اندازه‌گیری شدت ترکهای موزائیکی را نشان می‌دهد.

۳ - روش طبقه‌بندی ترکها

با توجه به جزئیات مندرج در بخش قبل ملاحظه می‌شود که نحوه گسترش هر یک از انواع ترکهای سطح راه از روند خاصی تبعیت می‌نماید. بدین ترتیب که ترکهای طولی تقریباً به موازات امتداد راه، ترکهای عرضی تقریباً عمود بر امتداد راه، ترکهای بلوکی در هر دو امتداد طولی و عرضی، ترکهای موزائیکی بصورت زاویه‌دار و تقریباً با زاویه ۴۵ درجه و ترکهای برشی تقریباً موازی با امتداد راه گسترش می‌یابند. با توجه به شکل (۱) می‌توان نحوه گسترش هر یک از پنج نوع ترک طولی، عرضی، بلوکی، موزائیکی و برشی را تعریف نمود. غالباً ترکهای طولی در جهت شماره ۲، ترکهای عرضی در جهت شماره ۱، ترکهای بلوکی در جهت ۱ و ۲، ترکهای موزائیکی در جهت ۳ و ۴ و ترکهای برشی در جهت ۲ امتداد می‌یابند. چون تعیین جهت گسترش ترکها با متغیرهای زبانی و بصورت غیر دقیق (کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد، زیاد) بیان می‌شود، بنظر می‌رسد که روشهای فازی عملکرد خوبی برای طبقه‌بندی انواع ترکها داشته باشند. برای این منظور ابتدا تصاویر ترکهای سطح راه تهیه شده و پس از پردازش، فرم هندسی ترکها بصورت یک ماتریس با المانهای صفر و یک نمایش داده می‌شود. المانهای مساوی یک وجود ترک را در آن نقطه نشان می‌دهند.



شکل (۱) نحوه گسترش ترکها در جهات اصلی

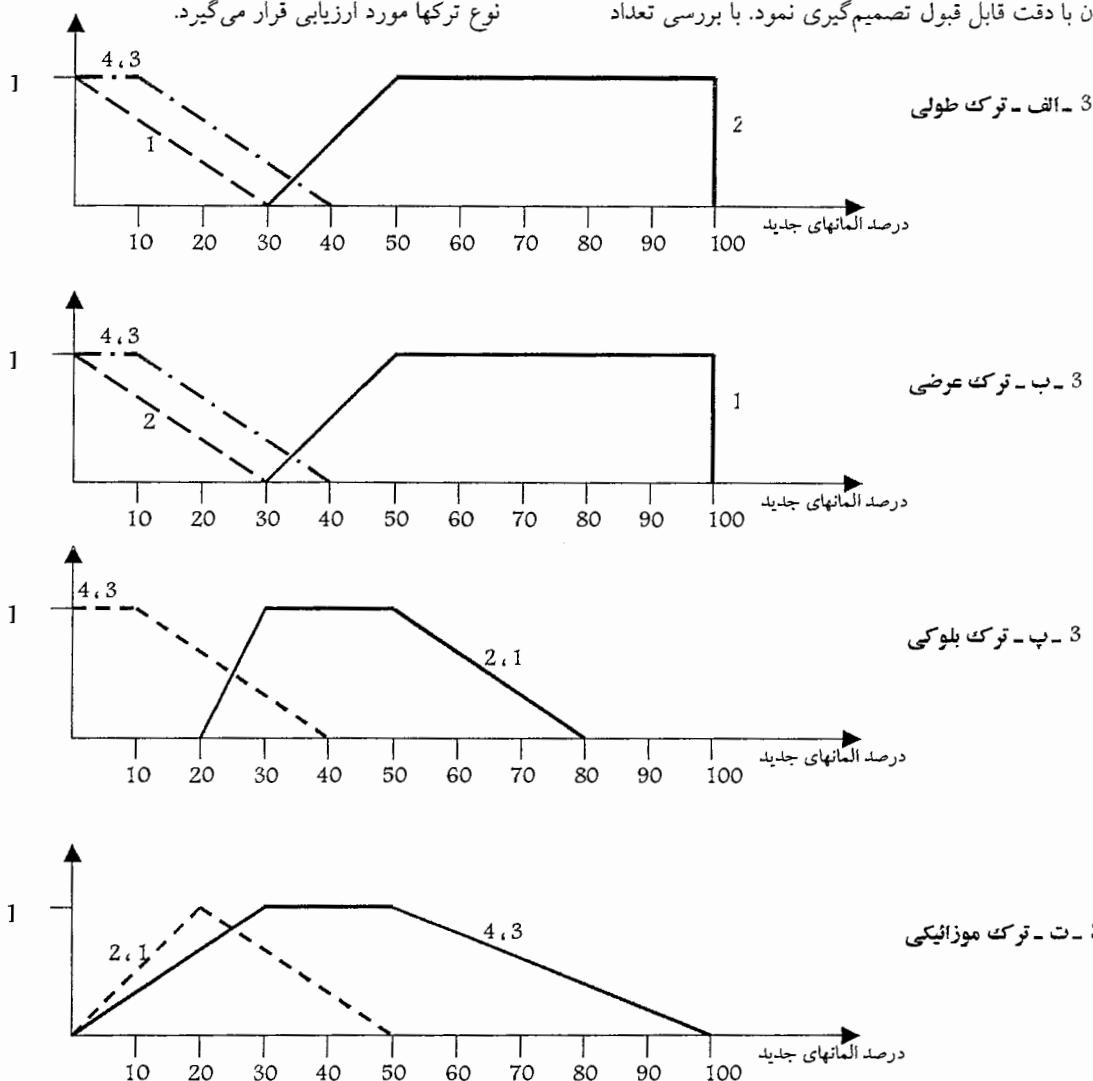


شکل (۲) تعیین شدت و موقعیت ترکها

زیادی از انواع مختلف ترکها ، درصد المانهای جدید در هر جهت برای هر یک از انواع ترک خوردگیها محاسبه گردیده و بر اساس آن توابع عضویت فازی مطابق شکل (۳) پیشنهاد شده است.

حال می توان با استفاده از روش اشتراک فازی ، درجه عضویت تصویر مورد نظر در هر گروه از ترکهای تعریف شده را محاسبه کرده و طبقه بندی ترک را انجام داد. مطابق متد بلمان و زاده (۱۹۷۰) اشتراک معیارهای چهار گانه بصورت کمترین درجه عضویت آنها تعریف می شود. در ادامه طی چند مطالعه موردی روش فوق تشریح شده و دقت آن در تعیین نوع ترکها مورد ارزیابی قرار می گیرد.

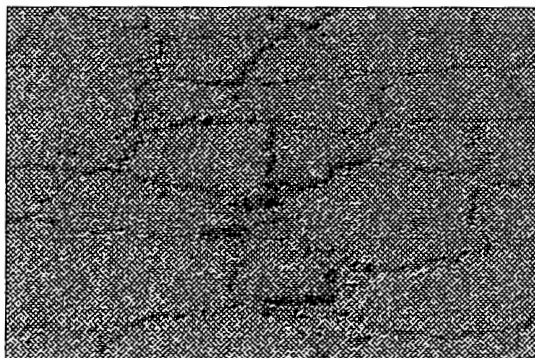
به منظور بررسی نحوه گسترش ترکها ، ابتدا المانهای مساوی یک از سمت چپ تصویر انتخاب شده و تعداد المانهای مجاور آن که مقدار آنها یک باشد در هر یک از جهات چهارگانه مذکور شمارش می گردد. در انتها مجموع تعداد المانهای جدید در هر یک از چهار جهت مورد نظر و همچنین درصد المانهای جدید در هر جهت برای کل تصویر قابل محاسبه است. در هر تصویر ، درصد المانهای جدید هر جهت می تواند به عنوان معیاری برای طبقه بندی ترکها تعریف شود. بدین ترتیب به منظور تعیین نوع ترک خوردگی چهار معیار مختلف در دسترس می باشد و با آنالیز مجموع آنها میتوان با دقت قابل قبول تصمیم گیری نمود. با بررسی تعداد



شکل (۳) توابع عضویت معیارهای چهارگانه در هر گروه ترک خوردگی

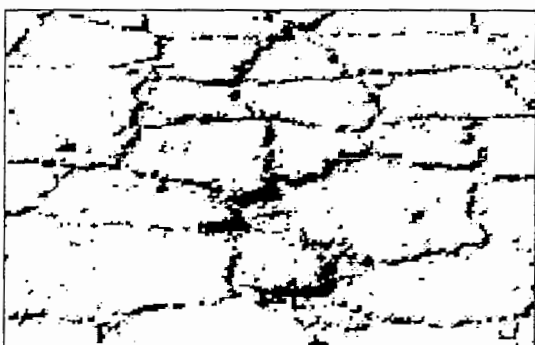
۴ - مطالعه موردی

الف) در شکل (۴ - الف) یک نمونه از ترک موزائیکی ملاحظه می‌شود. این تصویر پس از پردازش بصورت شکل (۴ - ب) در آمده و طرح کلی ترکها در آن نمایان است. با استفاده از توابع عضویت فازی و با در نظر گرفتن درصد گسترش ترک در جهات مختلف ، جدول (۱) تنظیم می‌گردد. مشاهده می‌شود که در ردیف انتهای جدول بیشترین مقدار عضویت مربوط به گروه ترکهای موزائیکی است ، پس شکل (۴ - الف) در رده ترکهای موزائیکی طبقه‌بندی می‌شود.



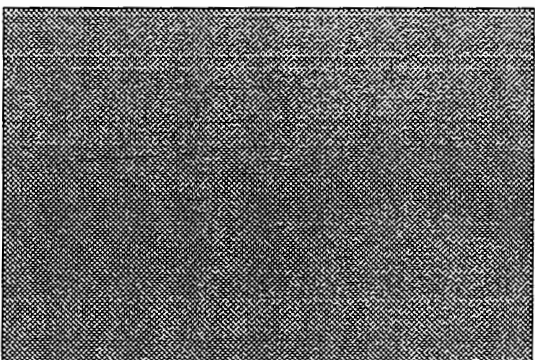
۴ - الف - تصویر اولیه ترک موزائیکی

ب) در شکل (۵ - الف) تصویر یک ترک دیده می‌شود و شکل (۵ - ب) طرح عمومی ترک را پس از پردازش نشان می‌دهد. جدول (۲) با منظور نمودن درصد گسترش ترک در جهات مختلف و بر اساس توابع عضویت فازی تهیه شده و طبقه‌بندی ترک را مشخص می‌نماید. در ردیف انتهای جدول (۲) بیشترین مقدار عضویت متعلق به گروه ترکهای بلوکی است بنابراین شکل (۵ - الف) یک ترک بلوکی را نشان می‌دهد.



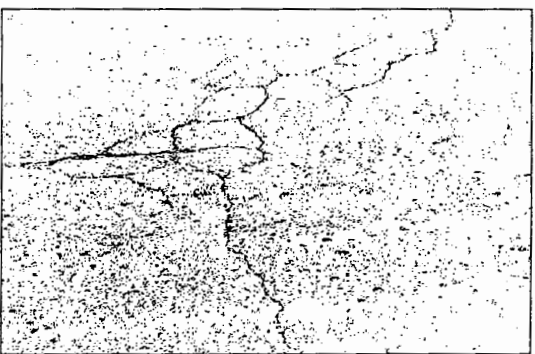
۴ - ب - تصویر پردازش شده

پ) شکل (۶ - الف) یک نمونه از ترکهای طولی و شکل (۶ - ب) فرم هندسی ترک را پس از پردازش نشان می‌دهد. مشابه موارد قبل با منظور نمودن درصد گسترش ترک در جهات مختلف و بر اساس توابع عضویت فازی طبقه‌بندی ترک مشخص می‌گردد. در ردیف انتهای جدول (۳) بیشترین مقدار عضویت متعلق به گروه ترکهای طولی بوده و شکل (۶ - الف) یک ترک طولی است.



۵ - الف - تصویر اولیه ترک بلوکی

ت) شکل (۷ - الف) تصویری از یک نمونه ترک عرضی و شکل (۷ - ب) فرم هندسی ترک را پس از پردازش نشان می‌دهد. مشابه موارد قبل با منظور نمودن درصد گسترش ترک در جهات مختلف و بر اساس توابع عضویت فازی طبقه‌بندی ترک مشخص می‌گردد. در ردیف انتهای جدول (۴) بیشترین مقدار عضویت متعلق به گروه ترکهای طولی بوده و شکل (۷ - الف) یک ترک طولی را نشان می‌دهد.



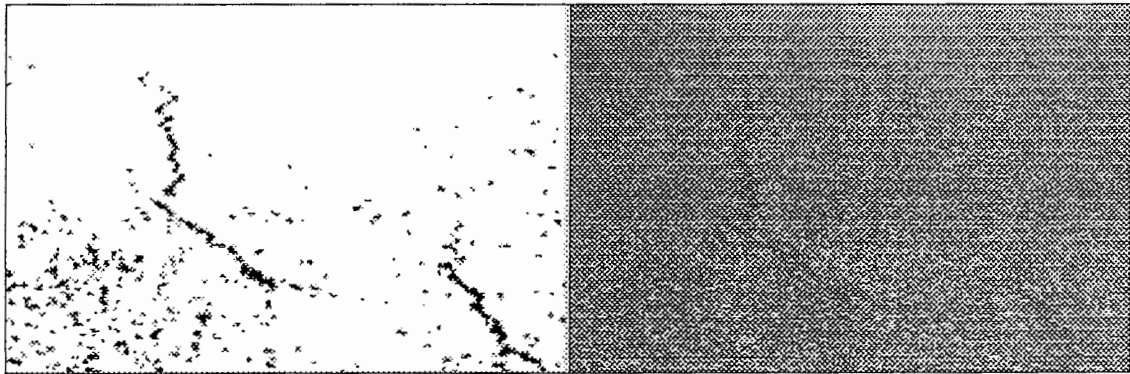
۵ - ب - تصویر پردازش شده ترک بلوکی

جدول (۱) آنالیز نحوه گسترش ترک موزائیکی و طبقه بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰٫۸	۰٫۶	۰	۰٫۱۳	٪۲۶	۱
۰٫۶	۱	۰	۰٫۱	٪۳۲	۲
۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	٪۳۹	۳
۰٫۴۳	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	٪۱۳	۴
۰٫۴۳	۰٫۰۳	۰	۰٫۰۳	اشتراک درجه عضویت	

جدول (۲) آنالیز نحوه گسترش ترک بلوکی و طبقه بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰٫۳۳	۱	۰٫۵	۰	٪۳۹	۱
۰٫۶۶	۱	۰	۰	٪۳۱	۲
۰٫۶	۰٫۷۳	۰٫۷۳	۰٫۷۳	٪۱۸	۳
۰٫۴	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۹۳	٪۱۲	۴
۰٫۳۳	۰٫۷۳	۰	۰	اشتراک درجه عضویت	

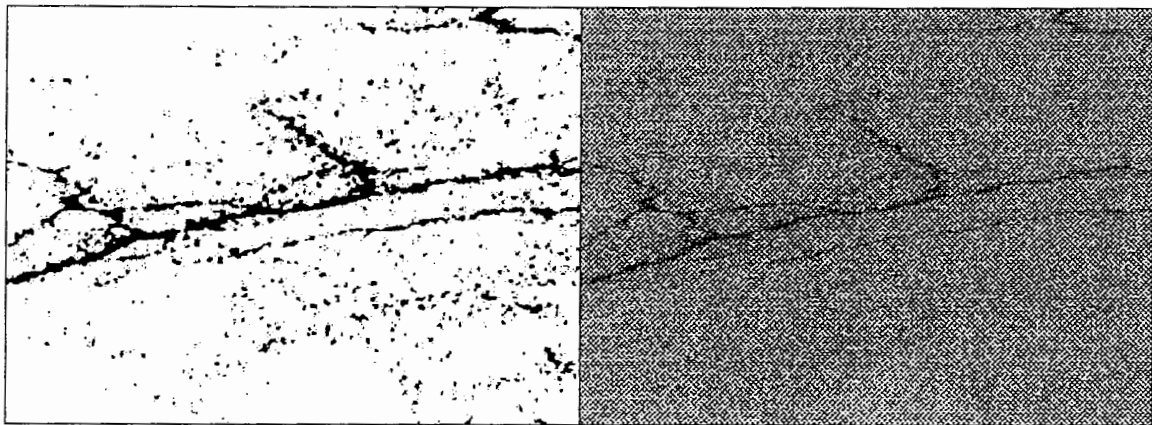


۶- ب - تصویر پردازش شده ترک طولی

۶- الف - تصویر اولیه ترک طولی

جدول (۳) آنالیز نحوه گسترش ترک طولی و طبقه بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰٫۳۵	۰	۰	۰٫۷۶	٪۷	۱
۰	۰٫۴	۰	۱	٪۶۸	۲
۰٫۳	۱	۱	۱	٪۹	۳
۰٫۵۳	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	٪۱۶	۴
۰	۰	۰	۰٫۷۶	اشتراک درجه عضویت	



۷ - الف - تصویر اولیه ترک عرضی

۷ - ب - تصویر پردازش شده ترک عرضی

جدول (۴) آنالیز نحوه گسترش ترک عرضی و طبقه بندی آن

درجه عضویت درصد گسترش ترک در هر گروه از ترک خوردگی ها				درصد گسترش ترک در هر جهت	جهت گسترش ترک
ترک موزائیکی	ترک بلوکی	ترک عرضی	ترک طولی		
۰٫۱۶	۱	۰٫۷۵	۰	% ۴۵	۱
۰٫۹	۰	۰٫۴	۰	% ۱۸	۲
۰٫۶۶	۰٫۶۶	۰٫۶۶	۰٫۶۶	% ۲۰	۳
۰٫۵۷	۰٫۷۶	۰٫۷۶	۰٫۷۶	% ۱۷	۴
۰٫۱۶	۰	۰٫۴	۰	اشتراک درجه عضویت	

۵ - تشکر و قدردانی

این طرح با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام می‌شود که بدینوسیله نگارندگان مراتب تقدیر و امتنان خود را اعلام می‌نمایند. همچنین از آقای مهندس صادق ملکی کارشناس مرکز IT دانشگاه صنعتی شاهرود که جهت تصویربرداری از سطح راهها همکاری نموده‌اند تشکر می‌گردد.

۶ - منابع و مراجع

- 3) Cheng, H.D., Chen, J., Glazier, C., Hu, Y.G. (1999) Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.13, No 4 pp: 270-280.
- 4) Offrell, P., Harvey, J., Scheffy, C. (2002) Crack geometry analysis in asphalt samples obtained from a Heavy Vehicle Simulator test site, 9th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2002.

- 1) SHRP-P-338 (1993) Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project, Strategic Highway Research Program.
- 2) Bellman, R.E., Zadeh, L.A. (1970) Decision Making in a Fuzzy Environment, Management Science, 17-4, pp: 141-164.

Using Multi Layer Perceptron Network to Classify Road Cracks

Dr Heydar Toossian Shandiz, Hosein Ghasemzadeh Tehrani, Hadi Hadizadeh
Shahrood University of Technology, Electrical Engineering Faculty, Civil Engineering Faculty
7 Th Tir Square, P.o.Box 36155-316, Shahrood,
IRAN

hshandiz@shahrood.ac.ir, h_ghasemzadeh@shahrood.ac.ir, hadipardis@yahoo.com

Abstract: In this paper a method for classifying cracks in asphalt road by using multi layer Perceptron (MLP) neural network is proposed. Training data are road images which are taken from road surface in 30 degree. The RGB images are first changed to gray scale and then binary images are produced by using proper threshold gray level. The structure of network has three layers as input, hidden and output. The network is trained to perform tasks such as pattern recognition. The training rule is categorized as back propagation method and learning method is supervised. After training the network, it classifies each image to longitudinal, transverse, blocks, Alligator and others.

Keywords: Road Crack, Multi Layer Perceptron, Pattern recognition

1 Introduction

Billion dollars are needed through the year to maintain current road condition. Conventional method for investigating road surface is manual. The manual methods are very costly, time consuming, dangerous, labor intensive and subjective [1]. As the papers show many researchers have been try to imply non destructive methods for investigating the road surface. Imaging method is widely used in which a visual digital image from the surface is analyzed to identify distress of road surface.

Based on the view of researchers and responsible company in road maintenance the designed system is different. Some of them believed performance of the road depend on the material used, density of traffic and the weather condition. D. Kaur and D Tekkedil try to predict the performance of road based by using such data and fuzzy logic method [2].

K. Sarabandi and E.S. Li proposed a method in which by using millimeter-wave frequencies make active an alarm in detecting fault on road surface. They used 95 GHz fully polarimetric radar system to measure

backscatter waves. The system bandwidth is set to 1 GHzs to improve the range resolution of the point target response for time domain gating during post processing. The system only identifies the distress on the asphalt which is above a threshold [3].

A. C. Heath et al have build a system to model longitudinal, corner and transverse cracking in pavements. They used the parameters such as geometry (length, width, and thickness), material properties (slab elastic modules, Poisson's ratio, coefficient of thermal expansion, sub-grade support), load transfer between adjacent slabs (aggregate interlock and dowel properties), environmental loading (temperature and drying shrinkage distribution though the slab depth) and traffic loading (loads, axel configurations and position of axles) to define a problem in their test system [4].

As the brain can detect the distress on the road easily by seeing them, many researchers try to use artificial intelligence method such neural networks and fuzzy logic to classify the distress on the roads.

C. J. Chao and F. P. Cheng based on cause and effect diagramming and fuzzy pattern recognition have examined a diagnostic model. They used two levels of parameters representing the causes of cracks to form fuzzy set. The parameters are material used, fabrication of structural elements, loading and environmental conditions [5].

In our research classifying cracks based on visual image is important. As we are going to use the test system for on line testing, the algorithm must be simple and fast with reasonable error. As the identifying and classifying distress is subject of our research, we consider the problem as pattern recognition. MLP neural network is the best chose for this situation.

2 System setup

The test system includes three sub-systems as image acquisition, image preprocessing to make them ready to feed to the MLP network as classifying part of system. These parts are explaining briefly as follow.

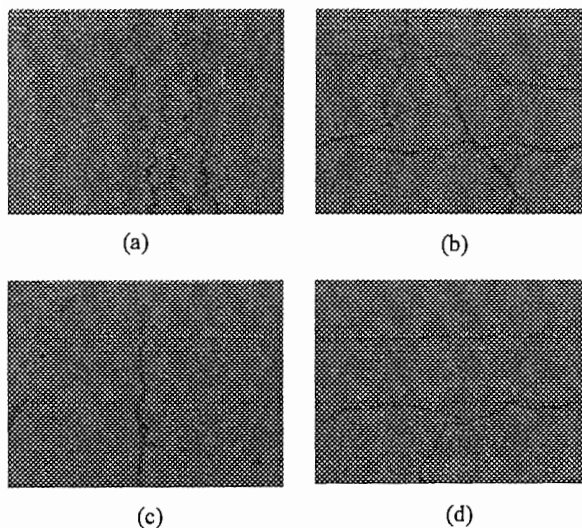


Fig. 1 Original crack images (a) Alligator, (b) Blocks, (c) longitudinal, (d) Transverse

2-1 Image Acquisition

A digital handy cam is used to take road image. The degree of handy cam with horizontal axes is 30 degree and it is 1.5 meter above the surface. Four kind images are shown in fig. 1. The original image has 640 by 480 pixels. Each pixel in horizontal direction represented 0.3 cm and in vertical 0.65 cm long. In other word each original image covers an area with 416 by 144 cm of the road.

Our experience shows the best images are taken in sunny weather two or three hours after rain. As the gray level of the cracks is much different from the background of surface such images are much better than usual images.

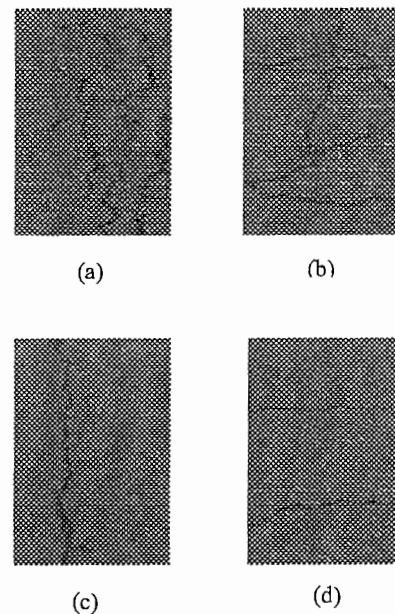


Fig. 2 Scaled crack images (a) Alligator, (b) Blocks, (c) Longitudinal, (d) Transverse

2-2 Preprocessing

All images are preprocessed as follow before training the neural network. As the neural network is MLP, the network inputs have to be in binary format. First each mage is changed to

gray scale then by using proper threshold all images changed to two level as zero and 255 gray scale. As the number of neuron in input layer is limited by speed of processing time and convergence of algorithm, each image is scaled. The scaled image has 251 by 371 pixels. It means each original image change to two new images as shown in fig. 2.

2-3 Classifying by MLP

The scaled images are inputs to the MLP neural network. The network has three layers, input layer has 5859 nodes, hidden layer consists of 140 neurons and there are five outputs in last layer. The back propagation (BP) algorithm is used to train the network. In order to improve the BP method a term called momentum is added to each parameter of network. This term filter out the high frequency variation.

N. A. Kasabov stated the number of hidden layer neurons have to be close to the number of training examples when the training data are sparse and do not contain any common features[6]. As our data meet this feature, the number of hidden layer neurons is set 140. The same reference propose optimal learning rate by

$$\eta = 1.5 / \left(\sqrt{\sum p_i^2} \right) \quad (1)$$

In which η is momentum or learning rate and p_i is the number of instances belong to output of each class. In this work they have chosen as table 1.

Table 1 Chosen p_i

	Alligator	Longitudinal	Block	Transverse	Others
p_i	43	35	12	25	25

It has been proven that when back propagation neural network has single hidden layer and non-linear transform functions, it is a universal

classificatory machine [7]. In this work activation function in hidden layer and output layer is Fermi which is a non linear activation function. For 0.0005 error limit the number of training images are 140, the number of epochs are 1300 and the momentum based on table 1 data is 0.02244. Figure 3 shows the main page of computer program in Delphi and training form.

3 Experimental results

About 100 road images are tested with the program. The program classifies with the error shown in table 2.

The program classify 7 longitudinal as 4 others and 3 blocks, 3 transverse as others, 1 blocks as alligator and 4 alligators as others. It is because of generality of others. As any cross line in longitudinal cracks make them as block cracks, the noise in longitudinal cracks cause classifying them as blocks wrongly.

Table 2 test result, A=alligator, L=longitudinal, B=blocks, T=transverse

Type	A	L	B	T	Others
No. of test	20	20	12	20	20
Correct Recognition	16	13	11	17	20
Error	%20	%35	%8.3	%15	0

4 Conclusions

This program is simple and faster than other methods. Because of high speed of classifying it can be used on line. The device for setting up the test system is cheap and easy to use. As future work, the program can be improved to label each group of distress as high, middle and low intensity. The other problem have to be solved is classifying dirty part of the road (for example because of car leakage oil) as crack. Labeling the crack in the road by using GIS system is next step of improving the program.

Acknowledgement

The authors would like to express their thanks to research chancellor in Shahrood University of Technology for financial support of this research.

References:

- [1] H. D. Cheng et al, Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory, *Journal of computing in civil Engineering*, October 1999.
- [2] D. Kaur and D. Tekkedil, Fuzzy Expert System for Asphalt Pavement Performance Prediction, *IEEE Intelligent transportation systems Conference Proceedings*, 1-3 October 2000.
- [3] K. Sarabandi and E. S. Li, Polarimetric Characterization of Debris and Faults in the Highway Environment at Millimeter Wave Frequencies, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol, 48, No. 11, November 2000.
- [4] A C. Heath et al, Modeling Longitudinal, corner and Transverse Cracking in Joint Concrete Pavements, *International Journals of Pavement Engineering*, Vol. 4 (1), March 2003.
- [5] C. J. Chao and F. P. Cheng, Fuzzy Pattern Recognition Model for Diagnosing Cracks in RC Structures, *Journal of computing in civil Engineering*, Vol. 12, No. 2, April 1998.
- [6] N. K. Kasabov, *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*, MIT Press, Second Printing 1998.
- [7] Y. Liu et al, Inspection of Defects in Optical Fibers Based on Back Propagation Neural networks, *Elsevier Journal of Optics Communications*, Vol. 198, November 2001.

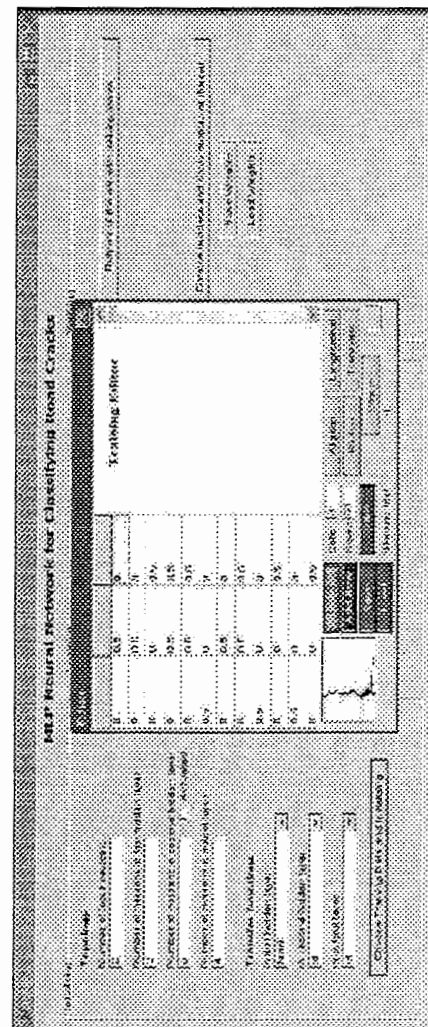


Fig. 3 Main page and training form

Road Surface Crack Identification by Using Different Classifiers on Digital Images

Dr HEYDAR TOOSSIAN SHANDIZ, HOSEIN GHASEMZADEH TEHRANI,
HADI HADIZADEH

Shahrood University of Technology, Electrical, Civil Engineering Faculty
7 Th Tir Square, P.o.Box 36155-316, Shahrood,
IRAN

hshandiz@shahrood.ac.ir, h_ghasemzadeh@shahrood.ac.ir, hadipardis@yahoo.com

Abstract: In this paper different classifier are used to identifying different type of cracks on road surface. As our experience shows Region Growing Classifier (RGC) method can be used to divide all surface road images in two main groups. First group covers alligator and block cracks. Longitudinal, transverse cracks and other kind of distress are put in second group. In first group, wavelet Statistic Feature Classifier (WSFC), vertical and horizontal histogram and proximity are used for classification. They help to judge about the kind of crack based on digital image from road surface. Histogram, RGC and proximity are classifiers which are used in second group. Multi layer Perceptron neural network is used to judge about the cracks.

Keywords: Road Crack, Region Growing Classifier (RGC), Statistic Feature Classifier (WSFC), Multi Layer Perceptron, Pattern recognition

1 Introduction

Highways and roads are a major public asset in all countries. To efficiently manage these assets road authorities need accurate, up-to-date information on the condition of their highway and road networks. For example the maintenance and rehabilitation of highway pavements in the united state requires over 17 billion dollars a year. Conventional visual and manual pavement cracking analysis methods are very costly, time consuming, dangerous, labor intensive and subjective. Automatic monitoring of some aspects of road condition, for example roughness and skid resistance, has been carried out for a number of years. However, one of the most important road quality indicators, the extent and type of cracking, has up until now been measured only by visual inspection. The result is that only very sparse sampling has been carried out, at a very high cost per kilometer, and very

little information has therefore been available in this important aspect of road condition. The main idea of digital image processing methods is based on the fact that the crack pixels in pavement images are darker than the surroundings and continuous [1], [2].

Based on researchers work the distress on pavement can be categorized as follow [3-5]:

- A longitudinal crack which is appears along the highway.
- Transverses crack is a crack perpendicular to the pavement centerline.
- Alligator crack which is a series of interconnected cracks with many sides and sharp angled pieces.
- Block crack as a pattern of rectangular pieces of road surface from transverse cracks.

- Other distress, such as man-holes, construction plates, etc.

This work itself can be categorized as digital image pattern recognition. There is a wide range of pattern recognition approaches. They are categorized in two main groups as statistical and structural methods. In statistical methods, the image is processed as a whole and classified based on the distributed of the black pixels. In structural method, the image is expressed as compositions of structural units. The pattern is recognized by matching its structural representation with that of a references pattern [6]. In the first step the crack is classified as whole and in the second step judge is based on structural method.

In the following sections and subsections the theory of our method and experimental results are discussed.

2 Method flowcharts

Fig. 1 shows the flowchart of proposed method. Each block is explained briefly.

2.1 Image Acquisition

A digital handy cam is used to take road image. The degree of handy cam with horizontal axes is 30 degree and it is 1.5 meter above the surface. The film is fed to the lap-top via i-link. A computer program divided the film in separate images.

Four kind cracks images are shown in fig 2. The original image has 640 by 480 pixels. Each pixel in horizontal direction represented 0.3 cm and in vertical 0.65 cm long. In other word each original image covers an area with 416 by 144 cm of the road.

Our experience shows the best images are taken in sunny weather two or three hours after rain. As the gray level of the cracks is much different from the background of surface, such images are much better than usual images.

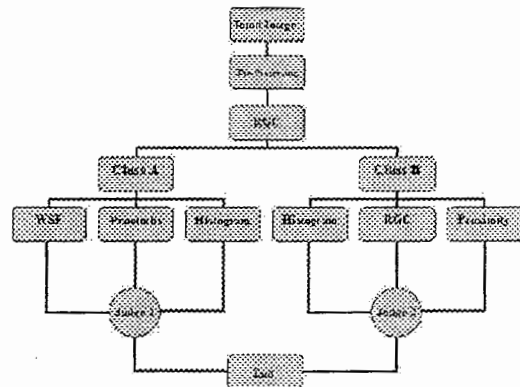


Fig. 1 Flowchart of proposed method

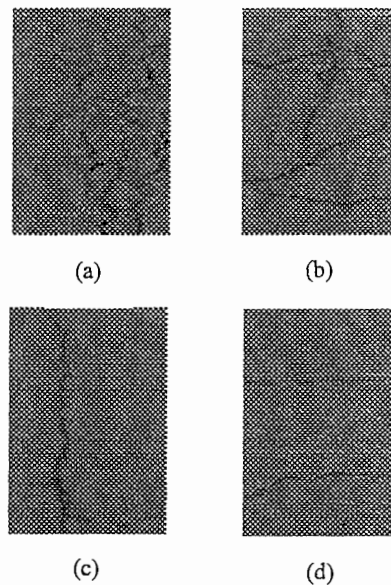


Fig.2 Scaled crack images (a) Alligator, (b) Blocks, (c) Longitudinal, (d) Transverse

2.2 Preprocessing

We are interested to put all pixels in the images in two groups, background and cracks pixels. It means the background and noisy pixels have to be shown in one group. To achieve this goal, a computer program first changed each image to gray scale then by using proper threshold all images changed to two level as zero and 255 gray scale (binary image). The produced binary image is fed to next block.

2.3 Region Growing Classifier (RGC)

In our approach, RGC plays an important and critical role. The pre-processed image is classified as class A and class B. The advantage of such a procedure is breaking the problem into a number of simpler ones.

The basic idea behind the RGC method is to segment underlying image into some disjoint regions and count the number of regions which are produced as the desirable output.

The process of forming a region-based image description (or approximation) is referred to as segmentation. Image segmentation can be described as the partitioning of an image into a number of disjoint segments or regions based on pixel grey level characteristics. These regions may be small neighborhoods or even single pixels.

There are three main classes of image segmentation techniques: statistical classification, edge detection and region growing. The segmentation to be used here is of region growing type. A region is defined as an area in the image whose pixels share common properties such as similar grey level values which enclosed in a closed contour. In other word Region growing is the process of joining neighboring pixels into larger regions based on these properties [7].

2.4 Wavelet Statistic Feature (WSF) Classifier

Wavelet transform is a powerful and famous multi-resolution analysis which has received a lot of attention at recent years.

It offers an extra advantage, which in some cases can be beneficially exploited. Its multi-resolution properties conform to the way perception is achieved by humans, through their hearing and visual systems. By using this transform at discrete case we can analysis and interpret the input image at multi scales and directions and exploit the advantages of its multi-resolution properties [8].

In our proposed method, wavelet transform plays the key role in class A. It is responsible for

putting the input image into one of the longitudinal or transverse crack type. For attempting to this goal, we are used one of the most popular statistical features of the wavelet transform namely, energy of each decomposed image which is described latter.

Let $I(x, y)$ indicate the gray level of input image. One level of wavelet decomposition on $I(x, y)$ results in four sub images: first smooth sub images $I_{LL}(x, y)$ which represents the coarse approximation of the input image, and three detail sub images $I_{LH}(x, y)$, $I_{HL}(x, y)$ and $I_{HH}(x, y)$ which represent the horizontal, vertical, and diagonal directions of the image, respectively. Further, let $I_{LL}^J(x, y)$ represents the smooth sub image at resolution level J and $I_{LL}^0(x, y) = I(x, y)$ which is the original image. Then the decomposition of $I_{LL}^J(x, y)$ results in four sub images $I_{LL}^{J+1}(x, y)$, $I_{LH}^{J+1}(x, y)$, $I_{HL}^{J+1}(x, y)$ and $I_{HH}^{J+1}(x, y)$ at resolution level $J + 1$ each of size $n/2^{J+1} \times m/2^{J+1}$. Fig. 3 shows a three level decomposition of a sample longitudinal crack.

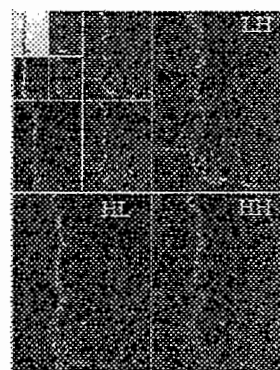


Fig. 3 Three decomposition levels with discrete wavelet transform

Now, we introduce the Energy Statistic Feature (ESF) of wavelet transform and use it in our WSF method. The energy of each decomposed sub image is calculated as follows:

$$\mu_v = \frac{1}{m} \sum_1^m V_H(j) \quad (11)$$

$$\mu_h = \frac{1}{n} \sum_1^n H_H(j) \quad (12)$$

Where μ_v and μ_h are the mean or dc value of vertical histograms and horizontal histograms, respectively. One advantage of using the mean values of histogram is that it gives a position invariant measure of the input image because if the crack is shifted across the horizontal or vertical direction then μ_v and μ_h are not changed.

2.6 Proximity

The mean values of horizontal histogram for longitudinal and transverse cracks are very close to each other and so the segregation between these two cracks is poor. To remedy this problem we define a proximity measure as an alternative as Vertical Proximity and Horizontal Proximity by equation 13 and 14, respectively.

$$\Omega_v = \sum_{j=1}^{m-1} |V_H(j+1) - V_H(j)| \quad (13)$$

$$\Omega_h = \sum_{i=1}^{n-1} |H_H(i+1) - H_H(i)| \quad (14)$$

From the above equations it can be seen that proximity is computed by accumulating the differences between adjacent histogram values. The low value of proximity indicates that there is little difference between any of the columns or rows for the input image.

It is clear that the vertical proximity for a longitudinal is bigger than vertical proximity in a transverse crack and vice versa.

2.7 Judge

Now, we are ready to produce a suitable feature vector for each described class. A Multi Layer

Perceptron (MLP) is used to classify each image. The feature vector in class A is

$$F_A = \{\Phi^{(1)}, \Phi^{(2)}, \Phi^{(3)}, \mu_v, \mu_h, \Omega_v, \Omega_h\} \quad (15)$$

and in Class B is

$$F_B = \{\Omega_v, \Omega_h, \mu_v, \mu_h, \Gamma\} \quad (16)$$

3 Experimental results

As explained in section 1 an alligator crack is a series of interconnected cracks, which has many sided and sharp-angled pieces whereas a block crack is a pattern of rectangular pieces of asphalt surface. So we expect that the complexity and the number of regions in an alligator crack are bigger than a block crack. It is clear that the output of the RGC or Γ for alligator and block cracks is more than three other kinds. To show our claim, table 1 represents the average output of RGC for about 45 kinds of alligator cracks, 45 kinds of block cracks, 35 kinds of longitudinal cracks, 30 kinds of transverse cracks and 60 kinds of crack free cases. Also figure 4 shows some examples of RGC operation.

Table 1 RGC output for alligator cracks

Crack Type	Average of RGC Outputs (Γ_m)
Alligator Cracks	15.1
Block Cracks	9.2
Longitudinal	2
Transverse	2.3
Crack Free	1.1

In our experiments as shown in table 1, it is found that the output of RGC for class A (longitudinal, transverse and others) is almost smaller than 4 and it is bigger than 4 for class B (alligator and block crack). This criterion at the first node of hierarchical algorithm which is shown in fig.1 is used.

In our proposed method the RGC is used twice. Once at the first node to assign the input

image into one of the class A or class B and once for determining that the image which has been assigned to class B is an alligator crack or a block crack.

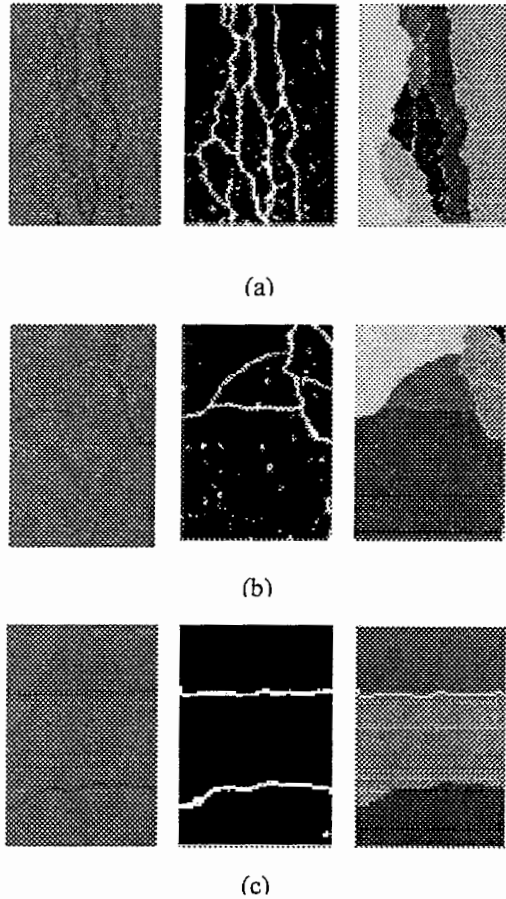


Fig. 4 RGC of three kinds of cracks a) alligator, b) block and c) longitudinal

In this paper, for WSF Daubechies mother wavelet D4 is adopted for image decomposition. Among all kinds of mother wavelets, Daubechies wavelets are proven to be good for image analysis and synthesis because of their compact support, more continuous derivatives, and zero integral of mother wavelets [8].

Therefore, Daubechies wavelets are chosen in our approach and then we are applied different orders of Daubechies family and we

experimentally found that the 4th order is the best choice for our classification problem which leads to high classification accuracy.

The question arises here is that how to determine the number of decomposition level. To answer this question it is important to mention that too large the number of multi resolution levels lead to loss of information and increase the processing time, whereas too small the number of multi resolution levels cannot sufficiently effective and cause to decreased the accuracy of classification. For these reasons in our proposed method the maximum decomposition level is three and sub band 3 is found to give the best results because at this level undesired small pieces, which are probably be noise, are eliminated. Naturally, we benefit by giving a higher weight to this sub band. To demonstrate the discrimination power of WSFC at sub band 3, firstly, we fed a longitudinal crack which to the WSFC which used only one decomposition level. Unfortunately it misclassified as a transverse crack. Now to remedy this problem, we are also used the 3rd decomposition level and look at the result. Fortunately, the classification is successful. It is the preference of the WSFC rather than the Histogram method.

Table 1 shows the corresponding mean values μ_v and μ_h for crack free types are very small (less than 1). In class A vertical and horizontal histogram have no significant differences, but vertical and horizontal proximity can be used for recognition. For class B the table shows, all parameters for alligator cracks are bigger than corresponding parameters of block cracks. It is obvious there is a significant difference between vertical proximity for alligator and block cracks.

Table 2 Different parameters for various cracks

Crack Type (Class A)	Vertical Histogram	Horizontal Histogram	Vertical Proximity	Horizontal Proximity
Longitudinal	3.3478	2.2679	87.7680	54.0025
Transverse	2.5058	2.6974	41.5660	87.4742
Crack Free	0.2532	0.1715	15.9280	16.3576
Crack Type (Class B)	Vertical Histogram	Horizontal Histogram	Vertical Proximity	Horizontal Proximity
Alligator	10.1518	6.8771	164.6673	136.8471
Block	5.6969	3.8592	90.9989	125.6437

4 Conclusions

The proposed method classified crack free images with 100% accuracy. The crack images are classified to transverse, longitudinal, block and alligators with 98%, 90%, 89% and 88% accuracy, respectively. This method is fast, in

0.324 seconds the program classifies each image. As the algorithm is easy, Hardware implementation is easy with low cost.

Acknowledgement

Authors express their thanks to research affair in Shahrood University of Technology for their financial support of this research.

References:

- [1] H. D. Cheng et al, Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory, *Journal of computing in civil Engineering*, October 1999.
- [2] C. J. Chao and F. P. Cheng, Fuzzy Pattern Recognition Model for Diagnosing Cracks in RC Structures, *Journal of computing in civil Engineering*, Vol. 12, No. 2, April 1998.
- [3] A C. Heath et. all, Modeling Longitudinal, corner and Transverse Cracking in Joint Concrete Pavements, *International Journals of Pavement Engineering*, Vol. 4 (1), March 2003.
- [4] T. Tomikawa, A Study of Road Crack Detection by Meta-Genetic Algorithm, *IEEE AFRICON*, Vol. 1, 28 Sept. -1 Oct, 1999.
- [5] C. Scheffy and E. Diaz, Asphalt Concrete Fatigue Crack Monitoring and Analysis Using Digital Image Analysis Techniques, *International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Reno, Nevada, 18-20 October, 1999.
- [6] B. Ravi and M. H. ang, Fuzzy Logic Based Character Recognizer, *Proceedings of the Computing Science Congress (PCSC)*, 2000.
- [7] A. K. Jain, *Fundamentals of Digital ImageProcessing*, Prentice Hall, 1989.
- [8] J. Ze et al, Content-based Image Indexing and Searching Using Daubechies Wavelets, *International Journal of Digital Libraries*, P311-328, 1997.

Comparing Different Methods in Road Surface Crack Identification and Classification

HEYDAR TOOSSIAN SHANDIZ, HOSEIN GHASEMZADEH TEHRANI, HADI HADIZADEH
Shahrood University of Technology, Electrical, Civil Engineering Faculty
7 Th Tir Square, P.o.Box 36155-316, Shahrood,
IRAN

hshandiz@shahrood.ac.ir, hadipardis@yahoo.com, h_ghasemzadeh@shahrood.ac.ir

Abstract: In this paper three different methods for crack identification and classification are compared and discussed. The first method is using fuzzy theory, the second is based on neural network and the third approach is Region Growing Classifier (RGC) method. In our work we divided all cracks in asphalt pavement into five groups as longitudinal, transverse, block, alligator and other kind of distress. In Fuzzy method the direction of cracks are used to classify asphalt image. In neural network method different image of each kind are used to train Perceptron neural network. In third method wavelet Statistic Feature Classifier (WSFC), vertical and horizontal histogram and proximity are used for classification. As the results show each method has some advantage and disadvantage over other methods.

Keywords: Road Crack, Fuzzy Theory, Multi Layer Perceptron, Region Growing Classifier (RGC), Statistic Feature Classifier (WSFC), Pattern recognition

1 Introduction

Roads and highways are a major public asset in all countries. To efficiently manage these assets road authorities need accurate, up-to-date information on the condition of their highway and road networks. Billion dollars are needed through the year to maintain current road condition. Conventional method for investigating road surface is manual. The manual methods are very costly, time consuming, dangerous, labor intensive and subjective [1]. Automatic monitoring of some aspects of road condition, for example roughness and skid resistance, has been carried out for a number of years. However, one of the most important road quality indicators, the extent and type of cracking, has up until now been measured only by visual inspection. The result is that only very sparse sampling has been carried out, at a very high cost per kilometer, and very little information has therefore been available in this important aspect of road condition.

As the papers show many researchers have been try to imply non destructive methods for investigating the road surface. Imaging method is widely used in which a visual digital image from the surface is analyzed to identify distress of road surface.

Based on the view of researchers and responsible company in road maintenance the designed system is different. Some of them believed performance of the road depend on the material used, density of traffic and the weather condition. D. Kaur and D Tekkedil try to predict the performance of road based by using such data and fuzzy logic method [2].

K. Sarabandi and E.S. Li proposed a method in which by using millimeter-wave frequencies make active an alarm in detecting fault on road surface. They used 95 GHz fully polarimetric radar system to measure backscatter waves. The system bandwidth is set to 1 GHz to improve the range resolution of the point target response for time domain gating during post processing. The

system only identifies the distress on the asphalt which is above a threshold [3].

A. C. Heath et al have build a system to model longitudinal, corner and transverse cracking in pavements. They used the parameters such as geometry (length, width, and thickness), material properties (slab elastic modules, Poisson's ratio, coefficient of thermal expansion, sub-grade support), load transfer between adjacent slabs (aggregate interlock and dowel properties), environmental loading (temperature and drying shrinkage distribution though the slab depth) and traffic loading (loads, axel configurations and position of axles) to define a problem in their test system [4].

As the brain can detect the distress on the road easily by seeing them, many researchers try to use artificial intelligence method such neural networks and fuzzy logic to classify the distress on the roads.

C. J. Chao and F. P. Cheng based on cause and effect diagramming and fuzzy pattern recognition have examined a diagnostic model. They used two levels of parameters representing the causes of cracks to form fuzzy set. The parameters are material used, fabrication of structural elements, loading and environmental conditions [5].

In our research classifying cracks based on visual image is important. As we are going to use the test system for on line testing, the algorithm must be simple and fast with reasonable error.

Based on researchers work the distress on pavement can be categorized as follow [6-7]:

- A longitudinal crack which is appears along the highway.
- Transverses crack is a crack perpendicular to the pavement centerline.
- Alligator crack which is a series of interconnected cracks with many sides and sharp angled pieces.
- Block crack as a pattern of rectangular pieces of road surface from transverse cracks.

- Other distress, such as man-holes, construction plates, etc.

In this work three different methods in road crack identification and clasification are discussed and compared, as fuzzy theory, Perceptron neural network and Region Growing Classifier (RGC) method [8-9].

A digital handy cam is used to take road image. The degree of handy cam with horizontal axes is 30 degree and it is 1.5 meter above the surface. The original image has 640 by 480 pixels. Each pixel in horizontal direction represented 0.3 cm and in vertical 0.65 cm long. In other word each original image covers an area with 416 by 144 cm of the road.

Our experience shows the best images are taken in sunny weather two or three hours after rain. As the gray level of the cracks is much different from the background of surface such images are much better than usual images.

2 Fuzzy Method

The diferent kinds of crack are developed as shown in Fig. 1. The longitudinal cracks are in direction 1, the transverse cracks in direction 2, The block cracks are in direction 1 and 2 and alligator cracks develop in 3 and 4 directions.

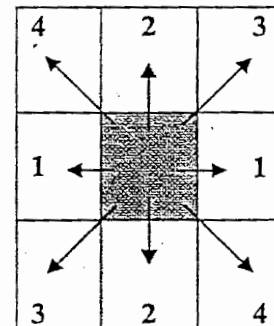


Fig. 1 Development of cracks in main direction

The development of cracks in each direction is clasified as-low, relatively low, medium, relatively high and high. In each binary image the pixels with gray level one are count in four directions. The percent of element in each direction shows the kind

of crack. Based our experiments the membership functions are shown as fig. 2.

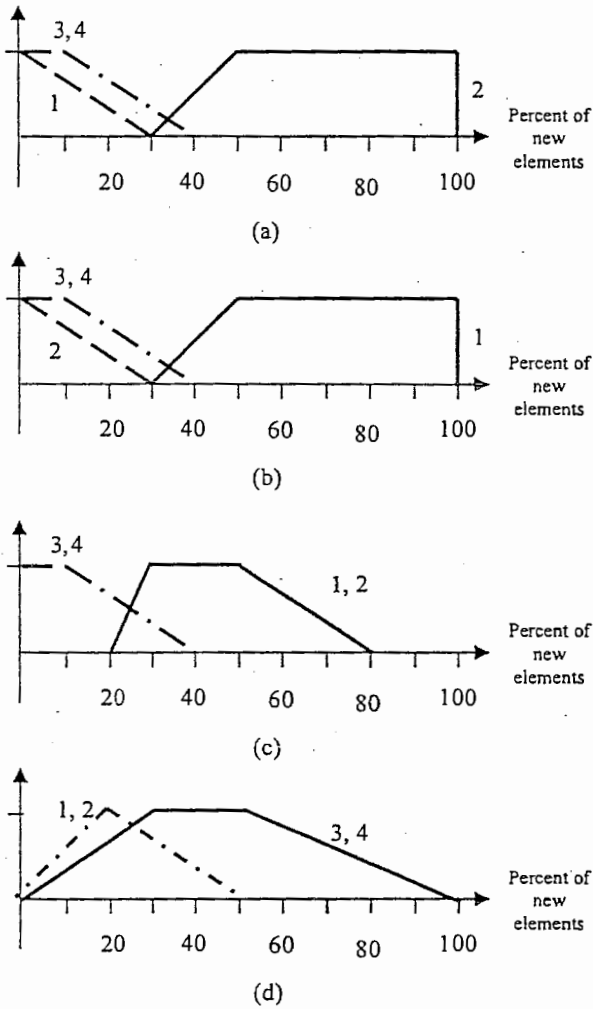


Fig 2 Crack membership function (a) longitudinal, (b) transverses, (c) block and (d) alligator

Based on Belman and Zadeh law the minimum of membership is chosen as intersection [10].

2.1 Experimental Results

The black and white road images are change to binary images. As the gray level of each pixels of image are in 8 bits register, the gray level vary from 0 as black to 255 as white. The chosen thershold is 100, it means any gray level under

100, which are belong to crack, change to 1 and above 100 (background pixels) become 0. In this section four images are analysed. The analysed results are shown in a table under each image. In each table L, T, B, A, present longitudinal, transvers, block and alligator crack respectively.

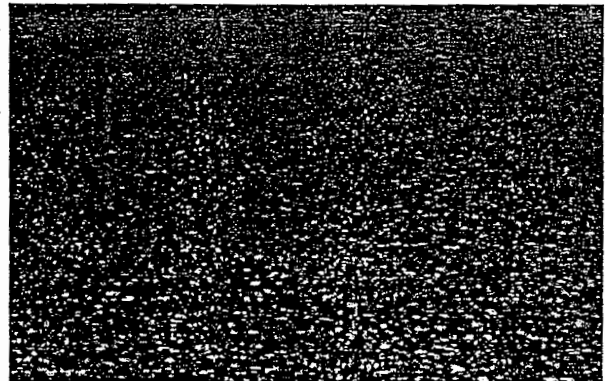


Fig. 3 Longitudinal crack

Table 1 Analysis result of fig. 3

Membership Degree				Percent	Direction
A	B	T	L		
0.35	0	0	0.76	% 7	1
0	0.4	0	1	% 68	2
0.3	1	1	1	% 9	3
0.53	0.8	0.8	0.8	% 16	4
0	0	0	0.76	Intersection	

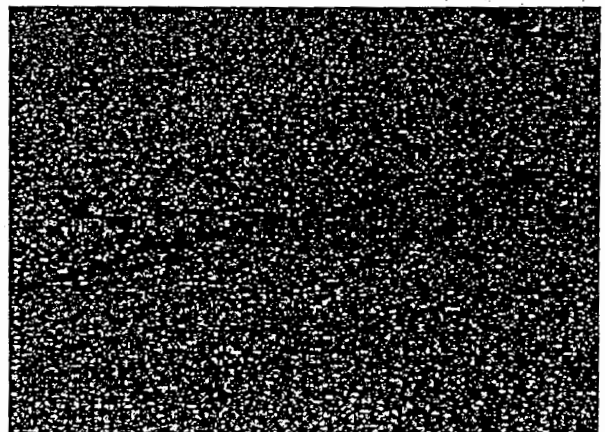


Fig. 4 Transversal crack

Table 2 Analysis result of fig. 4

Membership Degree				Percent	Direction
A	B	T	L		
0.16	1	0.75	0	% 45	1
0.9	0	0.4	0	% 18	2
0.66	0.66	0.66	0.66	% 20	3
0.57	0.76	0.76	0.76	% 17	4
0.16	0	0.4	0	Intersection	

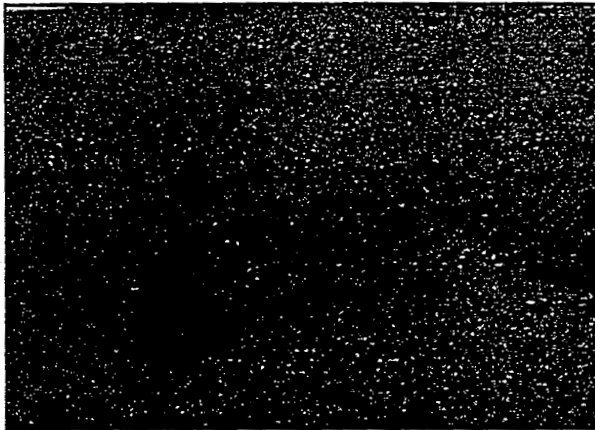


Fig. 5 Block crack

Table 3 Analysis result of fig. 5

Membership Degree				Percent	Direction
A	B	T	L		
0.33	1	0.5	0	% 39	1
0.66	1	0	0	% 31	2
0.6	0.73	0.73	0.73	% 18	3
0.4	0.93	0.93	0.93	% 12	4
0.33	0.73	0	0	Intersection	

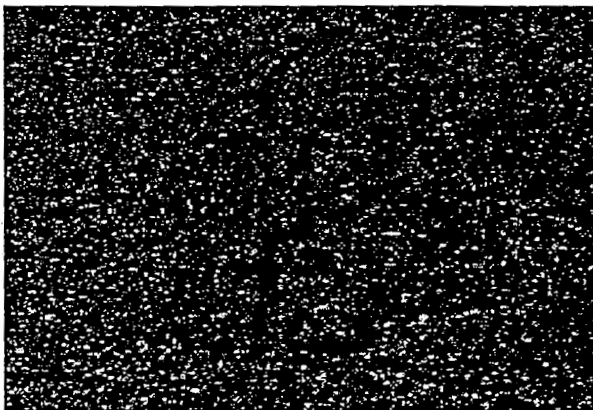


Fig. 6 Alligator crack

Table 4 Analysis result of fig. 6

Membership Degree				Percent	Direction
A	B	T	L		
0.8	0.6	0	0.13	% 26	1
0.6	1	0	0.1	% 32	2
1	0.03	0.03	0.03	% 39	3
0.43	0.9	0.9	0.9	% 13	4
0.43	0.03	0	0.03	Intersection	

3 Neural Network Method

The scaled images are inputs to the MLP neural network. The network has three layers, input layer has 5859 nodes, hidden layer consists of 140 neurons and there are five outputs in last layer. The back propagation (BP) algorithm is used to train the network. In order to improve the BP method a term called momentum is added to each parameter of network. This term filter out the high frequency variation.

N. A. Kasabov stated the number of hidden layer neurons have to be close to the number of training examples when the training data are sparse and do not contain any common features[11]. As our data meet this feature, the number of hidden layer neurons is set 140. The same reference propose optimal learning rate by

$$\eta = 1.5 / \left(\sqrt{\sum p_i^2} \right) \quad (1)$$

In which η is momentum or learning rate and p_i is the number of instances belong to output of each class. In this work they have chosen as table 1.

Table 5 Chosen p_i

	A	L	B	T	Others
p_i	43	35	12	25	25

It has been proven that when back propagation neural network has single hidden layer and non-linear transform functions, it is a universal

classificatory machine [12]. In this work activation function in hidden layer and output layer is Fermi which is a non linear activation function. For 0.0005 error limit the number of training images are 140, the number of epochs are 1300 and the momentum based on table 1 data is 0.02244.

3.1 Experimental results

About 100 road images are tested with the program. The program classifies with the error shown in table 2.

The program classify 7 longitudinal as 4 others and 3 blocks, 3 transverse as others, 1 blocks as alligator and 4 alligators as others. It is because of generality of others. As any cross line in longitudinal cracks make them as block cracks, the noise in longitudinal cracks cause classifying them as blocks wrongly.

Table 6 Test result, A=alligator, L=longitudinal, B=blocks, T=transverse

Type	A	L	B	T	Others
No. of test	20	20	12	20	20
Correct Recognition	16	13	11	17	20
Error	%20	%35	%8.3	%15	0

4 RGC Method

This method itself can be categorized as digital image pattern recognition. There is a wide range of pattern recognition approaches. They are categorized in two main groups as statistical and structural methods. In statistical methods, the image is processed as a whole and classified based on the distributed of the black pixels. In structural method, the image is expressed as compositions of structural units. The pattern is recognized by matching its structural representation with that of a references pattern [13]. In the first step the crack is classified as whole and in the second step judge is based on structural method.

Fig. 7 shows the flowchart of proposed method. Each block is explained briefly.

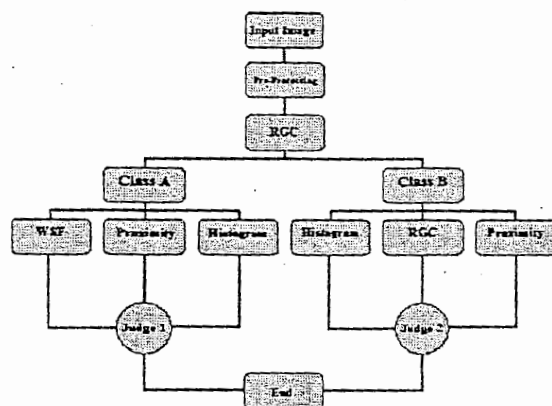


Fig. 7 Flowchart of proposed method

4.1 Preprocessing

We are interested to put all pixels in the images in two groups, background and cracks pixels. It means the background and noisy pixels have to be shown in one group. To achieve this goal, a computer program first changed each image to gray scale then by using proper threshold all images changed to two level as zero and 255 gray scale (binary image). The produced binary image is fed to next block.

4.2 Region Growing Classifier (RGC)

In our approach, RGC plays an important and critical role. The pre-processed image is classified as class A and class B. The advantage of such a procedure is breaking the problem into a number of simpler ones.

The basic idea behind the RGC method is to segment underlying image into some disjoint regions and count the number of regions which are produced as the desirable output.

The process of forming a region-based image description (or approximation) is referred to as segmentation. Image segmentation can be described as the partitioning of an image into a number of disjoint segments or regions based on pixel grey level characteristics. These regions may be small neighborhoods or even single pixels.

There are three main classes of image segmentation techniques: statistical classification,

edge detection and region growing. The segmentation to be used here is of region growing type. A region is defined as an area in the image whose pixels share common properties such as similar grey level values which enclosed in a closed contour. In other word Region growing is the process of joining neighboring pixels into larger regions based on these properties [14].

4.3 Wavelet Statistic Feature (WSF) Classifier
 Wavelet transform is a powerful and famous multi-resolution analysis which has received a lot of attention at recent years.

It offers an extra advantage, which in some cases can be beneficially exploited. Its multi-resolution properties conform to the way perception is achieved by humans, through their hearing and visual systems. By using this transform at discrete case we can analysis and interpret the input image at multi scales and directions and exploit the advantages of its multi-resolution properties [15].

In our proposed method, wavelet transform plays the key role in class A. It is responsible for putting the input image into one of the longitudinal or transverse crack type. For attempting to this goal, we are used one of the most popular statistical features of the wavelet transform namely, energy of each decomposed image which is described latter.

Let $I(x, y)$ indicate the gray level of input image. One level of wavelet decomposition on $I(x, y)$ results in four sub images: first smooth sub images $I_{LL}(x, y)$ which represents the coarse approximation of the input image, and three detail sub images $I_{LH}(x, y)$, $I_{HL}(x, y)$ and $I_{HH}(x, y)$ which represent the horizontal, vertical, and diagonal directions of the image, respectively. Further, let $I_{LL}^J(x, y)$ represents the smooth sub image at resolution level J and $I_{LL}^0(x, y) = I(x, y)$ which is the original image. Then the decomposition of $I_{LL}^J(x, y)$ results in four sub images $I_{LL}^{J+1}(x, y)$, $I_{LH}^{J+1}(x, y)$, $I_{HL}^{J+1}(x, y)$

and $I_{HH}^{J+1}(x, y)$ at resolution level $J + 1$ each of size $n/2^{J+1} \cdot m/2^{J+1}$. Fig. 8 shows a three level decomposition of a sample longitudinal crack.

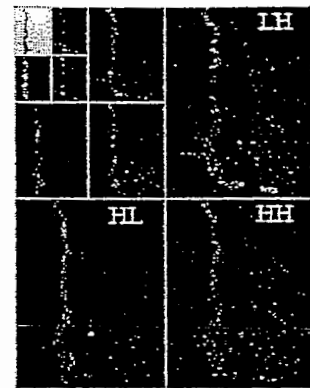


Fig. 8 Three decomposition levels with discrete wavelet transform

Now, we introduce the Energy Statistic Feature (ESF) of wavelet transform and use it in our WSF method. The energy of each decomposed sub image is calculated as follows:

The energy of the smooth sub image which is in fact a coarse approximation to its original image at level J is given by:

$$E_s^J = \sum_x \sum_y [I_{LL}^{(J)}(x, y)]^2 \tag{2}$$

The energy of the horizontal detail sub image at level J is:

$$E_h^J = \sum_x \sum_y [I_{LH}^{(J)}(x, y)]^2, J = 1, 2, 3 \tag{3}$$

The energy of the vertical detail sub image at level J is:

$$E_v^J = \sum_x \sum_y [I_{HL}^{(J)}(x, y)]^2, J = 1, 2, 3 \tag{4}$$

The energy of the diagonal detail sub image at level J is:

$$E_d^J = \sum_x \sum_y [I_{HH}^{(J)}(x, y)]^2, J = 1, 2, 3 \quad (5)$$

And the normalized energy of each decomposed sub image is defined as:

$$E^J = E_s^J + E_h^J + E_v^J + E_d^J \quad (6)$$

$$E_v^J = \frac{E_v^J}{E^J} \quad (7)$$

$$E_h^J = \frac{E_h^J}{E^J} \quad (8)$$

Now we define Φ^J as the ratio of normalized vertical energy E_v^J to the normalized horizontal energy E_h^J at sub band J as follows:

$$\Phi^J = \frac{E_v^J}{E_h^J} \quad (9)$$

It is obvious that for a longitudinal crack, E_v^J is bigger than E_h^J and for a transverse crack E_h^J is bigger than E_v^J . So if Φ^J is bigger than 1, then WSF suggests that the input image is a longitudinal crack and if it is less than 1, the WSF suggests that the input image is a transverse crack.

4.4 Histogram

From the pre-processed input image two kinds of histograms are calculated, a vertical histogram and a horizontal histogram. The vertical histogram of a binary image is defined as the number of non-zero values in each column and the horizontal histogram of a binary image is defined as the number of non-zero values in each row. Based on these definitions for a given $n \cdot m$ image formula (10) and (11) are introduced as vertical histogram and horizontal histogram, respectively.

$$V_H(j) = \sum_{i=1}^n I(i, j) \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$H_H(i) = \sum_{j=1}^m I(i, j) \quad i = 1, \dots, n \quad (11)$$

Histograms show a clear pattern of a crack. If a crack is developed in a longitudinal direction, there is a clear peak in the vertical histogram and has a smooth or constant variation in the horizontal histogram. Instead, if a crack is developed in a transverse direction, there is a clear peak in the horizontal histogram and has a constant variation in the vertical histogram. If a crack is an alligator crack, the peaks can be found in both vertical and horizontal directions. For a block crack, peaks can be also found in both histograms but with a magnitude lower than those of an alligator crack.

To find a way for using the abilities of histogram method we proposed using the mean value of each vertical histogram and horizontal histogram as follows:

$$\alpha_v = \frac{1}{m} \sum_1^m V_H(j) \quad (12)$$

$$\alpha_h = \frac{1}{n} \sum_1^n H_H(j) \quad (13)$$

Where α_v and α_h are the mean or dc value of vertical histograms and horizontal histograms, respectively. One advantage of using the mean values of histogram is that it gives a position invariant measure of the input image because if the crack is shifted across the horizontal or vertical direction then α_v and α_h are not changed.

4.5 Proximity

The mean values of horizontal histogram for longitudinal and transverse cracks are very close to each other and so the segregation between these two cracks is poor. To remedy this problem

we define a proximity measure as an alternative as Vertical Proximity and Horizontal Proximity by equation 14 and 15, respectively.

$$\Omega_v = \sum_{j=1}^{m-1} |V_H(j+1) - V_H(j)| \quad (14)$$

$$\Omega_h = \sum_{i=1}^{n-1} |H_H(i+1) - H_H(i)| \quad (15)$$

From the above equations it can be seen that proximity is computed by accumulating the differences between adjacent histogram values. The low value of proximity indicates that there is little difference between any of the columns or rows for the input image.

It is clear that the vertical proximity for a longitudinal is bigger than vertical proximity in a transverse crack and vice versa.

4.6 Judge

Now, we are ready to produce a suitable feature vector for each described class. A Multi Layer Perceptron (MLP) is used to classify each image. The feature vector in class A is

$$F_A = \{\Phi^{(1)}, \Phi^{(2)}, \Phi^{(3)}, \alpha_v, \alpha_h, \Omega_v, \Omega_h\} \quad (16)$$

and in Class B is

$$F_B = \{\Omega_v, \Omega_h, \alpha_v, \alpha_h, \Gamma\} \quad (17)$$

4.7 Experimental results

As explained in section 1 an alligator crack is a series of interconnected cracks, which has many sided and sharp-angled pieces whereas a block crack is a pattern of rectangular pieces of asphalt surface. So we expect that the complexity and the number of regions in an alligator crack are bigger than a block crack. It is clear that the output of the RGC or Γ for alligator and block cracks is more than three other kinds. To show our claim, table 7 represents the average output

of RGC for about 45 kinds of alligator cracks, 45 kinds of block cracks, 35 kinds of longitudinal cracks, 30 kinds of transverse cracks and 60 kinds of crack free cases. Also figure 9 shows some examples of RGC operation.

Table 7 RGC output for alligator cracks

Crack Type	Average of RGC Outputs (Γ_{av})
Alligator Cracks	15.1
Block Cracks	9.2
Longitudinal	2
Transverse	2.3
Crack Free	1.1

In our experiments as shown in table 7, it is found that the output of RGC for class A (longitudinal, transverse and others) is almost smaller than 4 and it is bigger than 4 for class B (alligator and block crack). This criterion at the first node of hierarchical algorithm which is shown in fig.7 is used.

In our proposed method the RGC is used twice. Once at the first node to assign the input image into one of the class A or class B and once for determining that the image which has been assigned to class B is an alligator crack or a block crack.

In this paper, for WSF Daubechies mother wavelet D4 is adopted for image decomposition. Among all kinds of mother wavelets, Daubechies wavelets are proven to be good for image analysis and synthesis because of their compact support, more continuous derivatives, and zero integral of mother wavelets [15].

Therefore, Daubechies wavelets are chosen in our approach and then we are applied different orders of Daubechies family and we experimentally found that the 4th order is the best choice for our classification problem which leads to high classification accuracy.

The question arises here is that how to determine the number of decomposition level. To answer this question it is important to mention that too large the number of multi resolution levels lead to loss of information and

increase the processing time, whereas too small the number of multi resolution levels cannot sufficiently effective and cause to decreased the accuracy of classification. For these reasons in our proposed method the maximum decomposition level is three and sub band 3 is found to give the best results because at this level undesired small pieces, which are probably be noise, are eliminated. Naturally, we benefit by giving a higher weight to this sub band. To demonstrate the discrimination power of WSFC at sub band 3, firstly, we fed a longitudinal crack which to the WSFC which used only one decomposition level.

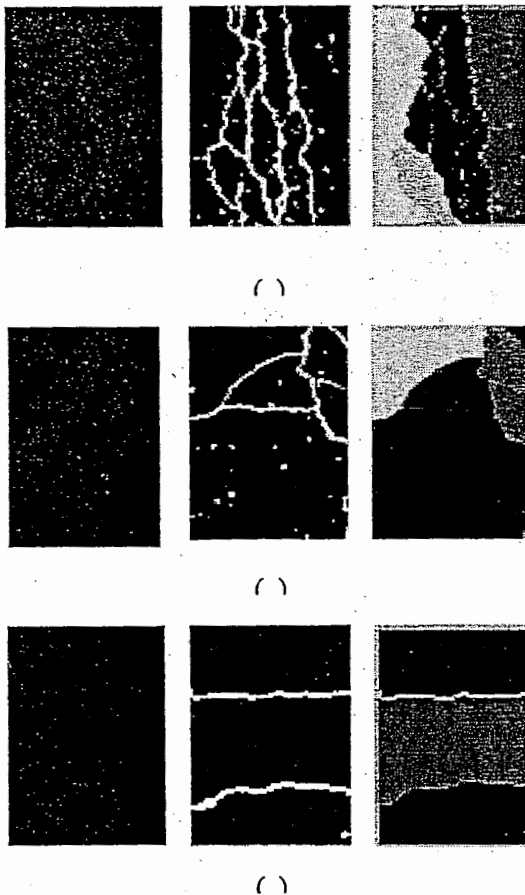


Fig. 9 RGC of three kinds of cracks (a) alligator, (b) block and (c) longitudinal

Table 8 Different parameter for various cracks

Crack Type (Class A)	Vertical Histogram	Horizontal Histogram	Vertical Proximity	Horizontal Proximity
Longitudinal	3.3476	2.2079	87.7060	54.0023
Transverse	2.5058	2.6974	41.5660	87.4742
Crack Free	0.2532	0.1715	15.9280	16.3576
Crack Type (Class B)	Vertical Histogram	Horizontal Histogram	Vertical Proximity	Horizontal Proximity
Alligator Block	10.1518	6.8771	164.6673	136.8471
	5.6969	3.8592	90.9989	125.4437

Unfortunately it misclassified as a transverse crack. Now to remedy this problem, we are also used the 3rd decomposition level and look at the result. Fortunately, the classification is successful. It is the preference of the WSFC rather than the Histogram method.

Table 8 shows the corresponding mean values α_v and α_h for crack free types are very small (less than 1). In class A vertical and horizontal histogram have no significant differences, but vertical and horizontal proximity can be used for recognition. For class B the table shows, all parameters for alligator cracks are bigger than corresponding parameters of block

cracks. It is obvious there is a significant difference between vertical proximity for alligator and block cracks.

5 Conclusions

As the experimental results show the three methods can classify different cracks reasonably correct. The Fuzzy method is very simple for classifying cracks in four groups, but it can not recognize other distresses. If the severity of cracks is the objective of investigation, this method doesn't work properly. The MLP method is not as simple as fuzzy method, but it can use for identifying any kind of distress and severity of them. The problem with MLP method is the size of image. If the size of image is big the number of neurons is high and the network become diverges. The third method classified crack free images with 100% accuracy. The crack images are classified to transverse, longitudinal, block and alligators with 98%, 90%, 89% and 88% accuracy, respectively. This method is fast, in 0.324 seconds the program classifies each image. As the algorithm is easy, Hardware implementation is easy with low cost. This method is free from the disadvantage of two other methods.

Acknowledgement

Authors express their thanks to research affair in Shahrood University of Technology in Iran for their financial support of this research.

References:

- [1] H. D. Cheng et al, Novel Approach to Pavement Cracking Detection Based on Fuzzy Set Theory, *Journal of computing in civil Engineering*, October 1999.
- [2] D. Kaur and D. Tekkedil, Fuzzy Expert System for Asphalt Pavement Performance Prediction, *IEEE Intelligent transportation systems Conference Proceedings*, 1-3 October 2000.
- [3] K. Sarabandi and E. S. Li, Polarimetric Characterization of Debris and Faults in the Highway Environment at Millimeter Wave Frequencies, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol, 48, No. 11, November 2000.
- [4] A. C. Heath et al, Modeling Longitudinal, corner and Transverse Cracking in Joint Concrete Pavements, *International Journals of Pavement Engineering*, Vol. 4 (1), March 2003.
- [5] C. J. Chao and F. P. Cheng, Fuzzy Pattern Recognition Model for Diagnosing Cracks in RC Structures, *Journal of computing in civil Engineering*, Vol. 12, No. 2, April 1998.
- [6] T. Tomikawa, A Study of Road Crack Detection by Meta-Genetic Algorithm, *IEEE AFRICON*, Vol. 1, 28 Sept. -1 Oct, 1999.
- [7] C. Scheffy and E. Diaz, Asphalt Concrete Fatigue Crack Monitoring and Analysis Using Digital Image Analysis Techniques, *International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Reno, Nevada, 18-20 October, 1999.
- [8] H. Ghasemzadeh Tehrani, H. Toossian Shandiz, Fuzzy Algorithm for classification Road Crack Preprocessind Digital, 3th international Iranian conference on Machin Vision and Image Processing, Tehran, Iran, 25-25 February 2005.
- [9] H. Toossian Shandiz, H. Ghasemzadeh Tehrani, H. Hadizadeh, *Using Multi Layer Perceptron Network to Classify Road Cracks*, 6th WSEAS international conference on Neural Network, Fuzzy Systems, Evolutionary Computing, Lisbon, Portugal, 16-18 June 2005.
- [10] R. E. Bellman, L. A. Zadeh, *Decision Making in a Fuzzy Environment*, *Management Science*, 17-4, 1970.
- [11] N. K. Kasabov, *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*, MIT Press, Second Printing 1998.
- [12] Y. Liu et al, Inspection of Defects in Optical Fibers Based on Back Propagation Neural networks, *Elsevier Journal of Optics Communications*, Vol. 198, November 2001.
- [13] B. Ravi and M. H. ang, Fuzzy Logic Based Character Recognizer, *Proceedings of the Computing Science Congress (PCSC)*, 2000.
- [14] A. K. Jain, *Fundamentals of Digital ImageProcessing*, Prentice Hall, 1989.
- [15] J. Ze et al, Content-based Image Indexing and Searching Using Daubechies Wavelets, *International Journal of Digital Libraries*, P311-328, 1997.

From: <icap2006@agoracom.qc.ca>
To: <H_Ghasemzadeh@shahrood.ac.ir>
Date: 09/08/2005 08:54 PM
Subject: ICAP 2006 - Status of your abstract

Dear Mr. Hosein Ghasemzadeh Tehrani

Thank you very much for your submitting an abstract to the 10th International Conference on Asphalt Pavements. More than 350 abstracts were submitted and evaluated by the technical committee of the conference.

I am pleased to inform you that the technical committee has recommended that you be invited to prepare your proposed paper entitled **Detection and Classification of Road Cracks Using Digital Image Processing** for presentation and publication consideration. You are therefore invited to submit a full manuscript paper by January 6, 2006, at the latest. Complete instructions on manuscript format and submission instructions will be available on the ICAP web site before the end of September. The paper will be peer reviewed and a final decision on presentation at the conference and publication in the conference proceedings will be based on the recommendation of the reviewers.

For the latest information on the conference please visit the conference website at <http://www.icap2006.fsg.ulaval.ca/>. Information on conference registration and accommodation will be available on the site early in 2006.

We are looking forward to seeing you in Quebec City next year.

Guy Doré
Conference co-chair
Chairman of the technical committee
ICAP 2006

Attachments:

پیوست ب

لیست برنامه‌های کامپیوتری


```

Calculating Histogram
%Horizontal
clc
clear
mean_val=0;
for k=2:2
    icn=num2str(k);
    filename=['c:\Neural_Ram\NotSeen\Stamp\t' icn];
im=imread(filename,'bmp');
im=rgb2gray(im);
im=double(im);
[m,n]=size(im);
for i=1:m
    sm=0;
    for j=1:n
        sm=sm+(1-im(i,j)/255);
    end
    HH(i)=sm;
end
mn=0;
for h=1:m
    mn=mn+HH(h);
end
men=mn/m;
mean_val=mean_val+men;
mns=num2str(men);
tit=['dc=' mns];
sumhp=0;
for j=1:(m-1)
    sumhp=sumhp+abs(HH(j+1)-HH(j));
end
HP(k)=sumhp;
xaxis=[1:m];
%figure
axis off
%subplot(7,5,k),plot(xaxis,HH),title(tit),hold on;,plot(xaxis,men,'r')
end
mean_value_Horiz=mean_val/1
%-----
%Vertical
figure
mean_val=0;
for k=2:2
    icn=num2str(k);
    filename=['c:\Neural_Ram\NotSeen\Stamp\t' icn];
im=imread(filename,'bmp');
im=rgb2gray(im);
im=double(im);
[m,n]=size(im);
for j=1:n
    sm=0;
    for i=1:m
        sm=sm+(1-im(i,j)/255);
    end
    VH(j)=sm;

```

```
end
mn=0;
for h=1:n
    mn=mn+VH(h);
end
men=mn/n;
mean_val=mean_val+men;
mns=num2str(men);
tit=['dc=' mns];
%proximity
svp=0;
for j=1:(n-1)
    svp=svp+abs(VH(j+1)-VH(j));
end
VP(k)=svp;
xaxis=[1:n];
%figure
axis off
%subplot(7,5,k),plot(xaxis,VH),title(tit),hold on;,plot(xaxis,men,'r')
end
mean_value_Vert=mean_val/1
%-----
%xaxis=[1:35];
%figure,plot(xaxis,HP)
%figure,plot(xaxis,VP)
mean_HP=mean(HP)
mean_VP=mean(VP)
max_HP=max(HP);
max_VP=max(VP);
```

Calculating Wavelet Parameter

```
clc
clear
%load tol3_bin
a=imread('c:\mlp\fr25.bmp');
b=rgb2gray(a);
k=double(b);
[ca1,ch1,cv1,cd1] = dwt2(k,'db1');

[x,y]=size(ca1);
ena=0;
env=0;
enh=0;
endig=0;
for i=1:x
    for j=1:y
        ena=ena+(ca1(i,j))^2;
        enh=enh+(ch1(i,j))^2;
        env=env+(cv1(i,j))^2;
        endig = endig+(cd1(i,j))^2;
    end
end
energy_app=ena/(x*y)
energy_horiz=enh/(x*y)
energy_vert=env/(x*y)
energy_dig=endig/(x*y)

sm=energy_horiz+energy_vert+energy_dig;
eng=[energy_horiz/sm,energy_vert/sm,energy_dig/sm,energy_horiz/energy_vert]
```

```

Delphi Program
object mlpDemoForm: TmlpDemoForm
  Left = 32
  Top = 120
  Width = 942
  Height = 591
  Caption = 'RAM'
  Color = clBtnFace
  Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
  Font.Color = clWindowText
  Font.Height = -11
  Font.Name = 'MS Sans Serif'
  Font.Style = []
  OldCreateOrder = False
  OnCreate = FormCreate
  PixelsPerInch = 96
  TextHeight = 13
object Label2: TLabel
  Left = 8
  Top = 8
  Width = 895
  Height = 19
  Caption =
    'MLP Neural Network for clasifying road cracks ' +
    'cracks,By:Hadi Hadizadeh, Dr. Heydar toosian Shandiz and Hosein Ghasemzadeh Tehrani'
  Font.Charset = ARABIC_CHARSET
  Font.Color = clWindowText
  Font.Height = -16
  Font.Name = 'Tahoma'
  Font.Style = [fsBold]
  ParentFont = False
end
object InitialisingGroupBox: TGroupBox
  Left = 8
  Top = 40
  Width = 297
  Height = 505
  Caption = 'Initialising'
  TabOrder = 0
  object numberOfInputsLabel: TLabel
    Left = 48
    Top = 48
    Width = 116
    Height = 13
    Caption = 'Number of input neurons'
  end
  object NumberOfHiddensLabel: TLabel
    Left = 48
    Top = 96
    Width = 180
    Height = 13
    Caption = 'Number of neurons in first hidden layer'
  end
  object numberOfHiddens2Label: TLabel
    Left = 48

```

```
Top = 144
Width = 199
Height = 13
Caption = 'Number of neurons in second hidden layer'
end
object numberOfOutputsLabel: TLabel
Left = 48
Top = 192
Width = 159
Height = 13
Caption = 'Number of neurons in output layer'
end
object TopologyLabel: TLabel
Left = 48
Top = 24
Width = 53
Height = 13
Caption = 'Topology'
Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -11
Font.Name = 'MS Sans Serif'
Font.Style = [fsBold]
ParentFont = False
end
object TransferFunctionsLabel: TLabel
Left = 48
Top = 256
Width = 104
Height = 13
Caption = 'Transfer functions'
Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
Font.Color = clWindowText
Font.Height = -11
Font.Name = 'MS Sans Serif'
Font.Style = [fsBold]
ParentFont = False
end
object TransFuncHiddLayerLabel: TLabel
Left = 48
Top = 280
Width = 87
Height = 13
Caption = 'in first hidden layer'
end
object TransFuncHiddLayer2Label: TLabel
Left = 48
Top = 328
Width = 106
Height = 13
Caption = 'in second hidden layer'
end
object transFuncOutputLayerLabel: TLabel
Left = 48
Top = 376
```

```
Width = 66
Height = 13
Caption = 'in output layer'
end
object trainingButton: TButton
Left = 40
Top = 432
Width = 209
Height = 25
Caption = 'Choose trainingdata and initialise net'
TabOrder = 0
Visible = False
OnClick = trainingButtonClick
end
object numbOfInputsEdit: TEdit
Left = 48
Top = 64
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 1
Text = 'numbOfInputsEdit'
OnExit = numbOfInputsEditExit
end
object numbOfHiddensEdit: TEdit
Left = 48
Top = 112
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 2
Text = 'numbOfHiddensEdit'
OnExit = numbOfHiddensEditExit
end
object numbOfHiddens2Edit: TEdit
Left = 48
Top = 160
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 3
Text = 'numbOfHiddens2Edit'
OnExit = numbOfHiddens2EditExit
end
object numbOfOutputsEdit: TEdit
Left = 48
Top = 208
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 4
Text = 'numbOfOutputsEdit'
OnExit = numbOfOutputsEditExit
end
object HiddenLayer2ActivatedCheckBox: TCheckBox
Left = 184
Top = 160
Width = 73
Height = 17
```

```
    Caption = 'Activated'
    TabOrder = 5
    OnClick = HiddenLayer2ActivatedCheckBoxClick
end
object TransFuncHiddLayerComboBox: TComboBox
    Left = 48
    Top = 296
    Width = 145
    Height = 21
    ItemHeight = 13
    TabOrder = 6
    Text = 'fermi'
    OnChange = TransFuncHiddLayerComboBoxChange
    Items.Strings = (
        'tanh'
        'fermi'
        'id')
end
object TransFuncHidd2LayerComboBox: TComboBox
    Left = 48
    Top = 344
    Width = 145
    Height = 21
    ItemHeight = 13
    TabOrder = 7
    Text = 'id'
    OnChange = TransFuncHidd2LayerComboBoxChange
    Items.Strings = (
        'tanh'
        'fermi'
        'id')
end
object TransFuncOutputLayerComboBox: TComboBox
    Left = 48
    Top = 392
    Width = 145
    Height = 21
    ItemHeight = 13
    TabOrder = 8
    Text = 'id'
    OnChange = TransFuncOutputLayerComboBoxChange
    Items.Strings = (
        'tanh'
        'fermi'
        'id')
end
object Button1: TButton
    Left = 40
    Top = 432
    Width = 201
    Height = 25
    Caption = 'Choose Training Data and Initializing'
    TabOrder = 9
    OnClick = Button1Click
end
```

```
end
object LearningGroupBox: TGroupBox
  Left = 320
  Top = 40
  Width = 297
  Height = 505
  Caption = 'Learning'
  TabOrder = 1
  object numbOfCyclesLabel: TLabel
    Left = 40
    Top = 112
    Width = 146
    Height = 13
    Caption = 'Max. number of learning cycles'
  end
  object ErrorBoundLabel: TLabel
    Left = 40
    Top = 208
    Width = 55
    Height = 13
    Caption = 'Error bound'
  end
  object MomentumLabel: TLabel
    Left = 40
    Top = 280
    Width = 102
    Height = 13
    Caption = 'Momentum parameter'
  end
  object Label1: TLabel
    Left = 24
    Top = 440
    Width = 85
    Height = 13
    Caption = 'Process Progress:'
  end
  object Label3: TLabel
    Left = 176
    Top = 440
    Width = 3
    Height = 13
  end
  object LearningButton: TButton
    Left = 40
    Top = 48
    Width = 209
    Height = 25
    Caption = 'Start learning process'
    TabOrder = 0
    OnClick = LearningButtonClick
  end
  object numbOfCyclesEdit: TEdit
    Left = 40
    Top = 128
    Width = 121
```



```
Height = 21
TabOrder = 1
OnExit = numbOfCyclesEditExit
end
object errorCheckBox: TCheckBox
Left = 40
Top = 184
Width = 97
Height = 17
Caption = 'Error bound set'
TabOrder = 2
end
object ErrorBoundEdit: TEdit
Left = 40
Top = 224
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 3
OnExit = ErrorBoundEditExit
end
object MomentumEdit: TEdit
Left = 40
Top = 296
Width = 121
Height = 21
TabOrder = 4
OnExit = MomentumEditExit
end
object DivergeCheckBox: TCheckBox
Left = 168
Top = 184
Width = 97
Height = 17
Caption = 'Divergence Flag'
TabOrder = 5
end
object ProgressBar1: TProgressBar
Left = 24
Top = 464
Width = 249
Height = 17
Min = 0
Max = 100
TabOrder = 6
end
end
object VerifyingGroupBox: TGroupBox
Left = 632
Top = 40
Width = 297
Height = 505
Caption = 'Verifying'
TabOrder = 2
object trainingOutputButton: TButton
Left = 24
```

```

Top = 48
Width = 257
Height = 25
Caption = 'Outputs of the net with training inputs'
TabOrder = 0
OnClick = trainingOutputButtonClick
end
object testButton: TButton
Left = 24
Top = 176
Width = 257
Height = 25
Caption = 'Choose testdata and show outputs of the net'
TabOrder = 1
OnClick = testButtonClick
end
object Button3: TButton
Left = 96
Top = 216
Width = 89
Height = 25
Caption = 'Save Weights'
TabOrder = 2
OnClick = Button3Click
end
object Button4: TButton
Left = 96
Top = 248
Width = 89
Height = 25
Caption = 'Load Weights'
TabOrder = 3
OnClick = Button4Click
end
end
object OpenFileDialog: TOpenDialog
InitialDir = 'c:\users\hadamschek\eigeneKomponenten\mlpnet1.0'
Left = 848
Top = 40
end
object MLPNet: TTedMLPNet
WeightMin = -1
WeightMax = 1
SeedWeights = -1
TransFuncHiddLayer = fermi
TransFuncHiddLayer2 = id
TransFuncOutputLayer = id
LearningRateHiddenLayer = 0.05
LearningRateHiddenLayer2 = 0.05
LearningRateOutputLayer = 0.05
TrainingPattern.TrainingValues = ( 3 2 ( 0 1) 4 ( 1 1 1 1) 2
5 2) 4 ( 3 1 1 1) 2 ( -1 2) 4 ( -1 1 1 1))
Left = 888
Top = 16
end

```

```
object SaveDialog1: TSaveDialog
  Left = 160
  Top = 392
end
object OpenFileDialogw: TOpenDialog
  Left = 152
  Top = 368
end
object Timer1: TTimer
  Enabled = False
  OnTimer = Timer1Timer
  Left = 304
  Top = 32
end
object Timer2: TTimer
  Enabled = False
  OnTimer = Timer2Timer
  Left = 256
  Top = 32
end
object Timer3: TTimer
  Enabled = False
  OnTimer = Timer3Timer
  Left = 624
  Top = 368
end
End
```

```
object TrainingPatternForm: TTrainingPatternForm
  Left = 522
  Top = 317
  Width = 384
  Height = 242
  Caption = 'Training Pattern'
  Color = clBtnFace
  Font.Charset = DEFAULT_CHARSET
  Font.Color = clWindowText
  Font.Height = -11
  Font.Name = 'MS Sans Serif'
  Font.Style = []
  OldCreateOrder = False
  OnCreate = FormCreate
  OnDestroy = FormDestroy
  PixelsPerInch = 96
  TextHeight = 13
  object numberofTrainValuesLabel: TLabel
    Left = 131
    Top = 40
    Width = 3
    Height = 13
  end
  object CloseButton: TButton
    Left = 232
    Top = 96
    Width = 75
    Height = 25
    Caption = 'close'
    TabOrder = 0
    OnClick = CloseButtonClick
  end
  object loadDataButton: TButton
    Left = 72
    Top = 96
    Width = 105
    Height = 25
    Caption = 'choose training data'
    TabOrder = 1
    OnClick = loadDataButtonClick
  end
  object TrainingDataOpenDialog: TOpenDialog
    Left = 48
    Top = 24
  end
end
```