

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

تحلیل نویزهای ناهمواری دستگاه RSP برای تشخیص ترک‌ها و چاله‌های روسازی
نمونه موردی: راه‌های استان خراسان رضوی

نگارنده

مهدی فاضلی نیا

استاد راهنما

دکتر حسین قاسم زاده تهرانی

استاد مشاور

دکتر عباس محمدی

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده: مهندسی عمران
گروه: راه و ترابری
پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی فاضلی نیا

تحت عنوان:

تحلیل نویزهای ناهموازی دستگاه RSP برای تشخیص ترک‌ها و چاله‌های روسازی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد
ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	استاد راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: حسین قاسم زاده تهرانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: سعید گلیان		نام و نام خانوادگی: ایمان آقایان
			نام و نام خانوادگی: عبدالاحد چوپانی

تقدیم به
دریای مهربانی
پدر و مادر عزیزم

شکر خدای بخشنده و مهربان که همواره لطف بی دریغ خود را شامل حال این بنده می‌دارد.

در اینجا بر خود لازم می‌بینم از زحمات استاد بزرگوار جناب آقای دکتر حسین قاسم زاده تهرانی، که در تهیه این پایان‌نامه به عنوان استاد راهنما، قبول زحمت فرمودند و صمیمانه بنده را از راهنمایی‌های سودمندشان برخوردار نمودند، تشکر فراوان نمایم.

از پدر، مادر و برادر مهربانی که در طی تحصیل در نهایت آرامش، همواره مشوّق و حامی اصلی من در این راه بوده‌اند، نهایت سپاسگزاری را دارم. جبران نمودن تنها گوشه‌ای از زحمات این عزیزان، آرزوی من در زندگی است.

مهدی فاضلی نیا

زمستان ۱۳۹۵

تعهدنامه

اینجانب مهدی فاضلی نیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل نویزهای ناهمواری دستگاه RSP برای تشخیص ترک‌ها و چاله‌های روسازی تحت راهنمایی دکتر حسین قاسم زاده تهرانی متعهد می‌شوم.

❖ تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

❖ در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

❖ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ

جا ارائه نشده است.

❖ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه

صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.

❖ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از

پایان نامه رعایت می‌گردد.

❖ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و

اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل

رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

۱۳۹۵/۱۰/۳۰



مالکیت نتایج و حق نشر

❖ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم

افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید

به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

❖ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

ناهمواری یک شاخص با اهمیت در رابطه با راحتی حرکت و ایمنی راه است. رانندگی در راه‌های ناهموار به معنی فقدان راحتی، کاهش سرعت و خرابی احتمالی وسیله نقلیه است. یکی از دلایل بوجود آمدن ناهمواری، وجود ترک‌ها و چاله‌هاست.

RSP یکی از دستگاه‌های ناهمواری‌سنج می‌باشد که پروفیل طولی راه را به دست می‌دهد. این پروفیل خام را می‌توان برای رسیدن به اهداف گوناگون با روش‌های متنوع تصفیه کرد. روش مورد استفاده در این تحقیق مبتنی بر تحلیل موجک می‌باشد.

این پژوهش ابتدا به بررسی مبانی و مفاهیم ناهمواری، معرفی تجهیزات مختلف برای اندازه‌گیری ناهمواری پرداخته و سپس به معرفی روش‌های فیلتراسیون و نحوه فیلتر کردن داده‌های ناهمواری به وسیله‌ی یکی از این روش‌ها (تحلیل موجک) می‌پردازد؛ در روش‌های مرسوم نويزها از سیگنال اصلی حذف شده و تحلیلی بر روی آن‌ها صورت نمی‌گیرد، اما از آنجایی که بخشی از این نويزها ناشی از ترک‌های موجود در سطح راه‌ها می‌باشد لذا در این تحقیق از آن‌ها برای شناسایی و تشخیص انواع ترک‌ها استفاده شده است؛ در ادامه به ارائه‌ی یک مجموعه از پارامترهای جدید پرداخته خواهد شد که بتوانند با ایجاد رابطه‌ای منطقی با شاخص ترک و چاله، میزان وجود آن‌ها در هر بخش از روسازی راه را پیش‌بینی کنند. این پارامترها عبارتند از: سیگنال اصلی، مؤلفه‌ی تقریب و مؤلفه‌ی جزئیات، مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات، مشخصه‌ی شیب مؤلفه‌ی جزئیات، مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای ۶ بازه‌ی مختلف طول (۲، ۳، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ واحد طول).

نتایج نهایی تحقیق حاکی از توانایی بالای مدل ارائه شده برای شناسایی ترک‌های عرضی، بلوکی و پوست‌سوسماری می‌باشد. همچنین نتیجه می‌شود که این روش قادر به شناسایی مطلوب ترک طولی و چاله نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: ناهمواری، تحلیل موجک، فیلتراسیون، ترک، چاله، شاخص ترک.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- معرفی موضوع	۳
۳-۱- نوآوری تحقیق	۶
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق	۶
۵-۱- معرفی ساختار پایان نامه	۷

فصل دوم: روش تحقیق

۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- پروفیل سنج Dynatest Mark IV (RSP)	۱۰
۱-۲-۲- معرفی	۱۰
۲-۲-۲- اساس اندازه گیری	۱۱
۳-۲-۲- مزیت ها	۱۱
۳-۲- ترک خوردگی های روسازی	۱۲
۱-۳-۲- ترک خوردگی عرضی	۱۲
۲-۳-۲- ترک خوردگی طولی	۱۲
۳-۳-۲- ترک خوردگی پوست سوسماری	۱۳
۴-۳-۲- ترک خوردگی بلوکی	۱۳
۵-۳-۲- چاله	۱۴
۴-۲- شاخص ناهمواری بین المللی (IRI)	۱۴
۱-۴-۲- تاریخچه IRI	۱۴
۲-۴-۲- خصایص آنالیز IRI	۱۷
۳-۴-۲- تعیین IRI	۱۸
۵-۲- نحوه ی تصفیه داده های پروفیل ناهمواری	۱۹
۱-۵-۲- مفهوم فیلتر	۱۹
۲-۵-۲- روش میانگین حرکت برای فیلتر کردن	۲۱
۳-۵-۲- سیگنال های سینوسی	۲۴
۴-۵-۲- مفهوم پاسخ فرکانس	۲۵

۲۸	۲-۵-۴-۱- فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر
۲۹	۲-۵-۵- مفهوم PSD
۳۳	۲-۶-۱- تحلیل موجک
۳۳	۲-۶-۱- کلیات روش موجک
۳۵	۲-۶-۲- تعریف موجک
۳۶	۲-۶-۳- خواص یک تابع موجک
۳۷	۲-۶-۴- روش کار تبدیلات موجک
۳۸	۲-۶-۵- روش کار تئوری موجک در نرم افزار متلب
۴۱	۲-۶-۶- اعمال فیلتر موجک

فصل سوم: پیشینه‌ی تحقیق

۴۶	۳-۱- مقدمه
۴۶	۳-۲- تاریخچه‌ی تحلیل ناهمواری و روش‌های تشخیص ترک
۴۶	۳-۲-۱- مقاله ۱: آنالیز ناهمواری راه با استفاده از تئوری موجک
۵۰	۳-۲-۲- مقاله ۲: استفاده از پردازش سیگنال برای آنالیز و اندازه‌گیری ناهمواری راه
۵۲	۳-۲-۳- مقاله ۳: تقسیم‌بندی خودکار ترک‌ها با استفاده از روش آستانه‌یابی تصاویر
۵۴	۳-۲-۴- مقاله ۴: طبقه‌بندی خودکار داده‌های ناهمواری راه با استفاده از روش موجک
۵۷	۳-۲-۵- مقاله ۵: یک روش جدید برای آنالیز توپوگرافی سطح راه
۶۰	۳-۲-۶- مقاله ۶: نرمال کردن فرکانس تبدیل موجک برای آنالیز ناهمواری راه
۶۲	۳-۲-۷- مقاله ۷: روش شناسایی خودکار چاله‌ها، ترک‌ها و وصله‌ها با استفاده از فیلم‌های ضبط شده از سطح راه
۶۳	۳-۲-۸- مقاله ۸: اندازه‌گیری عدد IRI با استفاده از روبات خودکار P3-AT
۶۵	۳-۲-۹- مقاله ۹: شناسایی ترک‌های روسازی بر اساس FDWT
۶۶	۳-۲-۱۰- مقاله ۱۰: بهبود ارتباط بین ناهمواری و خرابی‌های قابل مشاهده‌ی سطح راه

فصل چهارم: جمع‌آوری داده‌ها

۷۰	۴-۱- مقدمه
۷۰	۴-۲- ارزیابی میدانی
۷۵	۴-۳- معرفی شاخص‌های ارزیابی
۷۵	۴-۳-۱- شاخص اول: سیگنال اصلی
۷۵	۴-۳-۲- شاخص دوم و سوم: مؤلفه‌ی تقریب و مؤلفه‌ی جزئیات
۷۶	۴-۳-۳- شاخص چهارم: مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات

۷۷	۴-۳-۴- شاخص پنجم: مشخصه‌ی شیب مؤلفه‌ی جزئیات
۷۹	۵-۳-۴- شاخص‌های ششم تا یازدهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات
	۴-۳-۵-۱- شاخص ششم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۲ واحد
۷۹	طول
	۴-۳-۵-۲- شاخص هفتم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۳ واحد
۸۰	طول
	۴-۳-۵-۳- شاخص هشتم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۴ واحد
۸۱	طول
	۴-۳-۵-۴- شاخص نهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۶ واحد
۸۲	طول
	۴-۳-۵-۵- شاخص دهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۸ واحد
۸۳	طول
	۴-۳-۵-۶- شاخص یازدهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۱۰ واحد
۸۴	طول

فصل پنجم: بررسی و تحلیل داده‌ها

۸۸	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- بررسی شاخص‌ها
۸۸	۵-۲-۱- ضریب همبستگی پیرسون
۸۹	۵-۲-۱-۱- محاسبه ضریب همبستگی پیرسون
۸۹	۵-۲-۱-۲- تفسیر ضریب همبستگی پیرسون
۹۰	۵-۲-۲- شناسایی شاخص‌های همبسته با هر خرابی
۹۰	۵-۲-۲-۱- شاخص‌های همبسته با ترک عرضی
۹۱	۵-۲-۲-۲- شاخص‌های همبسته با ترک طولی
۹۲	۵-۲-۲-۳- شاخص‌های همبسته با ترک بلوکی
۹۲	۵-۲-۲-۴- شاخص‌های همبسته با ترک پوست سوسماری
۹۳	۵-۲-۲-۵- شاخص‌های همبسته با چاله
۹۴	۵-۳- شاخص ترک
۹۴	۵-۳-۱- شاخص ترک عرضی
۹۵	۵-۳-۲- شاخص ترک طولی
۹۵	۵-۳-۳- شاخص ترک بلوکی
۹۶	۵-۳-۴- شاخص ترک پوست سوسماری

۹۶	 ۵-۳-۵ شاخص چاله
۹۷	 ۵-۴-۴ مدل پیش بینی خرابی
۹۷	 ۵-۴-۱ مدل پیش بینی ترک عرضی
۹۹	 ۵-۴-۲ مدل پیش بینی ترک طولی
۱۰۱	 ۵-۴-۳ مدل پیش بینی ترک بلوکی
۱۰۳	 ۵-۴-۴ مدل پیش بینی ترک پوست سوسماری
۱۰۵	 ۵-۴-۵ مدل پیش بینی چاله
۱۰۷	 ۵-۵ نتایج نهایی

فصل ششم: جمع بندی و نتیجه گیری

۱۱۰	 ۶-۱ مقدمه
۱۱۰	 ۶-۲ نتایج تحقیق
۱۱۱	 ۶-۳ پیشنهاد ادامه کار
۱۱۳	 منابع
۱۱۵	 پیوست ۱: کدهای ورودی به نرم افزار متلب
۱۱۹	 پیوست ۲: مقادیر شاخص های ارزیابی برای ۳۰۰ متر از مسیر مورد مطالعه

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱- نمونه ای یک متری از اطلاعات خروجی دستگاه RSP	۷۱
جدول ۵-۱- تفسیر بازه‌های مختلف ضریب همبستگی	۹۰
جدول ۵-۲- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک عرضی با شدت‌های مختلف آن ترک	۹۱
جدول ۵-۳- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک طولی با شدت‌های مختلف آن ترک	۹۱
جدول ۵-۴- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک بلوکی با شدت‌های مختلف آن ترک	۹۲
جدول ۵-۵- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک پوست سوسماری با شدت‌های مختلف آن ترک	۹۳
جدول ۵-۶- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته چاله با شدت‌های مختلف آن	۹۳
جدول ۵-۷- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک عرضی با شاخص ترک آن	۹۸
جدول ۵-۸- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک عرضی	۹۹
جدول ۵-۹- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک طولی با شاخص ترک آن	۹۹
جدول ۵-۱۰- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک طولی	۱۰۱
جدول ۵-۱۱- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک بلوکی با شاخص ترک آن ..	۱۰۱
جدول ۵-۱۲- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک بلوکی	۱۰۳
جدول ۵-۱۳- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک پوست سوسماری با شاخص ترک آن	۱۰۴
جدول ۵-۱۴- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک پوست سوسماری	۱۰۵
جدول ۵-۱۵- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته چاله با شاخص ترک آن	۱۰۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- پروفیل تشکیل شده از مجموعه‌ای از سینوسی‌ها.....	۴
شکل ۲-۱- سیگنال اصلی.....	۵
شکل ۳-۱- سیگنال تصفیه شده.....	۵
شکل ۴-۱- نویزهای حذف شده از سیگنال اصلی.....	۵
شکل ۵-۱- محل‌های احتمالی وجود انواع ترک و چاله.....	۵
شکل ۱-۲- مدل یک چهارم خودرو.....	۱۵
شکل ۲-۲- میزان مجاز IRI برای گروه‌های مختلف.....	۱۶
شکل ۳-۲- همبستگی بین IRI به دست آمده از اطلاعات پروفیل و اندازه‌های خام یک سیستم نوع پاسخ.....	۱۷
شکل ۴-۲- سه پروفیل خام اندازه گیری شده.....	۱۹
شکل ۵-۲- سه پروفیل شکل ۴-۲ بعد از اعمال فیلتر.....	۲۰
شکل ۶-۲- فیلتر میانگین حرکت.....	۲۲
شکل ۷-۲- فیلتر میانگین حرکت از نوع بالاگذر با طول مبنای ۱ متر.....	۲۳
شکل ۸-۲- فیلتر میانگین حرکت متشکل از فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۵ متر و پایین‌گذر با طول مبنای ۱ متر.....	۲۴
شکل ۹-۲- فیلتر میانگین حرکت متشکل از فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۲۵ متر و پایین‌گذر با طول مبنای ۵ متر.....	۲۴
شکل ۱۰-۲- فاز ، دامنه و طول موج در یک سینوسی مبنای ۵ متر.....	۲۵
شکل ۱۱-۲- موج سینوسی فیلتر شده توسط سه فیلتر پایین‌گذر با طول مبنای ۳ ، ۵ و ۷/۵ متر.....	۲۷
شکل ۱۲-۲- نمودار دستاورد فیلتر میانگین حرکت به ازای عدد موج برای هر دو نوع فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر.....	۲۸
شکل ۱۳-۲- موج سینوسی فیلتر شده توسط سه فیلتر بالا گذر با طول مبنای ۳ ، ۵ و ۷/۵ متر.....	۲۹
شکل ۱۴-۲- پروفیل تشکیل شده از مجموعه‌ای از سینوسی‌ها.....	۳۰
شکل ۱۵-۲- پروفیل‌های دوبرخشی ۴ و ۷ با میزان IRI نسبتاً مشابه ولی با تفاوت‌های اساسی.....	۳۲
شکل ۱۶-۲- نمودارهای PSD بر اساس ارتفاع به دست آمده از پروفیل دو بخش ۴ و ۷.....	۳۲
شکل ۱۷-۲- نمودار های PSD بر اساس شیب به دست آمده از پروفیل دو بخش ۴ و ۷.....	۳۲

- شکل ۲-۱۸- طرح شماتیک یک تابع موجک ۳۵
- شکل ۲-۱۹- شیفیت زمانی یک تابع موجک ۳۷
- شکل ۲-۲۰- عمر یک تابع موجک ۳۷
- شکل ۲-۲۱- پوشش یک تابع به وسیله توابع موجک با فرکانس های مختلف ۳۹
- شکل ۲-۲۲- نحوه فیلتر یک سیگنال توسط نرم افزار متلب ۴۰
- شکل ۲-۲۳- مراحل فیلتراسیون یک تابع توسط نرم افزار متلب ۴۰
- شکل ۲-۲۴- نمونه ای از اطلاعات فایل خروجی دستگاه RSP ۴۱
- شکل ۲-۲۵- مرحله اول فیلتراسیون ۴۲
- شکل ۲-۲۶- نمودار درختی مراحل فیلتراسیون ۴۳
- شکل ۲-۲۷- مقادیر ناهمواری های حذف شده (d) و تغییرات ناهمواری (a) در پنج مرحله فیلتراسیون ۴۳
- شکل ۳-۱- نمودار پروفیل طولی برای دو جاده ی هموار و ناهموار ۵۲
- شکل ۳-۲- شناسایی ترک از روی پیکسل های تصاویر برداشتی از سطح راه با روش آستانه حرکت ۵۴
- شکل ۳-۳-الف- نمودار IRI اصلی ۵۷
- شکل ۳-۳-ب- نمودار IRI تقسیم بندی شده بر اساس میانگین ۵۷
- شکل ۳-۳-پ- نمودار IRI تقسیم بندی شده بر اساس ماکزیمم ۵۷
- شکل ۳-۴- تجزیه ی پروفیل اصلی سطح راه به نویزهایی با طول موج های مختلف با فیلتر EMD ۵۹
- شکل ۳-۵- فرایند نرمال کردن فرکانس تبدیلات موجک ۶۱
- شکل ۳-۶-الف- تصویر حقیقی و پردازش شده ی ترک پوست سوسماری ۶۲
- شکل ۳-۶-ب- تصویر حقیقی و پردازش شده ی چاله ۶۳
- شکل ۳-۷- تصویر حقیقی و پردازش شده ی چاله ۶۳
- شکل ۳-۸- نمودار IRI و مقدار محاسبه شده ی آن توسط نرم افزار پرووال ۶۴
- شکل ۳-۹- پردازش تصویر یک ترک با چهار روش ۶۶
- شکل ۳-۱۰- دستگاه ناهمواری سنج بامپ اینتگریتور ۶۶
- شکل ۳-۱۱- نمودار ارتباط بین IRI کنونی راه و IRI پیش بینی شده ناشی از خرابی های سطح راه ۶۷
- شکل ۴-۱- تصاویر مربوط به نقطه ی آغاز مسیر برداشت ۷۱
- شکل ۴-۲- موقعیت مربوط به نقطه ی آغاز و طول مسیر و جهت برداشت روی نقشه ۷۲
- شکل ۴-۳- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک عرضی معادل آن ۷۳
- شکل ۴-۴- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک طولی معادل آن ۷۳
- شکل ۴-۵- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک بلوکی معادل آن ۷۴
- شکل ۴-۶- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک پوست سوسماری معادل آن ۷۴

- شکل ۴-۷- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر چاله معادل آن ۷۵
- شکل ۴-۸- نحوه‌ی شناسایی مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات (details) ۷۷
- شکل ۴-۹- نحوه‌ی شناسایی مشخصه‌ی شیب مؤلفه‌ی جزئیات (details) ۷۸
- شکل ۴-۱۰- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۲ واحد طول ۸۰
- شکل ۴-۱۱- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۳ واحد طول ۸۱
- شکل ۴-۱۲- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۴ واحد طول ۸۲
- شکل ۴-۱۳- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۶ واحد طول ۸۳
- شکل ۴-۱۴- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۸ واحد طول ۸۳
- شکل ۴-۱۵- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۱۰ واحد طول ۸۴
- شکل ۴-۱۶- مجموعه شاخص‌های قابل استفاده برای عملیات شناسایی ترک و چاله ۸۵
- شکل ۵-۱- نمودار ارتباطی شاخص ترک عرضی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن ۹۸
- شکل ۵-۲- نمودار ارتباطی شاخص ترک طولی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن ۱۰۰
- شکل ۵-۳- نمودار ارتباطی شاخص ترک بلوکی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن ۱۰۲
- شکل ۵-۴- نمودار ارتباطی شاخص ترک پوست سوسماری با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن ۱۰۴
- شکل ۵-۵- نمودار ارتباطی شاخص چاله با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن ۱۰۶
- شکل ۶-۱- فرآیند فیلتراسیون با روش آنالیز EMD ۱۱۱

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه:

حمل و نقل از ابتدای تاریخ بشر، نقشی اساسی در شکل‌دهی جوامع انسانی و توسعه‌ی اقتصادی آن‌ها ایفا نموده است و در عصر حاضر نیز شریان‌های ارتباطی، زیربنای اقتصاد هر کشوری را تشکیل می‌دهد.

توسعه پایدار، حمل و نقل سریع و ایمن نیز همانند سایر ابعاد زندگی بشر، هنگامی تبلور پیدا می‌کند که به صورت نظام‌مند و بر اساس منطق علمی پایه‌ریزی شده باشد، در این فرآیند علمی و نظام‌مند است که نقش و جایگاه علوم حمل و نقل در توسعه پایدار و اقتصاد جوامع تجلی می‌یابد.

کیفیت و کارایی یک سیستم حمل و نقل، وابسته به راحتی و ایمنی آن است و در شبکه راه‌ها و بزرگراه‌ها میزان ناهمواری روسازی کاملاً بر سطح ایمنی حرکت و راحتی استفاده‌کنندگان تاثیرگذار است. برای یک راننده، رانندگی در راه‌های ناهموار و دارای انواع خرابیها (از جمله ترک‌ها و چاله‌ها)، به معنی فقدان راحتی، کاهش سرعت و استهلاک وسیله نقلیه است.

امروزه استفاده از روش‌های ارزیابی غیر مخرب بسیار مقبول‌تر از روش‌های ارزیابی مخرب می‌باشد، به این دلیل که روش‌های غیر مخرب در بسیاری از موارد صرفه اقتصادی و زمانی مناسب‌تری دارد و خطاهای موجود در روش‌های ارزیابی مخرب کمتر به چشم می‌خورد. از جمله این روش‌های غیر مخرب در بررسی جاده‌ها می‌توان به استفاده از دستگاه‌هایی همچون FWD^۱ و RSP^۲ و GPR^۳ اشاره کرد؛ متأسفانه هیچ یک از این دستگاه‌ها در خصوص ترک‌ها و چاله‌ها خروجی مستقیمی ارائه نمی‌کنند، اما به نظر می‌رسد که می‌توان با استفاده از داده‌های خروجی خام دستگاه RSP به نتایج مطلوبی در بررسی ترک‌ها و چاله‌ها رسید. این دستگاه نسبت به سایر روش‌های غیرمخرب، ارزان‌تر و سریع‌تر است و منجر به افزایش داده‌های مفید می‌شود.

۱- Falling Weight Deflectometer

۲- Road Surface Profiler

۳- Ground Penetrating Radar

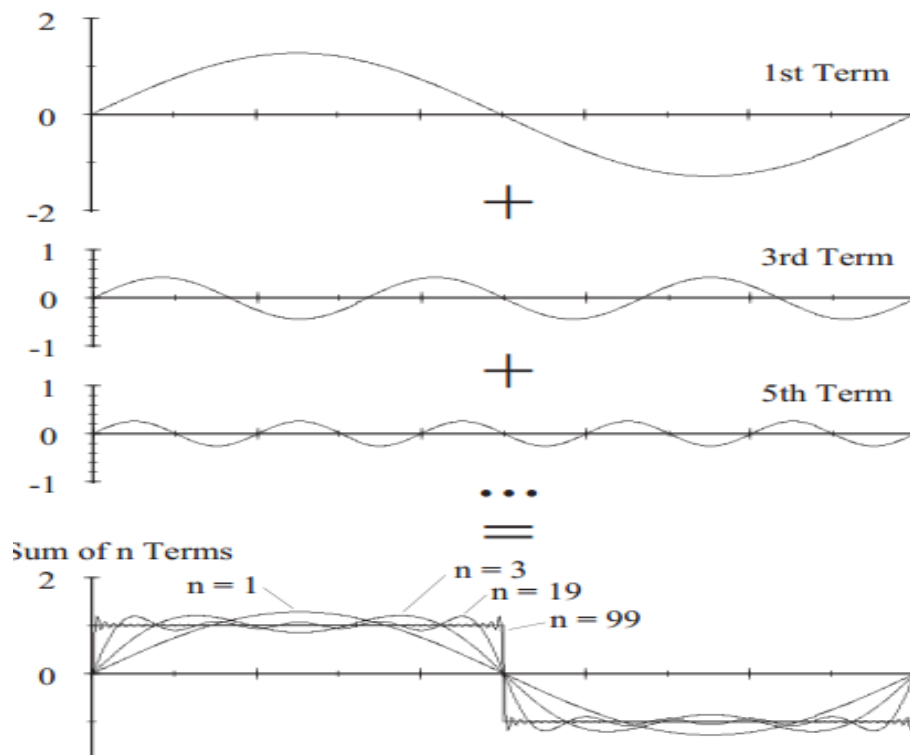
مدیریت و نگهداری راه‌ها (PMS)^۱، یکی از مهم‌ترین کارهایی است که پس از احداث راه باید به آن پرداخت. در PMS می‌توان پیش‌بینی عملکرد روسازی را طی سال‌های آتی انجام داد و با توجه به آن برای ترمیم و یا تعمیر راه در زمان مقتضی اقدام نمود. با توجه به نمونه‌های برداشت شده‌ی میدانی که معمولاً به صورت چشمی از درصدی از راه موجود صورت می‌گیرد، می‌توان این پیش‌بینی را انجام داد؛ این کار از طرفی مستلزم صرف هزینه‌های زیاد نیروی انسانی است و از طرف دیگر نمی‌توان از خطاهای موجود در برداشت این داده‌ها چشم‌پوشی کرد.

پس از انجام این تحقیق و در صورت کشف ارتباط مابین ترک‌های موجود و داده‌های دستگاه RSP می‌توان از این داده‌ها برای پیش‌بینی عملکرد روسازی راه، طی سال‌های آتی استفاده کرد که هم منتج به کاهش هزینه‌ها و هم کاهش خطاهای موجود در وضعیت قبل می‌شود.

۱-۲- معرفی موضوع:

ناهمواری روسازی از امواج تصادفی چند فرکانسی با دامنه و طول موج‌های گوناگون تشکیل می‌شود. ناهمواری طولی به‌عنوان نাত্রازی‌های طولی سطح رویه یک روسازی با ابعاد مشخص نسبت به یک سطح افقی واقعی که پویایی وسیله‌ی نقلیه، کیفیت سواری و بارگذاری دینامیکی روسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، تعریف شده است.

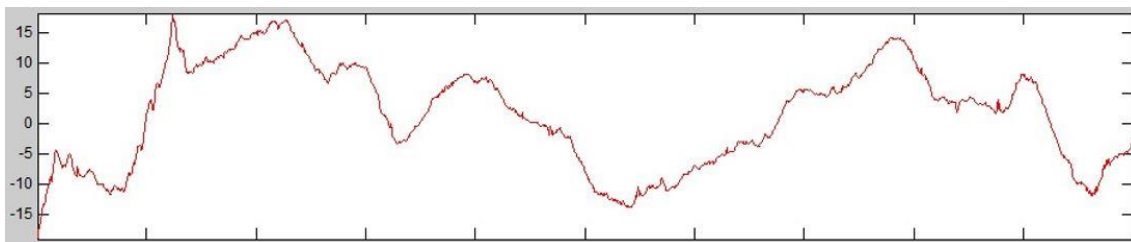
یکی از تجهیزات اندازه‌گیری شاخص بین‌المللی ناهمواری IRI، پروفیل‌سنج RSP است. پس از آنکه از خروجی این دستگاه، سیگنال اصلی (داده‌های خام ناهمواری) دریافت گردید، می‌توان به تصفیه آن پرداخت.



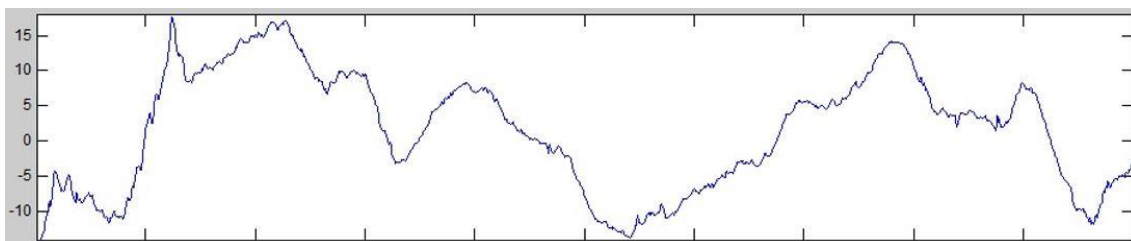
شکل ۱-۱- پروفیل تشکیل شده از مجموعه ای از سیگنال های سینوسی [۳]

هر سیگنال را می توان متشکل از مجموعه ای از سیگنال های سینوسی با طول موج های مختلف دانست (همان طور که در شکل ۱-۱ ملاحظه می شود)؛ تصفیه سیگنال، در واقع به معنای حذف امواجی نامطلوب با طول موج های کوچک (بسته به نوع فیلتر، این مقدار کوچک متفاوت است) از سیگنال اصلی می باشد.

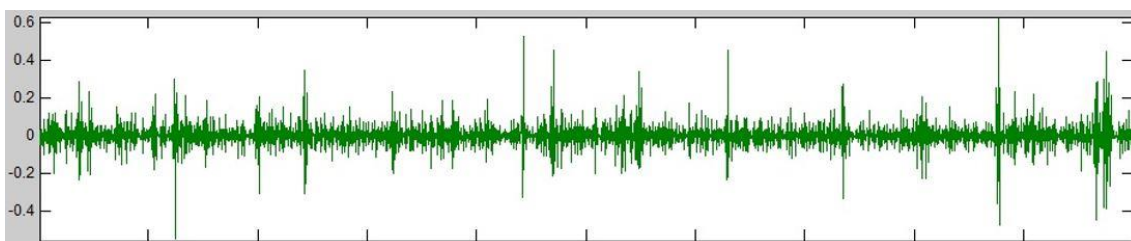
با فرض این که ناهمواری ها را می توان به عنوان یک سیگنال در نظر گرفت، می توان آن را به دو مؤلفه تجزیه کرد که یکی از آن ها همان سیگنال تصفیه شده است و دیگری نویزها یا همان امواج فرکانس بالا (با طول موج های کوچک) می باشد (شکل ۱-۲).



شکل ۲-۱- سیگنال اصلی

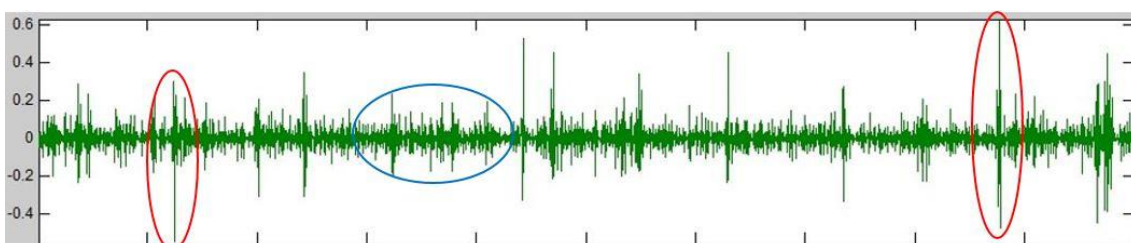


شکل ۳-۱- سیگنال تصفیه شده



شکل ۴-۱- نویزهای حذف شده از سیگنال اصلی

با توجه به شکل ۴-۱، در نویزهای حذف شده از سیگنال اصلی، نقاطی با افت و خیزهای شدیدتر نسبت به سایر نقاط قابل ملاحظه است. این تحقیق به بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط میان این نقاط پر افت و خیز با ترک‌های روسازی می‌پردازد؛ همان‌طور که در شکل ۵-۱ مشاهده می‌شود، محدوده‌های آبی رنگ، به احتمال فراوان ناشی از اثرات به جا مانده از ترک عرضی یا چاله می‌باشند و همچنین محدوده‌های قرمز رنگ به احتمال فراوان ناشی از تأثیر ترک‌های طولی یا بلوکی یا پوست سوسماری هستند.



شکل ۵-۱- محل‌های احتمالی وجود انواع ترک و چاله

این تحقیق به دنبال یافتن پاسخ سوالات زیر است:

* آیا این نقاط پرشی در سیگنال نویز، همان محل بروز انواع ترک‌ها روی سطح روسازی می‌باشند؟

* شدت این افت و خیزها را چگونه می‌توان با نوع خرابی موجود در آن نقطه ارتباط داد؟

* آیا می‌توان محل چاله‌های ایجاد شده در روسازی را از روی این امواج شناسایی و آن‌ها را ارزیابی

کرد؟

۱-۳- نوآوری تحقیق:

همانطور که در بخش ۱-۴ مشاهده شد، در بحث تصفیه یا همان فیلتراسیون پروفیل طولی راه، نویزهایی در اثر عمل فیلتر کردن از سیگنال اصلی جداسازی می‌شوند که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۱-۴ قابل مشاهده است. در تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی ناهمواری راه‌ها، تا کنون استفاده‌ی چندانی از این نویزها صورت نگرفته است. این تحقیق با استفاده از راهکاری جدید، به استفاده از این نویزها با هدف شناسایی ترک‌ها و چاله‌ها بدون بازدید چشمی پرداخته است.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق:

امروزه مهندسان راه برای مدیریت و نگهداری از راه‌ها نیاز به داشتن اطلاعات به خصوصی از جاده‌های تحت نظارت خود می‌باشند. یکی از ضروری‌ترین اطلاعات مورد نیاز، پی بردن به میزان انواع خرابی‌های موجود در سطح راه می‌باشد. از رایج‌ترین خرابی‌های موجود در هر جاده‌ای، می‌توان به ترک‌ها و چاله‌ها اشاره کرد. امروزه بازدید چشمی تنها راه به دست آوردن داده‌های خرابی راه‌ها می‌باشد که از لحاظ زمانی، اقتصادی، خطای انسانی و همچنین خطر اتفاقاتی چون تصادفات جاده‌ای در زمان برداشت داده‌ها، مقرون به صرفه به نظر نمی‌رسد. پس از انجام این تحقیق می‌توان فقط با داشتن اطلاعات خام دستگاه ناهمواری‌سنج RSP، به میزان ترک و چاله موجود در هر منطقه از راه پی برد و از بازدید چشمی صرف نظر کرد.

۱-۵- معرفی ساختار پایان نامه:

فصل دوم این تحقیق، به بررسی مبانی تئوری می‌پردازد؛ در این فصل شاخص ناهموازی راه به تفصیل معرفی می‌شود، همچنین بررسی مفهوم فیلتر و آنالیز موجک را می‌توان در این فصل مطالعه کرد.

در فصل سوم گزیده‌ای از مقالاتی که پیش از این در رابطه با استفاده از آنالیز موجک در مدیریت راه و همچنین روش‌های جدید شناسایی ترک‌ها صورت گرفته است ارائه شده است.

فصل چهارم به دو بخش کلی تقسیم شده است، بخش اول ارزیابی میدانی صورت گرفته برای تحقیق جاری را شرح و بسط می‌دهد و بخش دوم به معرفی شاخص‌های ارزیابی می‌پردازد که پایه و اساس مرحله‌ی تحلیل داده‌ها می‌باشند.

در فصل پنجم بررسی و تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد. در ابتدا به معرفی ضریب همبستگی پیرسون پرداخته می‌شود و پس از آن شاخص ترک‌ها معرفی و روش محاسبه‌ی آن‌ها بیان می‌شود. در انتها مدل پیش‌بینی هر ترک به صورت جدا ارائه خواهد شد.

و در پایان در فصل ششم خلاصه‌ای از نتایج تحقیق و همچنین پیشنهاداتی برای ادامه‌ی کار ارائه خواهد شد.

فصل دوم: روش تحقیق

۲-۱- مقدمه

در ابتدای این فصل، به معرفی پروفیل سنج مورد استفاده تحقیق جاری پرداخته و سپس مروری اجمالی به انواع ترک‌هایی که این تحقیق به دنبال شناسایی آن‌هاست صورت خواهد گرفت؛ در ادامه شاخص ناهمواری بین‌المللی تبیین خواهد شد و نحوه‌ی ایجاد این شاخص و طریقه‌ی محاسبه‌ی آن و دستگاه‌های مورد نیاز، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای تعیین این شاخص، داده‌های خروجی دستگاه‌های برداشت‌کننده‌ی پروفیل سطح راه، می‌بایست تصفیه و فیلتر شوند، لذا در ادامه فصل به بررسی فیلترها و روش کار و محاسبات آن‌ها پرداخته می‌شود.

در بخش انتهایی فصل نیز روش آنالیز موجک، به عنوان یک روش تصفیه‌ی داده‌های ناهمواری، بررسی و تبیین خواهد شد که ملاک عمل این تحقیق در فصول آتی قرار خواهد گرفت.

۲-۲- پروفیل سنج (RSP) Dynatest Mark IV :

۲-۲-۱- معرفی:

دستگاه Dynatest Mark IV یک پروفیل سنج سطح راه قابل حمل است که به RSP شهرت دارد. این دستگاه برای اندازه‌گیری ناهمواری روسازی با کیفیت بالا، خودکار و پیشرفته برای مهندسان و مدیران اجرایی ساخته شده است که قادر است به طور همزمان و پیوسته با سرعت بالا (سرعت بزرگراه)، تراز پروفیل طولی، RN^۱، IRI^۲، بافت درشت و GPS^۳ را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه در سطوح مختلف کاری، از یک نسخه با ۱۱ سنسور لیزری استاندارد (تا حداکثر ۲۱ لیزر برای اهداف خاص) و دست کم یک لیزر (نسخه مسیر چرخ منفرد) موجود می‌باشد.

1- Routing Number

۲- International roughness index

۳- Global Positioning System

۲-۲-۲- اساس اندازه گیری:

اندازه گیری پروفیل طولی بر اساس روش داکوتای جنوبی صورت می گیرد. این روش ابداعی وزارت حمل و نقل داکوتای جنوبی می باشد که برای محاسبه ی نیمرخ مورد استفاده قرار می گیرد، بدین صورت که سیگنال شتابسنج به فواصل زمانی ثابت (که به وسیله ی ساعت کامپیوتر کنترل می شوند) نمونه برداری می شود و به روش عددی انتگرال گیری مضاعف می شود تا ارتفاع مطلق وسیله ی نقلیه را در هر گام زمانی به هنگام کند. در این روش برای محاسبه ی ارتفاع وسیله ی نقلیه، اندازه گیری سرعت حرکت وسیله ی نقلیه ضرورتی ندارد. فاصله نسبت به راه که به وسیله ی ارتفاعسنج ماورای صوت اندازه گیری می شود، به فواصل منظم (که به وسیله ی متصدی تعیین می شوند) در امتداد طول راه نمونه برداری می شود. در هر موضوع نمونه برداری، ارتفاع نسبی وسیله نقلیه (به صورتی که به وسیله ی حسگر ماورای صوت اندازه گیری شده است) از آخرین ارتفاع مطلق وسیله ی نقلیه کاسته می شود تا ارتفاع نیمرخ به دست آید. [۱]

۲-۲-۳- مزیت ها:

۱. به دلیل ویژگی "توقف و حرکت"، اندازه گیری IRI در هر سرعتی امکان پذیر است. امکان آزمایش در چهارراه ها، میدان ها و همچنین در قطعات کوتاه که رسیدن به سرعت کافی مشکل است و یا هنگامی که انجام آزمایش در قطعه ی مقدماتی امکان پذیر نیست، میسر می شود؛
۲. تراز پروفیل می تواند در سرعت بین ۲۲ تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت جمع آوری شود؛
۳. نمایش گرافیکی اطلاعات پروفیل که بررسی خروجی ها را تسهیل می کند؛
۴. نرم افزار پیشرفته ی آنالیز موقعیت می تواند برجستگی - فرورفتگی و یا نقاط ساییده شده را نشان داده و PI^۱، RN و IRI را محاسبه کند؛ از این رو برای بیان جزئیات و آنالیز گزارش ایده آل می باشد؛
۵. به طور سریع و آسان می تواند به خودرو نصب و از آن جدا شود؛

۶. دستگاه می‌تواند از طریق یک کابل اتصال استاندارد ۱۲ ولتی تغذیه شود؛

۷. ارتباط از طریق اینترنت بین پروفیل‌سنج و کامپیوتر دستی در داخل خودرو امکان‌پذیر است؛

۸. دقت بالای آن تضمین شده است (برآورده نمودن مشخصات استاندارد ASTM-E950^۱ و نیازهای

گواهی‌نامه‌ی DOT^۲).

۲-۳- ترک‌خوردگی‌های روسازی:

۲-۳-۱- ترک‌خوردگی عرضی:

ترک‌های عرضی نوعی ترک انقباضی است که در وسط روسازی ظاهر می‌شوند و تقریباً به صورت عمود نسبت به محور یا جهت خواب روسازی امتداد می‌یابند. این نوع ترک‌ها معمولاً ربطی به بارگذاری ندارند و غالباً در مناطق با تغییرات دمای زیاد رخ می‌دهند. وقوع این خرابی اغلب به دلیل افت درجه حرارت است، بدین صورت که با کاهش دما، تنش کششی در مصالح روسازی ایجاد شده و افزایش این تنش، شکست روسازی را در پی خواهد داشت.

۲-۳-۲- ترک‌خوردگی طولی:

ترک‌های طولی به موازات محور یا جهت خواب روسازی ظاهر می‌شوند و ممکن است ناشی از عوامل زیر باشند:

* اجرای نادرست درز خط عبوری؛

* انقباض سطح رویه‌ی بتن آسفالتی در اثر درجه حرارت‌های پایین یا سفت شدن قیر و یا چرخه‌ی

روزانه‌ی درجه حرارت؛

* یک ترک انعکاسی که در اثر ترک‌خوردگی در زیر لایه‌ی رویه، از جمله ترک‌هایی که در دال‌های

بتن سیمانی (غیر از درزهای بتن سیمانی) به وجود می‌آیند، ایجاد می‌شود.

۱- American Standard Test Method (for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference)

۲- Department Of Transportation

۲-۳-۳- ترک خوردگی پوست سوسماری:

ترک خوردگی پوست سوسماری یا ترک خوردگی خستگی عبارت است از یک سری ترک‌های به هم متصل که در اثر گسیختگی ناشی از خستگی رویه‌ی بتن آسفالتی تحت تکرار بارگذاری ترافیکی به وجود می‌آید. این ترک خوردگی هنگامی از کف رویه‌ی بتن آسفالتی (یا اساس تثبیت شده) آغاز می‌شود که تنش‌های کششی و تغییر شکل‌های نسبی تحت بار چرخ به بالاترین مقدار خود می‌رسد. این ترک‌ها ابتدا به صورت یک سری ترک‌های طولی موازی با یکدیگر در سطح رویه منتشر می‌شوند. آنگاه با تکرار بارگذاری ترافیکی ترک‌ها به یکدیگر متصل شده و تکه‌های چند ضلعی با گوشه‌های تیز به وجود می‌آورند که به الگوی پوست سوسمار شباهت دارد. ابعاد این تکه‌ها معمولاً از $0/6$ متر بیشتر نیست. ترک خوردگی پوست سوسماری تنها در نواحی به وقوع می‌پیوندد که در معرض تکرار بارگذاری ترافیکی قرار دارد، مانند مسیر عبور چرخ‌ها. در نتیجه خرابی تنها زمانی کل یک منطقه را در بر خواهد گرفت که تمامی سطح مربوطه تحت بارگذاری ترافیکی قرار بگیرد. این ترک به عنوان یکی از خرابی‌های اصلی سازه‌ای به شمار می‌رود و معمولاً در محل شیار شدن مسیر چرخ‌ها ظاهر می‌شود.

۲-۳-۴- ترک خوردگی بلوکی:

ترک‌های بلوکی نوعی ترک‌های بهم متصل هستند که روسازی را به قطعات تقریباً مستطیلی شکل تقسیم می‌کنند. ابعاد این قطعات تقریباً $0/3 \times 0/3$ متر تا 3×3 متر است. ترک خوردگی بلوکی عمدتاً در اثر انقباض بتن آسفالتی و چرخه روزانه درجه حرارت (که باعث چرخه روزانه تنش / کرنش می‌شود) به وجود می‌آید. این ترک خوردگی از بار ناشی نمی‌شود. ترک خوردگی بلوکی معمولاً نشان‌گر آن است که قیر به میزان قابل ملاحظه‌ای سفت شده است. این نوع ترک خوردگی به طور معمول در بخش بزرگی از سطح روسازی گسترده می‌شود، لیکن گاهی اوقات تنها در نواحی غیر ترافیکی به وقوع می‌پیوندد. تفاوت این نوع خرابی با ترک پوست سوسماری در آن است که ترک‌های پوست سوسماری تکه‌های کوچک چند وجهی با لبه‌های تیز تشکیل می‌دهند.

۲-۳-۵- چاله:

چاله عبارت است از یک تورفتگی کاسه‌ای شکل و کوچک در سطح روسازی که قطر آن معمولاً کمتر از ۰/۹ متر است. به طور کلی چاله‌ها دارای لبه‌هایی تیز و دیواره‌های عمودی در قسمت بالای سوراخ می‌باشند. روند رشد چاله در اثر جمع شدن رطوبت آزاد در داخل سوراخ تسریع می‌گردد. چاله‌ها هنگامی به وجود می‌آیند که تکه‌های کوچکی از سطح روسازی در اثر ساییده شدن به وسیله‌ی جریان ترافیک از آن جدا می‌شوند. در این صورت روسازی به خاطر کیفیت ضعیف مخلوط رویه، نقاط ضعیف در لایه‌ی اساس یا بستر و یا به خاطر آنکه شرایط ترک‌خوردگی پوست سوسماری با شدت زیاد حاصل شده است، همواره در معرض فروپاشی قرار خواهد داشت.

چاله‌ها اغلب در زمره‌ی خرابی‌های سازه‌ای محسوب می‌شوند و نباید آن‌ها را با دانه دانه شدن و هوازدگی اشتباه گرفت. هنگامی که در اثر ترک‌خوردگی پوست سوسماری با شدت زیاد در سطح روسازی سوراخ‌هایی تشکیل می‌شوند آن‌ها را باید به‌عنوان چاله و نه به‌عنوان هوازدگی طبقه‌بندی نمود. [۲]

۲-۴- شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI)

۲-۴-۱- تاریخچه IRI

اندازه‌گیری ناهمواری راه، توسط سامانه‌های نوع پاسخ، از سال ۱۹۴۰ بسیار مرسوم بوده است، اما امکان به دست آوردن مقادیر یکسان از خودروهای مختلف و یا حتی از یک خودروی یکسان در زمان‌های متفاوت امکان‌پذیر نبود.

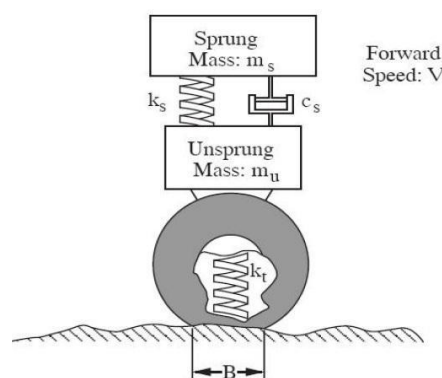
سامانه‌ی نوع پاسخ از یک وسیله‌ی نقلیه یا تریلر، راننده و متعلقات وسیله‌ی نقلیه و دستگاهی موسوم به راه‌سنج که پاسخ وسیله‌ی نقلیه نسبت به همواری‌ها را اندازه‌گیری می‌کند، تشکیل شده است. راه‌سنج بر روی بدنه‌ی یک سواری، بالای محور عقب آن در وسط سوار می‌شوند و یا در شاسی یک تریلر تک‌چرخ قرار می‌گیرند. اکثر راه‌سنج‌ها حرکات نسبی محور را نسبت به بدنه‌ی وسیله‌ی نقلیه اندازه‌گیری می‌کنند،

لیکن برخی از آن‌ها شتاب قائم بدنه‌ی وسیله‌ی نقلیه را اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیری‌های گزارش شده از این سیستم‌ها معمولاً بر حسب m/km بیان می‌شوند که از تقسیم حرکات تجمعی قسمت آویخته‌ی بین محور و بدنه، بر مسافت پیموده شده نتیجه می‌شود. به این سیستم $RTRMS^1$ نیز اطلاق می‌شود که کلمه‌ی اختصاری برای «اندازه‌گیری ناهمواری براساس پاسخ» می‌باشد. [۴]

در اواخر سال ۱۹۷۰ سامانه‌ای با برنامه‌ریزی NCHRP^۲ مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در گزارش ۳۲۸ NCHRP ارائه شده است. در این سامانه‌ی جدید، برای کالیبره کردن سامانه‌های نوع پاسخ، یک سامانه‌ی ایده‌آل کامپیوتری تعریف شده که با توسعه مدل ریاضی خودرو و راه‌سج مورد آزمایش قرار گرفت.

چون در آن زمان سامانه‌های اندازه‌گیری ناهمواری نوع پاسخ معمول بودند، فیلتری جهت همبستگی بهتر با خروجی این سامانه تعریف شد. این فیلتر بر مبنای مدلی ریاضی بنا شده که «مدل یک چهارم خودرو»^۳ نام گرفت. فیلتر یک چهارم خودرو، حرکات فنری شکل یک سامانه‌ی مکانیکی شبیه‌سازی شده را همانند آنچه در خودرو معمولی وجود دارد، محاسبه می‌کند.

جابه‌جایی سامانه فنر شبیه‌سازی شده به صورت تجمعی، انباشته شده و به فاصله طی شده تقسیم می‌شود تا یک واحد شیب (m/km) به دست آید.



شکل ۱-۲- مدل یک چهارم خودرو [۳]

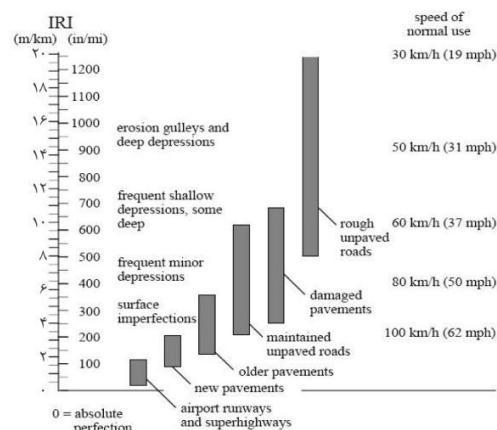
۱- Response Type Road Roughness Measuring System

۲- National Cooperative Highway Research Program

۳-Quarter-Car Model

پس از چند سال توسعه و تکامل روش‌های محاسبه آزمایشی برای انواع مختلف روش‌های پروفیل سنج، سرانجام الگوریتم کامپیوتری نمونه توسط NCHRP منتشر شد، دستورالعملها نوشته و بازنگری شدند و جهت تعیین یک معیار مبنا که شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) نامیده شد، تنظیم گشتند. دستورالعمل‌های منتشر شده توسط NCHRP، توضیح می‌دهند که چگونه IRI با تجهیزات مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

IRI در اصل یک سیستم نوع پاسخ مجازی بر مبنای کامپیوتر محسوب می‌گردد که تکرارپذیر، قابل جابه‌جایی و با زمان ثابت است. IRI اولین شاخص بر مبنای پروفیل بود که بیشترین استفاده را داشت، زیرا روش آنالیز آن به شکلی بود که با انواع مختلف پروفیل‌سنج‌ها قابل اندازه‌گیری بود. IRI به‌عنوان یک خصوصیت پروفیل واقعی تعیین می‌شود. بنابراین می‌تواند با هر پروفیل‌سنج معتبری اندازه‌گیری شود. معادلات آنالیزی جهت کمتر نمودن تأثیر بعضی عوامل اندازه‌گیری پروفیل‌سنج‌ها از قبیل فاصله نمونه، ایجاد و آزمایش گردیدند. IRI یک ارتباط منطقی بین وضعیت ناهمواری و پاسخ خودرو برقرار و این خصوصیت، زمانی که وابستگی میزان ناهمواری به کل هزینه عملیاتی خودرو، کیفیت راندن، بارهای دینامیکی چرخ و روی هم رفته شرایط سطحی لازم فراهم باشد، بسیار مناسب است. IRI به‌عنوان شاخص ناهمواری بر حسب m/km بیان می‌گردد. در شکل ۲-۲ میزان مجاز IRI برای انواع مختلف راه‌ها نشان داده شده است.

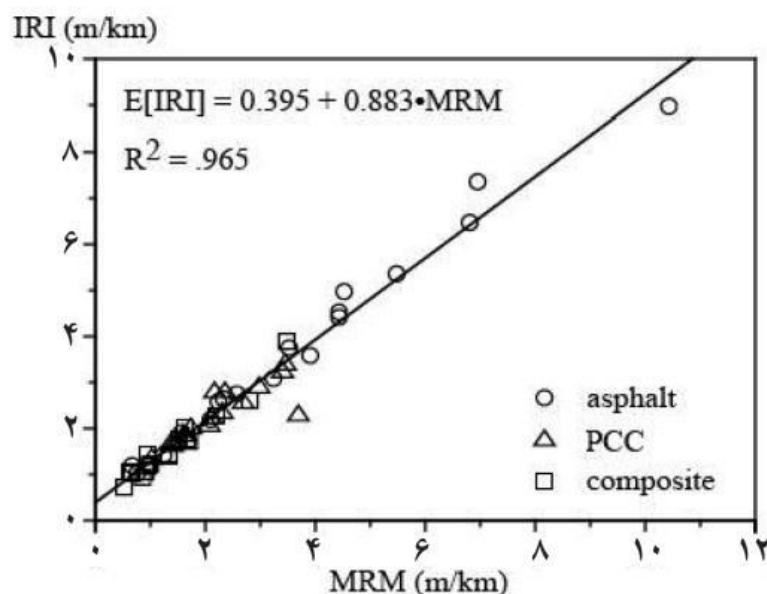


شکل ۲-۲- میزان مجاز IRI برای گروه‌های مختلف [۳]

۲-۴-۲- خصایص آنالیز IRI

مدل یک چهارم خودرو که در الگوریتم IRI استفاده شد، در حقیقت همان طور که از نامش مشخص است مدلی از یک گوشه (یک چهارم) خودرو می باشد. مدل به صورت تصویری، در شکل ۱-۲ نشان داده شد. این مدل شامل: تائیری که با یک فنر نشان داده شده است، جرم محوری که با تائیر نگه داشته می شود، فنری که بیان گر سامانه فنر خودرو و میرا کننده بوده و در نهایت جرم بدنه که با سامانه فنر بر روی تائیر نگه داشته شده است، می باشد. عوامل مدل یک چهارم خودرو برای بیشترین همبستگی با سامانه های اندازه گیری ناهمواری راه نوع پاسخ، تنظیم گردیده است. جهت اطلاعات بیشتر، می توان به گزارش NCHRP ۲۲۸ که طراحی آن شرح داده شده است، رجوع کرد.

شکل (۳-۲) ارتباط بین IRI محاسبه شده از پروفیل و اطلاعات خام یک سامانه نوع پاسخ را نشان می دهد که سندی بر اثبات کارایی شاخص IRI می باشد.



شکل ۳-۲- همبستگی بین IRI به دست آمده از اطلاعات پروفیل و اندازه های خام یک سیستم نوع پاسخ [۳]

شاخص IRI به طور خطی با ناهمواری متناسب است. اگر تمام مقادیر تراز در یک پروفیل اندازه گیری شده با یک درصد خاصی افزایش یابند، IRI نیز دقیقاً با همان درصد افزایش می یابد. در صورتی که

IRI=۰ باشد به معنی آن است که پروفیل کاملاً صاف و مسطح است. محدودیتی برای حد بالای ناهمواری به طور تئوریک وجود ندارد، اگرچه از روسازی‌هایی با مقادیر IRI در حدود 8 m/km و بالاتر، تقریباً بدون کاهش در سرعت، نمی‌توان عبور کرد.

۲-۴-۳- تعیین IRI

IRI به طور دقیق به عنوان یک تبدیل ریاضی پروفیل واقعی تعیین شده است. مراحل مورد استفاده در برنامه کامپیوتری محاسبه IRI به شرح زیر می‌باشد:

* IRI برای یک پروفیل تک (پروفیلی که از دنبال کردن یک خط در طول راه به دست می‌آید) محاسبه می‌شود.

* اگر پروفیل سنج، پروفیل‌های متعددی را به طور همزمان اندازه‌گیری کند، می‌توان برای هر کدام یک IRI به دست آورد. استاندارد IRI مشخص نمی‌کند که چگونه باید موقعیت خط را روی راه تعیین کرد و پروفیل آن را اندازه‌گیری نمود. هر خط ممکن روی زمین، یک آمار IRI مربوط به خود دارد. * استاندارد نمی‌تواند مشخص نماید که چگونه می‌توان مقادیر IRI، که برای پروفیل‌های مختلف گرفته شده و از یک راه به دست می‌آیند را ترکیب نمود بلکه آن‌ها می‌توانند میانگین‌گیری شوند؛ اما نتایج حاصل IRI نخواهد بود، بلکه میانگین چندین IRI است.

* پروفیل با یک فیلتر میانگین حرکت (در بخش ۲-۳-۲ به تفصیل آمده است) با طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر فیلتر می‌شود.

* فیلتر میانگین حرکت، یک فیلتر کوتاه‌گذر است که پروفیل را هموار می‌نماید. در صورتی که فاصله نمونه پروفیل کمتر از ۱۶۷ میلی‌متر باشد، می‌توان برنامه کامپیوتری فیلتر را استفاده کرد.

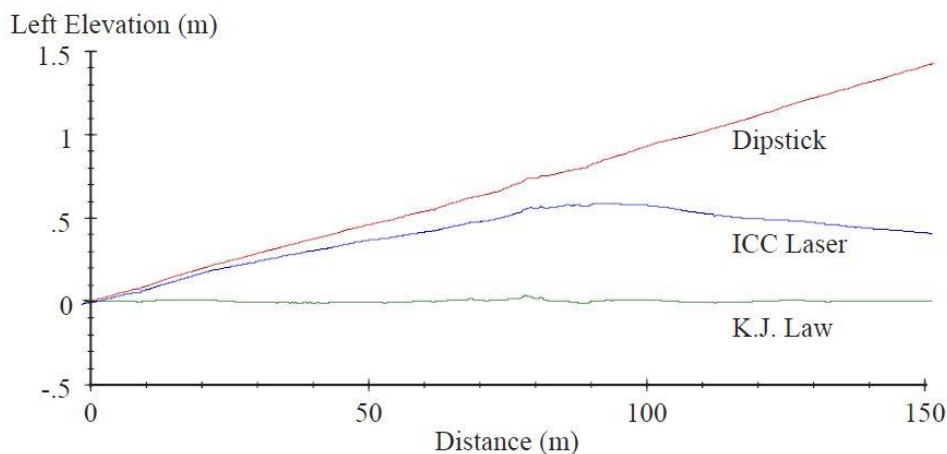
* فیلتر میانگین حرکت، با طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر باید برای پروفیل‌های به دست آمده از بعضی سامانه‌ها حذف شود.

۵-۲- نحوه‌ی تصفیه داده‌های پروفیل ناهمواری

۵-۲-۱- مفهوم فیلتر

سیگنال‌ها برای حذف نویزهای ناخواسته فیلتر می‌شوند تا اطلاعات مورد نیاز از آن‌ها استخراج شود. این مفهوم فیلتر در پردازش سیگنال، به صورت یک عمل ریاضی بسط داده می‌شود، به خصوص زمانی که نیاز به پردازش یک سری اعداد توسط کامپیوتر می‌باشد.

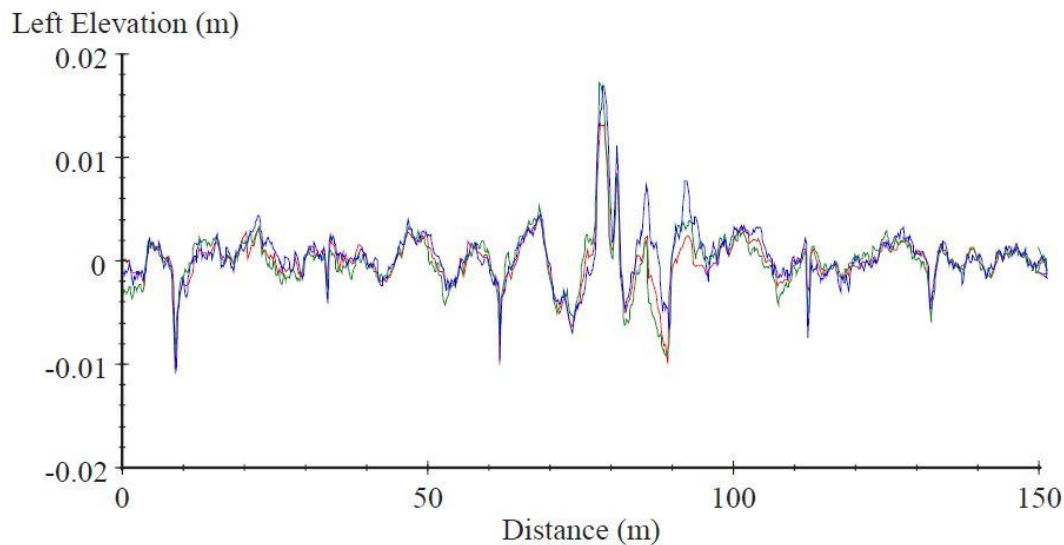
فیلتر دیجیتال، یک فرآیند محاسبه است که در آن یکسری از اعداد (سیگنال) پس از اعمال فیلتر، به یکسری اعداد جدید تبدیل می‌شوند. برای استفاده عملی از اطلاعات یک پروفیل، نیاز به فیلتر کردن اعدادی است که آن پروفیل را تشکیل داده‌اند. به عنوان یک استفاده کننده‌ی پروفیل، نیازی به دانستن جزئیات تبدیلات انجام شده در فرآیند فیلتر نیست، چرا که این محاسبات به طور خودکار توسط کامپیوتر انجام می‌گیرد. با این حال دانستن اهمیت فیلتر کردن به عنوان بخشی از فرآیند اندازه‌گیری و تفسیر داده‌های پروفیل، امری ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن نمودار سه پروفیل در شکل ۴-۲، مشاهده می‌شود که جزئیات ناهمواری در پروفیل‌های فیلتر نشده قابل دیدن نیستند.



شکل ۴-۲- سه پروفیل خام اندازه‌گیری شده [۳]

فیلتر کردن داده‌های پروفیل، برای مشاهده‌ی ویژگی‌های مختلف پروفیل، امری ضروری است. نمودار شکل ۵-۲ همان سه پروفیل را بعد از اعمال فیلتر نشان می‌دهد که در آن‌ها مقادیر انحرافی از سطح

جاده‌ها و همچنین فراز و نشیب‌های خیلی طولانی از پروفیل حذف شده‌اند.



شکل ۲-۵- سه پروفیل شکل ۲-۴ بعد از اعمال فیلتر [۳]

با کمی دقت، در فاصله‌ی ۸۰ متری، دست اندازی مشاهده می‌شود. در شکل اول به سختی می‌شد این دست‌انداز را تشخیص داد، چرا که مقیاس‌بندی به گونه‌ای تنظیم شده است که تغییرات ارتفاعی را در فواصل کوتاه‌تری نشان می‌دهد. استفاده از فیلتراسیون به طور خاص هنگامی مهم است که هدف استفاده از پروفیل‌سنج‌های سرعت بالا باشد، چرا که بیشتر ویژگی‌های قابل مشاهده از پروفیل فیلتر نشده (مانند انحنای کلی)، دارای کم‌ترین دقت می‌باشد.

فیلتر کردن پروفیل‌ها یک بخش مهم از فرآیند اندازه‌گیری ناهمواری است. در هر دستگاه پروفیل سنجی حداقل یک فیلتر تعبیه شده است. در برخی تحلیل‌ها، از چند فیلتر استفاده می‌شود که خروجی هر فیلتر به منزله‌ی ورودی برای فیلتر بعدی است. این کار درست مانند استفاده از چند فیلتر در مدارهای الکتریکی یا در لوله‌های آب می‌باشد.

برای کاربردهای مختلفی که از پروفیل می‌شود، فیلترهای متفاوتی استفاده می‌شود. فیلتر تنها یک نام برای یک تبدیل ریاضی است، تبدیلی که در آن مجموعه‌ای از اعداد اصلاح می‌شوند. تعداد نامحدودی فیلتر وجود دارد که با توجه به نوع مطالعه هر یک از آن‌ها می‌تواند مفید باشد. چند فیلتر استاندارد

وجود دارد که برخی از آن‌ها را می‌توان بر پروفیل راه اعمال نمود. در ادامه یکی از این فیلترها بررسی می‌شود.

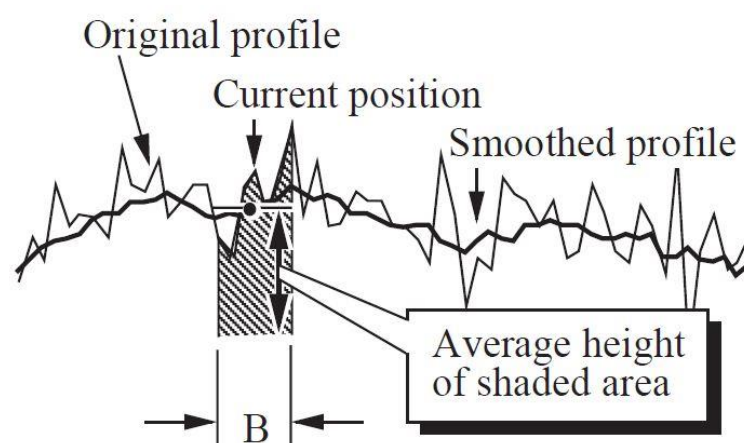
۲-۵-۲- روش میانگین حرکت برای فیلتر کردن

روش میانگین حرکت^۱ یک فیلتر ساده است که معمولاً در آنالیز پروفیل استفاده می‌شود، بخصوص برای ایجاد یک نمای گرافیکی از پروفیل؛ به‌عنوان مثال نمودارهای فیلتر شده در شکل ۲-۵ توسط این فیلتر پردازش شده است.

فیلتر میانگین حرکت، هر نقطه از پروفیل را با میانگین چند نقطه‌ی مجاورش جایگزین می‌کند. برای پروفیل p در فاصله‌ای به مسافت ΔX ، می‌توان با رابطه‌ی زیر فیلتر میانگین حرکت را اعمال کرد:

$$p_{fL}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j) \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

p_{fL} پروفیل هموار شده^۲ یا پایین‌گذر (در بخش ۲-۳-۴-۱ توضیح داده خواهد شد) است؛ B طول مبنا می‌باشد (طولی که در اطراف هر نقطه در این فاصله میانگین‌گیری می‌شود)؛ و N تعداد نمونه‌هایی است که در فاصله‌های ΔX قرار دارند. روش اعمال این فیلتر در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- فیلتر میانگین حرکت [۳]

۱-Moving Average

۲-Smoothed Profile (Low-Pass Filtered Profile)

فیلتر میانگین حرکت قابلیت حذف پروفیل هموار شده را نیز داراست. پروفیل‌هایی که خیلی هموار شده‌اند دیگر قادر به ارائه‌ی اطلاعات دقیقی از شیب مسیر راه نیستند. در اکثر مواقع هدف یافتن میزان پستی و بلندی‌های راه می‌باشد، امری که بطور مستقیم بر میزان راحتی رانندگان تاثیر می‌گذارد. با یک رابطه‌ی ساده می‌توان مقادیر هموار شده‌ی پروفیل را از مقادیر پروفیل اصلی کم کرد:

$$p_{fH}(i) = p(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j) \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

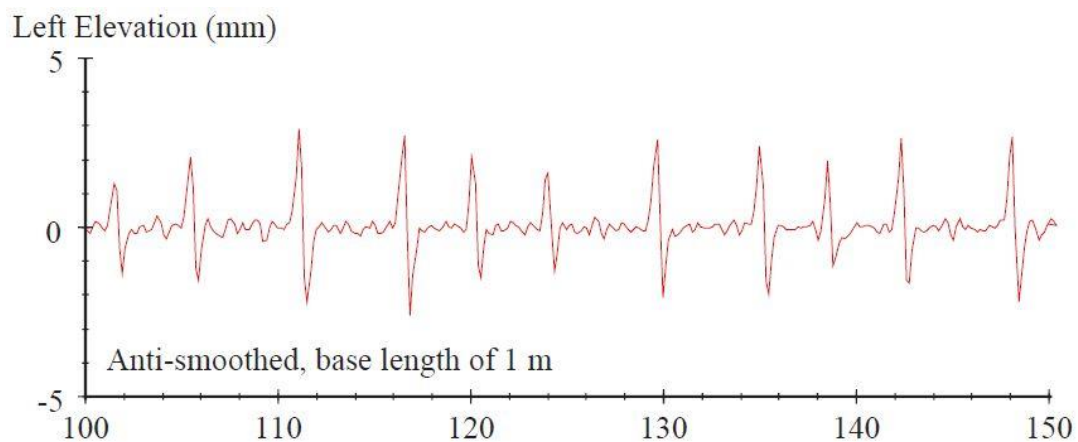
زیروند H در p_{fH} بیانگر بالاگذر^۱ بودن نوع فیلتر می‌باشد (در بخش ۲-۳-۴-۱ توضیح داده خواهد شد). هر دو فرم فیلتر، چه فرم پایین‌گذر (low-pass) و چه فرم بالاگذر (High-pass) می‌توانند بسته به نوع کار مفید باشند. هر دو را می‌توان برای یک پروفیل به کار برد ولی منطقی است که طول مبنا برای فرم پایین‌گذر، کمتر از فرم بالاگذر در نظر گرفته شود.

هیچ طول مبنای معینی را نمی‌توان بهترین طول مبنا دانست، چرا که انتخاب این طول بسته به نوع استفاده و نیاز ما از داده‌ها می‌باشد. برای مثال در ادامه سه نمودار ارائه شده است که در هر یک، یک مدل فیلتر صورت گرفته است و در نتیجه هر یک، اطلاعات خاص خود را ارائه می‌کند.

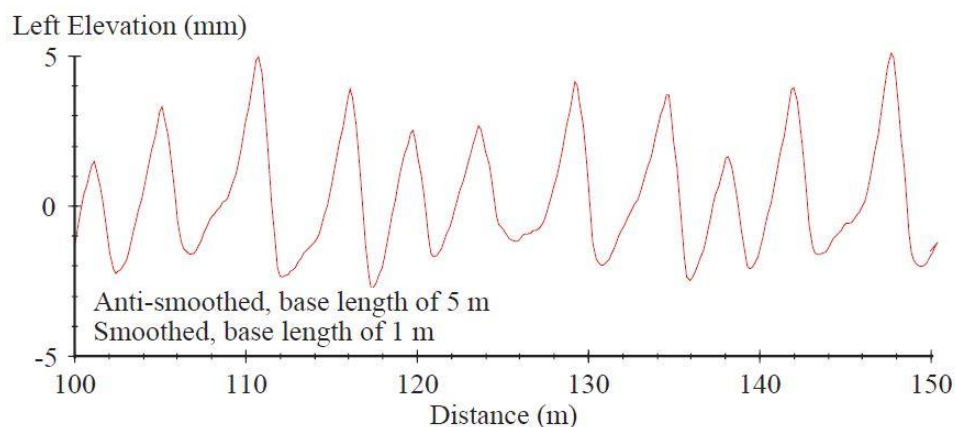
در نمودار شکل ۲-۷ از فرم بالاگذر استفاده شده که در آن طول مبنا یک متر انتخاب شده است (پروفیل هموار شده از پروفیل اصلی کسر شده است). این نمودار پستی و بلندی‌ها را در فواصل کوتاه هم نشان می‌دهد به وضوح می‌توان فهمید که حدوداً هر ۴/۵ متر یک خرابی نسبتاً بزرگ وجود دارد. نمودار شکل ۲-۸، پروفیل را پس از اعمال دو فیلتر نشان می‌دهد، یکی فیلتر پایین‌گذر با طول مبنای یک متر و دیگر فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۵ متر. مشاهده می‌شود که تمام پستی و بلندی‌های جزئی نمودار شکل ۲-۷ در این نمودار حذف شده است ولی می‌توان شیب هر تکه را به وضوح مشاهده کرد.

۱-Anti-Smoothed Profile (High-Pass Filtered Profile)

نمودار شکل ۲-۹، پروفیل را پس از اعمال دو فیلتر دیگر نشان می‌دهد، یکی فیلتر پایین‌گذر با طول مبنای ۵ متر و دیگری فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۲۵ متر. با اعمال فیلتر پایین‌گذر ۵ متری، تمامی پستی و بلندی‌های کمتر از این فاصله حذف می‌شوند. همچنین با اعمال فیلتر معکوس ۲۵ متری، شیب‌ها و نوسانات طولانی هم حذف می‌شوند. نموداری که باقی مانده است وضع طولانی مدت راه را بدون اعمال تعمیر و نگهداری نشان می‌دهد.

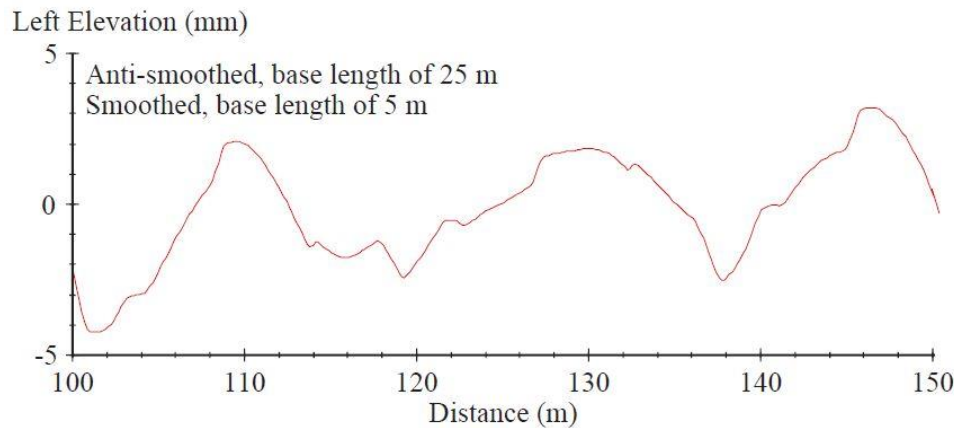


شکل ۲-۷- فیلتر میانگین حرکت از نوع بالاگذر با طول مبنای ۱ متر [۳]



شکل ۲-۸- فیلتر میانگین حرکت متشکل از فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۵ متر و پایین‌گذر با طول مبنای

۱ متر [۳]



شکل ۲-۹- فیلتر میانگین حرکت متشکل از فیلتر بالاگذر با طول مبنای ۲۵ متر و پایین گذر با طول مبنای

۵متر [۳]

فیلتر میانگین حرکت از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است. این فیلتر یک راه قابل فهم و آسان برای تصفیه‌ی پروفیل است. محاسبات در این روش از آن جهت آسان است که پس از میانگین‌گیری از اولین نقطه، می‌توان با رابطه‌ی زیر مقادیر بعدی را نیز به دست آورد^۱:

$$p_{fL}(i) = p_{fL}(i-1) + \frac{1}{N} \left[p\left(i + \frac{B}{2\Delta X}\right) - p\left(i - \frac{B}{2\Delta X} - 1\right) \right] \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

۲-۵-۳- سیگنال‌های سینوسی

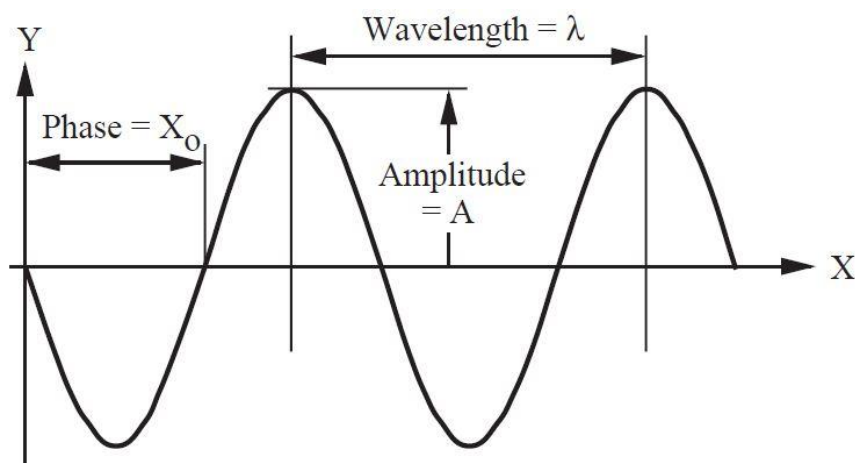
هر دو موج سینومی و کسینوسی به امواج سینوسی موسومند. برای درک بهتر از تحلیل پروفیل، آشنایی با سینوسی‌ها امری ضروری است. سینوسی‌ها توسط طول موج، دامنه و فاز تعریف می‌شوند. مطالعه‌ی سینوسی‌ها را به صورت کلی می‌توان به شکل زیر تعریف کرد و در آن y را تابعی از x دانست:

رابطه ۲-۴

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (X - X_0)\right)$$

۱- نرم افزاری برای این نوع فیلتر وجود دارد که نام آن را RoadRuf است و از آدرس زیر قابل دستیابی می‌باشد:

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>



شکل ۲-۱۰- فاز ، دامنه و طول موج در یک سینوسی مبنای ۵ متر [۳]

عدد موج، تعداد سیکل در واحد طول می‌باشد. یک جایگزین برای تعریف طول یک سیکل می‌تواند اینگونه باشد که در هر واحد از طول، چند سیکل به وقوع می‌پیوندد. در اکثر کاربردهای پردازش سیگنال، سینوسی‌ها به عنوان تابعی از زمان معرفی می‌شوند (به جای مکان) و به تبع آن سینوسی‌ها را به صورت فرکانسی که تعریف آن سیکل در هر ثانیه می‌باشد بیان می‌کنند که آن را هرتز می‌نامند. در صورتی که سیگنال‌های سینوسی به صورت تابعی از مکان بیان شود تعداد سیکل‌ها در واحد فاصله را عدد موج می‌نامند و آن را با V نمایش می‌دهند ($V = \frac{1}{\lambda}$) که واحد آن می‌تواند $cycle/f_t$ یا $cycle/m$ باشد.

۲-۵-۴- مفهوم پاسخ فرکانس

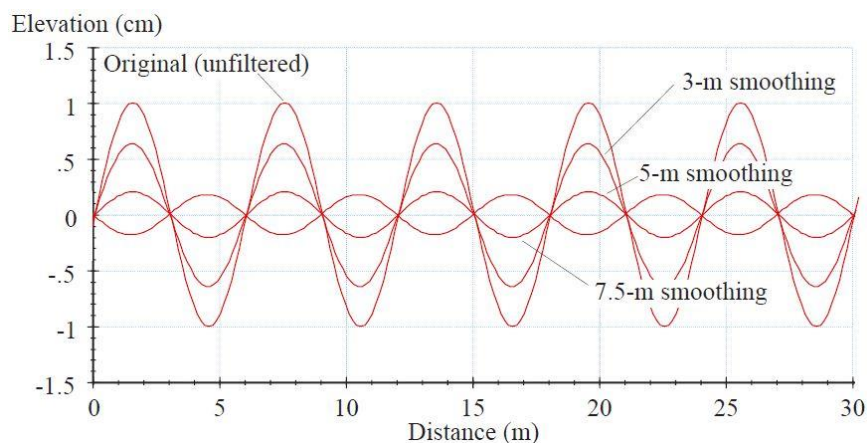
تقریباً برای تمام استفاده کنندگان پروفیل لازم است که با مفهوم «پاسخ فرکانس»^۱ آشنا باشند، چرا که آنالیزهای پروفیل تقریباً همیشه توسط نمودارهای پاسخ فرکانس شرح داده می‌شوند که یک راه بسیار مفید برای توصیف ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فیلتراسیون می‌باشد.

در یک سیستم خطی، ورودی‌ها و خروجی‌ها متناسب با هم تغییر می‌کنند. برای تحلیل پروفیل، آزمایش بر روی مجموعه‌ای از اعداد ورودی و خروجی انجام می‌شود. اگر آنالیز خطی باشد، آنگاه اعداد

^۱-Frequency Response

ورودی با هر ضریبی که تغییر کنند، اعداد خروجی هم با همان ضریب تغییر می‌کند. اکثر فیلترهایی که در مدیریت راه مورد نیاز است، خطی اند (برخی فیلترها هم از توابع غیر خطی استفاده می‌کنند که از جمله آن‌ها می‌توان به «اخذ مقادیر مطلق»^۱ یا «مربع کردن»^۲ اشاره کرد).

یک ورودی سینوسی به یک سیستم خطی، منجر به یک خروجی سینوسی با همان طول موج ورودی می‌شود. به طور کلی دامنه و فاز برای ورودی‌ها و خروجی‌ها متفاوت است ولی با این حال برای سیستم‌های خطی، طول موجشان یکسان است. برای مثال اگر فیلتر میانگین حرکت در نظر گرفته شود، نمودار شکل ۲-۱۱، یک سینوسی را با طول موج 6 m/cycle نشان می‌دهد که با سه نوع فیلتر پایین‌گذر میانگین حرکت تصفیه شده (هر فیلتر دارای طول مبنای خاص خود است). همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای فیلتر شده (خروجی‌ها)، هر سه همچنان سینوسی‌اند و طول موجشان همان 6 m/cycle می‌باشد.



شکل ۲-۱۱- موج سینوسی فیلتر شده توسط سه فیلتر پایین‌گذر با طول مبنای ۳، ۵ و ۷/۵ متر [۳]

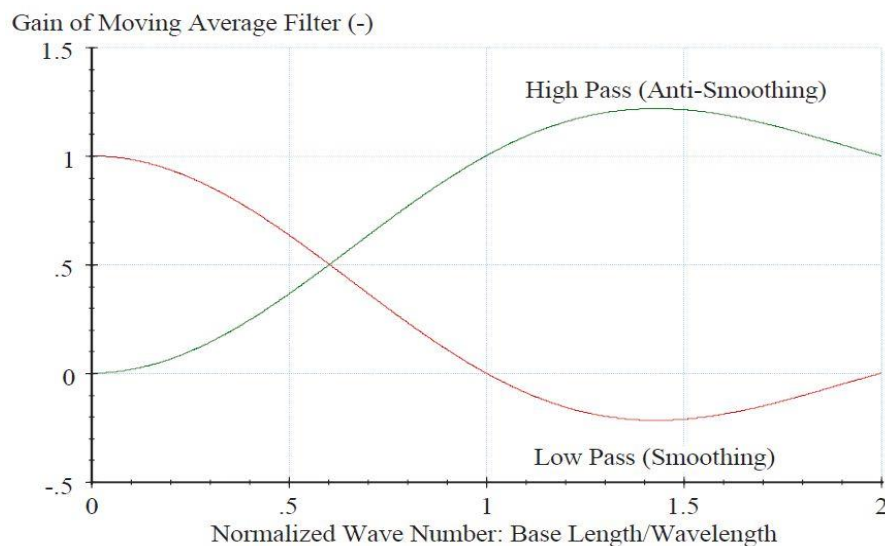
نمودار پاسخ فرکانس، قابلیت نشان دادن نسبت خروجی به ورودی را دارد. با علم به اینکه خروجی یک سیستم خطی، یک سینوسی با همان طول موج اولیه است، می‌توان خروجی را به طور کامل با دامنه و فاز تعریف کرد. نمودار دامنه‌ی پاسخ فرکانس، نسبت دامنه‌ی خروجی را به دامنه‌ی ورودی

۱-Taking Absolute Values

۲-Squaring

نشان می‌دهد، این نسبت را «دست‌آورد»^۱ می‌نامند. نمودار فاز پاسخ فرکانس، نسبت فاز خروجی را به فاز ورودی نشان می‌دهد؛ با این حال در اینجا فقط به نمودارهای دست‌آورد (نسبت دامنه‌ی خروجی را به دامنه‌ی ورودی) پرداخته خواهد شد.

نمودار شکل ۲-۱۲، نسبت دست‌آورد را به صورت تابعی از عدد موج برای یک فیلتر میانگین حرکت نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی این نمودار با نمودار قبلی (شکل ۲-۱۱)، مشاهده می‌شود که برای طول مبنای ۳ متر، نسبت طول مبنا به طول موج 0.5 می‌باشد و نمودار پاسخ فرکانس نشان می‌دهد که مقدار دست‌آورد به ازای 0.5 برابر 0.64 خواهد بود که این مقدار همان دامنه‌ی نمودار شکل ۲-۱۱ در فیلتر با طول مبنای ۳ متر می‌باشد. همین طور برای طول مبنای 7.5 متر نسبت طول مبنا به طول موج $1/25$ می‌باشد و نمودار پاسخ فرکانس نشان می‌دهد که مقدار دست‌آورد به ازای $1/25$ برابر 0.18 خواهد بود که این مقدار نیز همان دامنه‌ی متناظر آن برای طول مبنای 7.5 در نمودار شکل ۲-۱۱ می‌باشد (توجه شود که نوع فیلتر میانگین حرکت، پایین‌گذر می‌باشد).



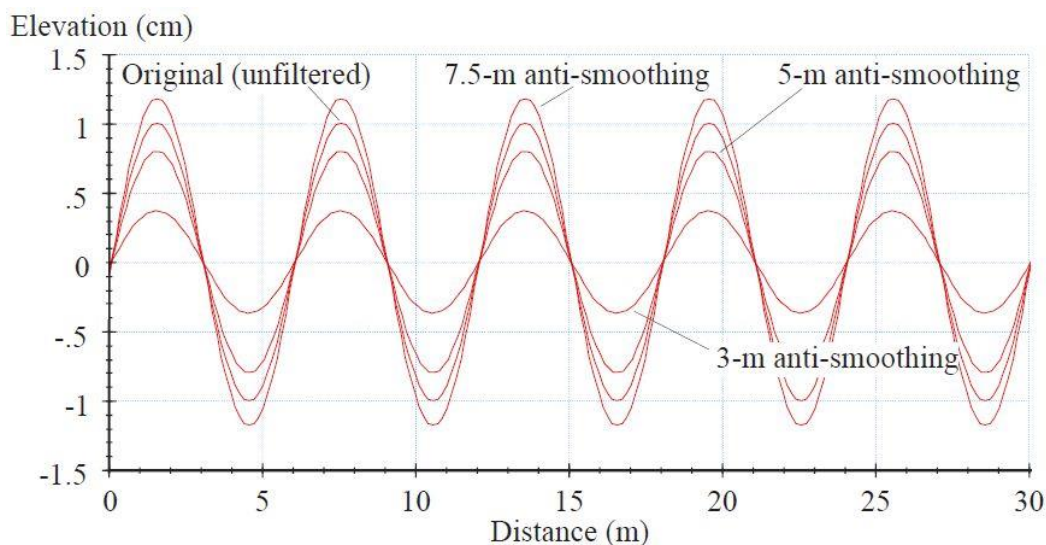
شکل ۲-۱۲- نمودار دست‌آورد فیلتر میانگین حرکت به ازای عدد موج برای هر دو نوع فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر [۳]

۲-۵-۴-۱- فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر

مثل هر فیلتری، برخی چیزها ممکن است بدون تغییر از فیلتر عبور کنند و برخی دیگر ممکن است کاهش یابند و یا حذف شوند. همان‌طور که قبلاً دیده شد، برای یک پروفیل سینوسی با طول موج ۶ متر، اگر از فیلتر پایین‌گذر میانگین حرکت با طول مبنای ۳ متری استفاده شود، مقدار دامنه اندکی کاهش می‌یابد؛ اگر از فیلتر پایین‌گذر میانگین حرکت با طول مبنای ۵ متری استفاده شود، کاهش دامنه، قابل ملاحظه خواهد بود؛ اگر از طول مبنای ۶ متری استفاده شود دامنه به طور کامل حذف خواهد شد و در نهایت اگر از طول مبنای ۷/۵ متری استفاده شود مقدار دامنه ثابت می‌ماند (با علامت منفی) بنابراین می‌توان گفت با نزدیک شدن مقدار طول مبنای هر فیلتر، به طول موج پروفیل سینوسی اصلی، نمودار سینوسی لاغرتر می‌شود. از نظر عدد موج، این نوع فیلتر (پایین‌گذر میانگین حرکت)، اعداد موج بالا را به اعداد موج با مقدار کمتر تغییر می‌دهد که به همین دلیل به آن فیلتر پایین‌گذر می‌گویند.

در خصوص فیلتر بالاگذر نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد این فیلتر با کم کردن از مقدار همواری پروفیل فیلتر شده، آن را به پروفیل اصلی نزدیک تر می‌کند. نسبت دستاورد برای این فیلتر را می‌توان با کم کردن یک واحد از مقدار دستاوردی که برای فیلتر پایین‌گذر بدست آمده، بدست آورد.

در نمودار شکل ۲-۱۲ مشاهده گردید که مجموع مقادیر دستاورد هر دو فیلتر به‌ازای هر عدد موجی برابر یک بود. فیلترها همچنین می‌توانند سیگنال‌ها را تقویت کنند. اگر عدد موج بین ۱ و ۲ باشد، فیلتر بالاگذر، سیگنال سینوسی را بزرگتر (از لحاظ دامنه) می‌کند، نمودار شکل ۲-۱۳ نشان دهنده‌ی این امر است. اگر به مقادیر دامنه برای این سه فیلتر توجه شود، می‌توان به این نتیجه رسید که این مقادیر دقیقاً مطابق اعداد دستاورد در نمودار پاسخ فرکانس می‌باشد.



شکل ۲-۱۳- موج سینوسی فیلتر شده توسط سه فیلتر بالا گذر با طول مبنای ۳، ۵ و ۷/۵ متر [۳]

نمودارهای پاسخ فرکانس برای دو فیلتر پایین گذر و بالا گذر به سادگی قابلیت تغییر مقیاس دارند. به عنوان مثال اثر یک فیلتر بالا گذر ۳۰ متری مورد مطالعه قرار داده می شود؛ در نمودار قبلی اثر فیلتر بالا گذر با طول مبنای ۳ متر، بر روی سیگنال سینوسی با طول موج ۶ متر ملاحظه شد. اگر محور x نمودار قبلی با ضریب ۱۰ افزایش داده شود، فاصله ی ۳۰ متری به ۳۰۰ متر افزایش می یابد و طول مبنا هم ۱۰ برابر شده و به ۳۰ متر می رسد که می تواند برای یک سیگنال سینوسی با طول موج ۶۰ متر صدق کند.

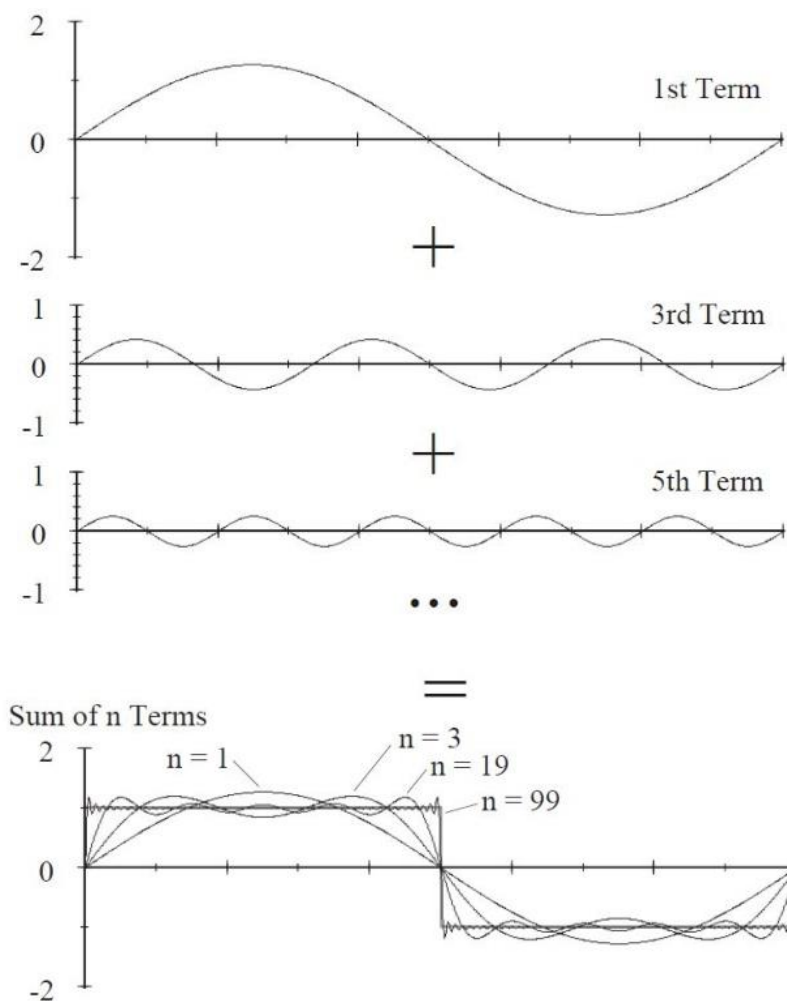
۲-۵-۵- مفهوم PSD^۱

یک پروفیلی راه معمولی، هیچ شباهتی به یک سیگنال سینوسی ندارد. در ادامه مشاهده می شود که پروفیل های راه از طیفی از طول موج های سینوسی مختلف تشکیل شده است. تابع PSD، یک نمایش آماری از میزان اهمیت اعداد موج مختلف می باشد.

یک پروفیل می تواند به چند سیگنال سینوسی تجزیه شود. همان طور که در شکل ۲-۱۴ مشاهده

1- Power Spectral Density

می‌شود، می‌توان پروفیل را از حاصل جمع مجموعه‌ای از سینوسی‌ها با دامنه، طول موج و فازهای متفاوت بدست آورد. اگر نسبت طول سینوسی‌های هر مرحله، به طول کل مورد بررسی قرار بگیرد، مشاهده می‌شود که اگر این نسبت کسری زوج $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{6}, \frac{1}{8}, \dots)$ باشد، حاصل جمع مجموعه‌ی سینوسی‌ها تقریب مناسبی از پروفیل به دست نخواهد داد، ولی اگر برعکس، این نسبت کسری فرد $(\frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7}, \dots)$ باشد، حاصل جمع مجموعه‌ی سینوسی‌ها، تقریب نسبتاً قابل قبولی از پروفیل به دست می‌دهد.



شکل ۲-۱۴- پروفیل تشکیل شده از مجموعه‌ای از سیگنال‌های سینوسی [۳]

این روش را می‌توان برای هر پروفیل دلخواهی به کار بست. سینوسی‌هایی که قرار است تقریب پروفیل را شکل دهند ممکن است دارای دامنه‌های متفاوتی باشند و گاهی این دامنه شاید بسیار کوچک باشد. یک تبدیل ریاضی وجود دارد که قابلیت محاسبه‌ی دامنه‌ی سینوسی‌ها را دارد، پس می‌تواند به تقریب مورد نظر ما کمک شایانی بکند؛ این تبدیل، تبدیل فوریه^۱ است. تبدیل فوریه را می‌توان به نحوی مقیاس‌بندی کرد که چگونگی پخش شدن تغییرات را در سینوسی‌های مختلف نشان دهد. وقتی به این شکل مقیاس‌دهی شود، به تبدیل صورت گرفته، تابع PSD اطلاق می‌شود.

یک تابع PSD، چگونگی توزیع تغییرات را بر روی عدد موج نشان می‌دهد. تابع PSD در اصل برای توصیف و شناسایی ولتاژ توسعه داده شده است؛ همان محاسبات ریاضی را می‌توان بر پروفیل راه اعمال کرد، اما دو تفاوت بین این دو وجود دارد:

الف) واحد تغییرات در تابع PSD پروفیل راه، مربع ارتفاع است، حال آنکه در علم الکترونیک مربع ولتاژ می‌باشد.

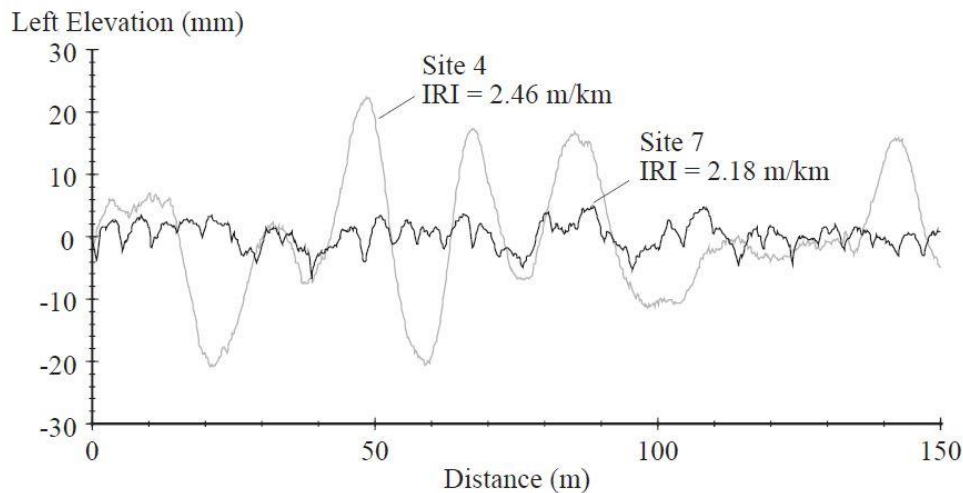
ب) در تابع PSD پروفیل راه، توزیع بر روی عدد موج ($cycle/m$) است، حال آنکه در الکترونیک توزیع بر روی فرکانس ($cycle/sec$) است.

در الکترونیک توان یک مفهوم مرتبط با ولتاژ می‌باشد. تغییرات ولتاژ با توان مقاومت الکتریکی متناسب است، بنابراین PSD، توزیع این توان الکتریکی را بر روی فرکانس نشان می‌دهد، ولی تابع PSD پروفیل راه هیچگونه ارتباطی با توان ندارد.

به عنوان نمونه، دو پروفیل راه در شکل ۲-۱۵ آورده شده است که ویژگی‌های ناهمواری مشابهی دارند ولی پروفیل آن‌ها به کلی متفاوت است. همان‌طور که در نمودار این پروفیل‌ها مشاهده می‌شود، در پروفیل بخش ۴، نوسانات بزرگ و طویل هستند که در جاده‌های آسفالتی بیشتر اتفاق می‌افتد. در مقابل در پروفیل بخش ۷، در کل تغییرات کمتر است و زبرتر و ناملایم تر از پروفیل بخش ۴ می‌باشد

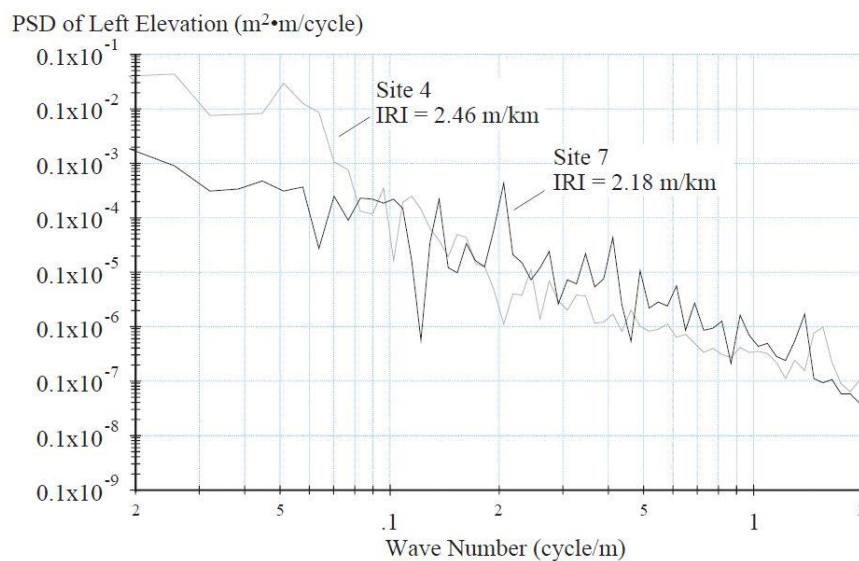
^۱-Fourier Transform

که در جاده‌های بتنی بیشتر رخ می‌دهد.



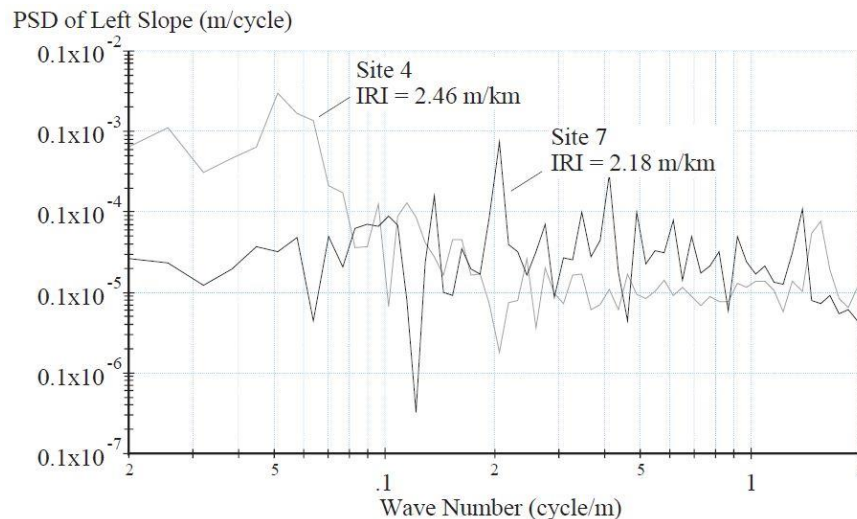
شکل ۲-۱۵- پروفیل‌های دو بخش ۴ و ۷ با میزان IRI نسبتاً مشابه ولی با تفاوت‌های اساسی [۳]

توابع PSD برای هر دو پروفیل در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. در نگاه اول تشابه‌های زیادی بین این دو تابع به نظر می‌رسد، مقادیر دامنه به ازای اعداد موج پایین، بسیار بالاتر از این مقدار به ازای اعداد موج بالا می‌باشد. با وجود این وجه مشترک بین تابع PSD دو پروفیل، تفاوت‌هایی نیز وجود دارد. مثلاً بخش ۴، در مجاورت 0.3 سیکل بر متر (که عدد موج پایینی است)، دامنه نسبتاً بیشتری دارد که به دلیل نوسانات زیادی است که در پروفیل آن مشاهده شد.



شکل ۲-۱۶- نمودارهای PSD بر اساس ارتفاع به دست آمده از پروفیل دو بخش ۴ و ۷ [۳]

مقدار دامنه در نمودار PSD که محور y آن شیب پروفیل را نشان می‌دهد بسیار یکنواخت تر از نمودار PSD است که محور y آن ارتفاع را نشان می‌دهد. با این نمودار می‌توان تفاوت‌های دو جاده را به طور ملموس‌تری مشاهده کرد. در شکل ۲-۱۷ ملاحظه می‌کنید که جاده‌ی بخش ۴ در اعداد موج کمتر از ۰/۱ سیکل بر متر، ناهموارتر و در اعداد موج بین ۰/۲ و ۱ هموارتر از جاده بخش ۷ می‌باشد.



شکل ۲-۱۷- نمودار های PSD بر اساس شیب به دست آمده از پروفیل دو بخش ۴ و ۷ [۳]

۲-۶- تحلیل موجک^۱

۲-۶-۱- کلیات روش موجک

سیگنال‌های زیادی در اطراف ما هستند که نیاز به تحلیل دارند. لرزه نگارها، صدای انسان، توابع اقتصادی، موسیقی، ناهمواری‌های سطح جاده و.... نیاز به فشرده شدن، مدل شدن یا ساده شدن دارند. برای تحلیل سیگنال‌ها، مدل‌های ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا اطلاعاتی که از سیگنال‌های خام به راحتی قابل دسترس نیست به دست آید. تبدیل موجک یکی از تبدیل‌های کارآمد در زمینه پردازش سیگنال است.

موجک‌ها توابع ریاضی هستند که شکل مقیاس-زمان از سری‌های زمانی و روابط آن‌ها جهت تحلیل

سری‌های زمانی که شامل متغیرها و غیر ثابت‌ها می‌باشد ارائه می‌دهند.

تحلیل موجکی قادر به نمایش جنبه‌های مختلف داده‌های متفاوت، نقاط شکست و ناپیوستگی‌ها می‌باشد که ممکن است دیگر روش‌های آنالیز سیگنال آن‌ها را نشان ندهند.

موجک به معنی موج کوچک است و دارای سه مشخصه است:

۱- تعداد نوسان محدود؛

۲- بازگشت سریع به صفر در هر دو جهت مثبت و منفی در دامنه خود؛

۳- میانگین صفر.

این سه ویژگی شرط لازم برای این است که تابعی بتواند به عنوان تبدیل موجکی عمل کند که شرط مقبولیت نامیده می‌شود و به شکل رابطه ۵-۲ بیان می‌گردد:

$$\int \psi(t)dt = 0 \quad \text{رابطه ۵-۲}$$

که در آن $\psi(t)$ تابع موجکی می‌باشد.

دو نوع تبدیل موجکی وجود دارد: تبدیل پیوسته موجکی (CWT) و تبدیل گسسته موجکی (DWT). تبدیل پیوسته موجکی با رابطه ۶-۲ بیان می‌شود:

$$\text{CWT}(\text{Scale}, \text{Position}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(\text{Scale}, \text{Position})dt \quad \text{رابطه ۶-۲}$$

و یا به صورت رابطه ۷-۲:

$$\text{CWT}_s^\psi(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int s(t)\psi_{s,\tau}^*(t)dt \quad \text{رابطه ۷-۲}$$

رابطه‌ی فوق تابعی از دو متغیر s و τ است که τ نشان دهنده انتقال، s بیانگر مقیاس (عکس فرکانس) و علامت * نشان دهنده‌ی مزدوج مختلط است. پارامترهای s و τ اعداد حقیقی هستند و s همیشه مثبت است و ممکن است مقادیر پیوسته یا گسسته به خود بگیرد. s و τ در تبدیل موجکی پیوسته دارای مقادیر پیوسته و در تبدیل موجکی گسسته دارای مقادیر گسسته هستند. $\psi(t)$ تابع موجک مادر نامیده می‌شود. عبارت مادر به این دلیل به کار رفته است که توابع متفاوت بوجود آمده بر اساس پارامترهای مقیاس و انتقال همگی از تابع پایه (موجک مادر) ناشی می‌شوند. به عبارت دیگر

موجک مادر، موجک اصلی برای تولید توابع پنجره دیگر است. کلیه توابع پنجره $\psi_{s,\tau}^*(t)$ که از تابع مادر ساخته می‌شوند، موجک‌های دختر نامیده شده و از رابطه ۲-۸ بدست می‌آیند (ضریب مقیاس با حروف τ و s نمایش داده می‌شود):

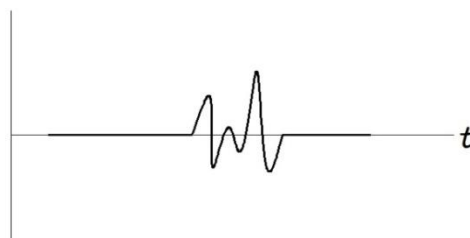
$$\psi_{s,\tau}(t) = \left(\frac{t-\tau}{s} \right) \quad \text{رابطه ۲-۸}$$

مقیاس به طور ساده به معنای کشیده شدن یا فشردن موجک می‌باشد و میزان کشش یا مدت زمان موجک را بیان می‌کند. انتقال موجک به مفهوم به تأخیر انداختن یا جلو انداختن موجک و بیان کننده موقعیت موجک بر روی محور زمان است.

تبدیل گسسته موجکی جهت پیش پردازش و آنالیز سری‌های زمانی مناسب‌تر از تبدیل موجکی پیوسته می‌باشد، زیرا داده‌های تبدیل یافته با DWT اجزای اضافی نداشته و بنابراین تبدیل معکوس را می‌توان برای هر دسته از داده‌های زمان-فرکانس به کار برد.

۲-۶-۲- تعریف موجک

پسوند "ک" برای تصغیر یا کوچک شماری به کار می‌رود و دلیل استفاده از این پسوند، حوزه عملکردی موجک‌هاست. یک موج سینوسی با دامنه ثابت نوسان می‌کند و این نوسان از $-\infty$ تا ∞ ادامه دارد. اما درباره‌ی یک موجک شرایط متفاوت است. یک موجک در ابتدا با دامنه صفر شروع می‌شود و ناگهان با نوسان غیر منظم که تناوب کوتاهی دارد کار را ادامه می‌دهد و در ادامه مسیر خود مجدداً به دامنه صفر باز می‌گردد (شکل ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۸- طرح شماتیک یک تابع موجک [۳]

وقتی شباهت این موجک با یک سیگنال دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد، فقط ناحیه‌ی دارای نوسان در حوزه مقایسه قرار می‌گیرد. حوزه عملکرد محدود و شکل نامنظم یک موجک، قدرتی را به تبدیلات موجک می‌دهد که قادر است در شرایط انتخاب نوع مناسب موجک هر تابع یا سیگنالی را شبیه‌سازی کند. در واقع در بررسی موجک‌ها علاوه بر مقدار فرکانس یک موجک، موقعیت و محل فرکانس هم در شبیه‌سازی یک تابع مورد اهمیت است.

۲-۶-۳- خواص یک تابع موجک

یک تابع موجک برای اینکه کارایی لازم را داشته باشد باید خواص زیر را داشته باشد:

۱- بازه‌ی مورد بررسی محدود باشد؛

۲- باید دارای میانگین صفر باشد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 0 \quad \text{رابطه ۲-۹}$$

۳- دارای نرم غیر صفر باشد:

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt < \infty \quad \text{رابطه ۲-۱۰}$$

۲-۶-۴- روش کار تبدیلات موجک

در بحث تبدیل فوریه، دو مقدار $a_n \cos(\omega_n t)$ و $b_n \sin(\omega_n t)$ مؤلفه‌های اصلی بسط فوریه هستند.

طبق قواعد جمع مثلثات می‌توان جمع این مقادیر را به صورت رابطه ۱۱-۲ بیان کرد.

$$b_n \sin(\omega_n t) + a_n \cos(\omega_n t) = c_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad \text{رابطه ۱۱-۲}$$

که در آن $\omega_n = n\omega_0$ که ω_0 فرکانس پایه است و به تبع آن تابع پایه که در $n = 0$ بوجود می‌آید

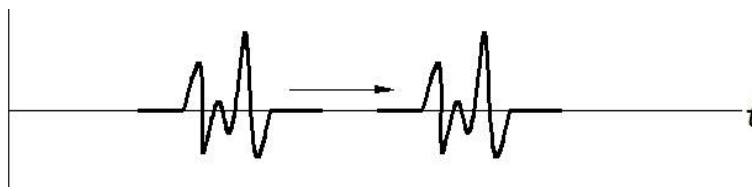
برابر است با $\sin(\omega_0 t)$ ، همچنین φ_n مقدار تغییر فاز در گام n ام است. تابع پایه را با $\psi(t)$ نشان می‌دهند و به آن تابع مادر نیز گفته می‌شود.

بنابراین رابطه ۱۱-۲ را می‌توان به صورت رابطه ۱۲-۲ نوشت:

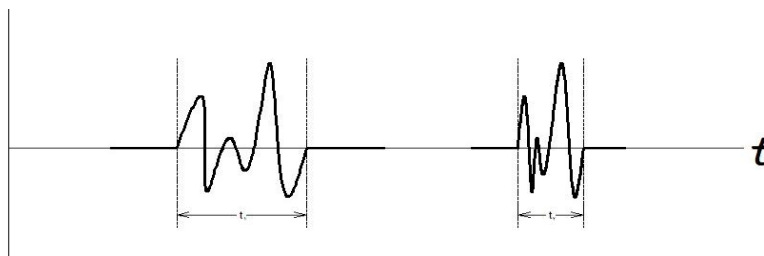
$$b_n \sin(\omega_n t) + a_n \cos(\omega_n t) = c_n \psi\left(nt + \frac{\varphi_n}{\omega_0}\right) \quad \text{رابطه ۱۲-۲}$$

مقدار $\frac{\varphi_n}{\omega_0}$ شیفت زمانی تابع و nt مقدار مقیاس‌دهی یا عمر تابع است که در شکل‌های ۱۹-۲ و ۲۰-۲

۲۰ این دو مفهوم به صورت تصویری به نمایش در آمده است.



شکل ۱۹-۲- شیفت زمانی یک تابع موجک [۳]



شکل ۲۰-۲- عمر یک تابع موجک [۳]

با توجه به تعاریف فوق، یک تابع موجک اصلی یا مادر را به صورت $\psi(t)$ تعریف می‌کنند و خانواده

این تابع موجک با رابطه ۲-۱۳ زیر به وجود می‌آیند:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{رابطه ۲-۱۳}$$

که در آن a عمر تابع و b شیفت زمانی آن است. در واقع اگر $\psi(t)$ موجک مادر باشد، $\psi_{a,b}$ مقیاسی از این تابع است که در بازه‌ی زمانی خاصی بوجود می‌آید. به $\psi_{a,b}$ توابع موجک دختر نیز می‌گویند. حال برای پیدا کردن مقدار شباهت یک تابع موجک و سیگنال مفروض می‌توان از تعاریفی که در قسمت گذشته مطرح شد، استفاده کرد.

$$c_{f,\omega}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t)^* dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad \text{رابطه ۲-۱۴}$$

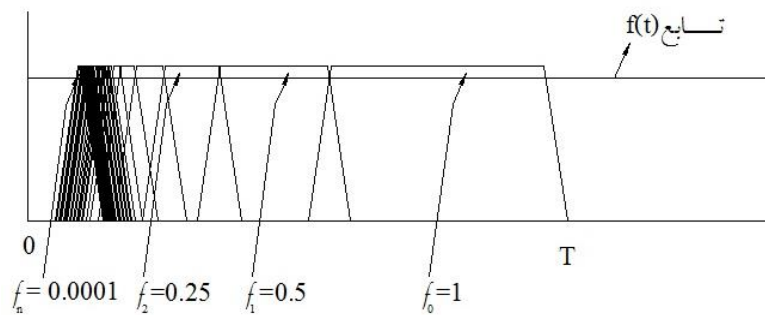
علامت $*$ برای مواقعی است که مقدار $\psi_{a,b}(t)$ ، مقداری مختلط باشد. در نهایت مقدار $c_{f,\omega}(a,b)$ بیانگر این موضوع است که تأثیر تابع موجک $\psi_{a,b}(t)$ با موقعیت b و عمر a در شکل‌گیری تابع $f(t)$ چقدر است.

۲-۶-۵- روش کار تئوری موجک در نرم افزار متلب

همان‌طور که در تحلیل موجک بیان شد، هدف این تئوری محاسبه‌ی $c_{f,\omega}(a,b)$ است، که در آن مقدار $a > 0$ و $-\infty < b < \infty$ می‌باشد. مهمترین موضوعی که در محاسبه مقدار فوق قابل مشاهده است، تعداد نامتناهی مقادیر a و b است که محاسبه‌ی $c_{f,\omega}(a,b)$ را برای همه‌ی این مقادیر بسیار دشوار می‌سازد. یکی از روش‌های مناسب برای ساده کردن محاسبات این است که مقادیر a و b در نقاط معلومی مورد بررسی قرارگیرد، به‌عنوان مثال، مقدار a که عمر تابع موجک است برای ساده‌تر کردن محاسبات فقط در مواقعی که دو برابر می‌شود در محاسبات دخیل می‌گردد.

با توجه به اینکه مفهوم طول عمر یک تابع و فرکانس آن تابع با یکدیگر نسبت معکوس دارند، با افزایش طول عمر تابع، فرکانس آن کاهش پیدا می‌کند و بالعکس. می‌توان با یک مثال این موضوع را توضیح داد؛ فرض شود یک تابع موجک قرار است تابع $f(t)$ را در بازه زمانی 0 و T پوشش دهد، بنابراین بازه مورد نظر را باید با جمع تعدادی از توابع موجک دختر که طول عمر و موقعیت‌های مختلفی دارند

پوشش داد. در مرحله اول تابع موجکی با فرکانس $f_0 = 1$ در بازه مورد نظر قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم عمر تابع موجک دو برابر شده و فرکانس آن نصف می‌شود. در مراحل بعدی نیز به همین ترتیب در هر مرحله عمر تابع موجک دو برابر شده و فرکانس آن نصف می‌شود. در شکل زیر مراحل یاد شده نشان داده شده است.



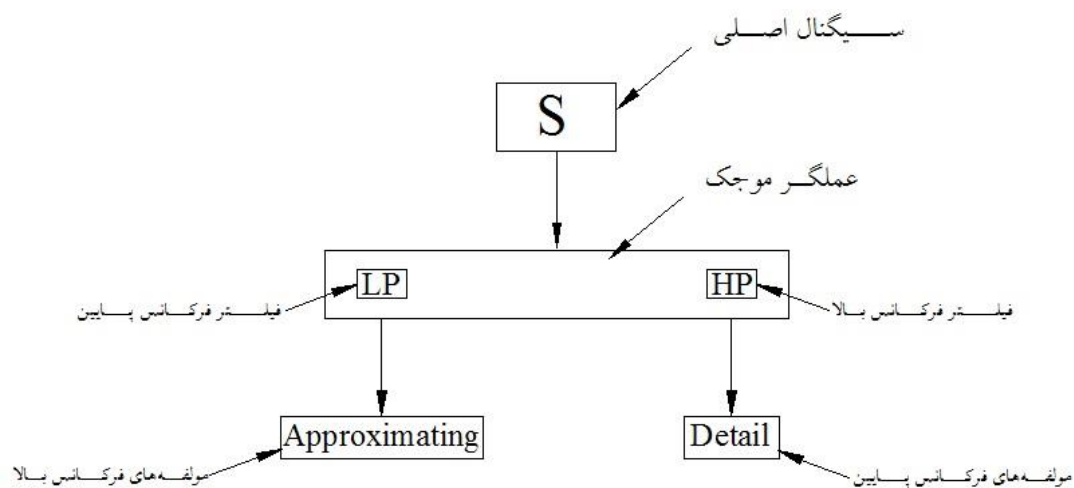
شکل ۲-۲۱- پوشش یک تابع به وسیله توابع موجک با فرکانس های مختلف

با توجه به این شکل ۲-۲۱ می‌توان گفت وقتی تعداد توابع موجک به مرحله‌ی n ام می‌رسد، مقدار زیادی از تابع $f(t)$ مورد پوشش قرار گرفته است، اما هیچ زمان تمام آن بازه مورد پوشش قرار نمی‌گیرد و رابطه ۲-۱۵ برقرار نمی‌شود.

$$f(t) = \sum_{a,b} C_{f,\omega}(a,b) \psi_{a,b}(t) \quad \text{رابطه ۲-۱۵}$$

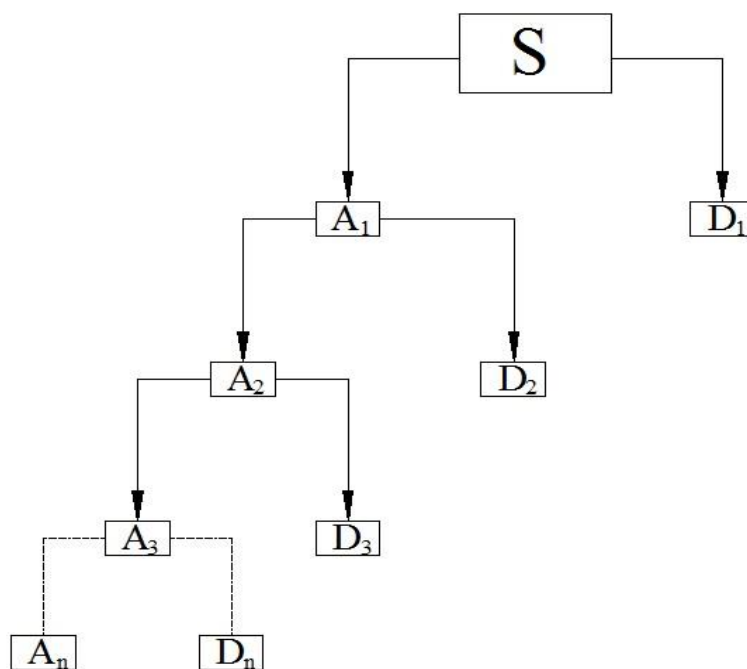
راه حل مورد نظر برای رفع این مشکل این است که فیلتری تعریف شود که در ابتدا اطلاعات مربوط به فرکانس‌های پایین سیگنال مورد نظر را جدا کرده و مقدار آن را به صورت مشخص نگهداری کند. این فیلتر، همان فیلتر پایین‌گذر است که در بخش ۲-۳-۴-۱ به توضیح آن پرداخته شد. پس در واقع یک سیگنال، به دو مؤلفه تقسیم می‌شود: مؤلفه فرکانس پایین و مؤلفه فرکانس بالا.

در استفاده از تئوری موجک به وسیله نرم افزار متلب، برای تحلیل یک سیگنال از دو فیلتر استفاده می‌شود. فیلتر پایین‌گذر که با حذف کردن فرکانس‌های پایین، یک تقریب کلی از سیگنال در اختیار می‌دهد و فیلتر بالاگذر که با حذف فرکانس‌های بالا، مقادیر نویز سیگنال را در اختیار می‌گذارد.



شکل ۲-۲۲- نحوه فیلتر یک سیگنال توسط نرم افزار متلب

این روش را می توان در مراحل بعد نیز انجام داد. به این ترتیب که مؤلفه فرکانس بالا را مجدداً با دو فیلتر پایین گذر و بالاگذر تجزیه و تحلیل نمود.



شکل ۲-۲۳- مراحل فیلتراسیون یک تابع توسط نرم افزار متلب

در بحث روسازی می‌توان با استفاده از تئوری موجک، ناهمواری‌های روسازی را تا n مرحله تجزیه و تحلیل کرد. با هر مرحله تجزیه و تحلیل، ناهمواری‌های جزئی تر حذف شده و ناهمواری‌های بزرگتر باقی می‌ماند و این کار را می‌توان تا جایی انجام داد که فرکانس تابع موجک به قدری کوچک شود که نتیجه تجزیه و تحلیل، پروفیل طولی راه را به دست دهد.

۲-۶-۶- اعمال فیلتر موجک

در این بخش به اعمال فیلتر موجک بر روی داده‌های خام برداشت شده توسط دستگاه *RSP* پرداخته می‌شود.

در ابتدا اطلاعات برداشت شده توسط دستگاه پروفیل سنج *RSP* که در فایلی با همین پسوند ذخیره شده است، به فایلی با فرمت اکسل تبدیل می‌شود. اطلاعات داخل فایل برداشت شده توسط دستگاه شامل نام جاده، کیلومتر از شروع، کیلومتر از پایان، فواصل کنترلی، تراز ارتفاعی در زیر لیزرها و در نهایت فواصل ایستگاه‌های برداشت که شامل ایستگاه شروع و ایستگاه پایان و بازه ایستگاه است. نمونه ای از اطلاعات فایل خروجی دستگاه *RSP* در شکل ۲-۲۴ آمده است.

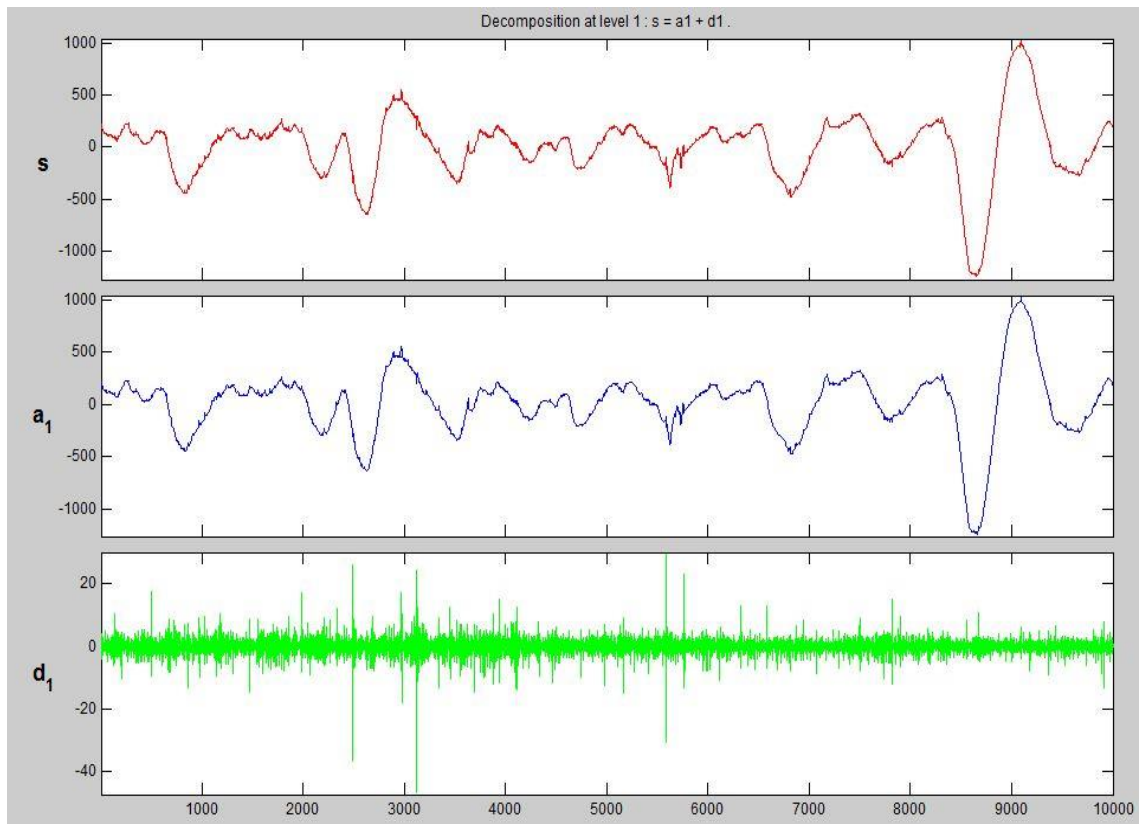
5228,	"NA	"	0.00,1.000,	0.00,1.000,	0.00,1.000
5280,	0.000000,	0.000000,0,	51831.0,	35.5409400,	51.3521822,1004.3, 2,11, 0, 0
5405,	0.000000,	0.000100,	-27.50,	-19.28,	-11.06
5405,	0.000100,	0.000200,	-26.70,	-18.64,	-10.58
5405,	0.000200,	0.000300,	-25.90,	-18.14,	-10.39
5405,	0.000300,	0.000400,	-25.48,	-17.63,	-9.78
5405,	0.000400,	0.000500,	-24.74,	-17.18,	-9.63
5405,	0.000500,	0.000600,	-23.99,	-16.68,	-9.36
5405,	0.000600,	0.000700,	-23.69,	-16.32,	-8.96
5405,	0.000700,	0.000800,	-22.68,	-15.71,	-8.74
5405,	0.000800,	0.000900,	-21.51,	-14.81,	-8.12
5401,	0.000000,	0.001000,	311.1,	291.8,	-9.6539, -9.6313
5405,	0.000900,	0.001000,	-20.92,	-14.45,	-7.98
5406,	0.000000,	0.001000,	3.19,	1.18,	1.00
5407,	0.000000,	0.001000,	2.15,	3.77,	3.29

شکل ۲-۲۴- نمونه ای از اطلاعات فایل خروجی دستگاه *RSP*

پس از تبدیل فرمت اطلاعات به فرمت اکسل، با تعریف یک سیگنال، این اطلاعات در نرم افزار متلب وارد شده و با استفاده از جعبه ابزار *wavelet* به وسیله تئوری موجک تحلیل می‌شود.

اطلاعات ناهمواری که به ازای هر ۱۰ سانتی متر برداشت شده است، در این نرم افزار به عنوان سیگنال اصلی شناخته شده و در مرحله اول توسط دو فیلتر پایین گذر و بالاگذر تحلیل شده و به دو مؤلفه تقریب

سیگنال^۱ و جزئیات سیگنال^۲ تجزیه می‌شود.

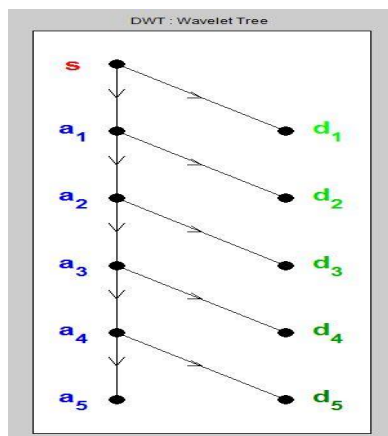


شکل ۲-۲۵- مرحله اول فیلتراسیون

همان‌طور که در شکل ۲-۲۵ مشاهده می‌شود، در مرحله اول فیلتراسیون، ناهمواری‌های کمتر از چهار و پنج میلی‌متر از سیگنال اصلی حذف شده‌اند و نمودار، مؤلفه تقریب سیگنال را پس از حذف فرکانس‌های پایین سیگنال نشان می‌دهد. این فیلتر بر روی کیلومتر اول از ده کیلومتر داده‌ی برداشت شده‌ی این تحقیق اعمال شده است.

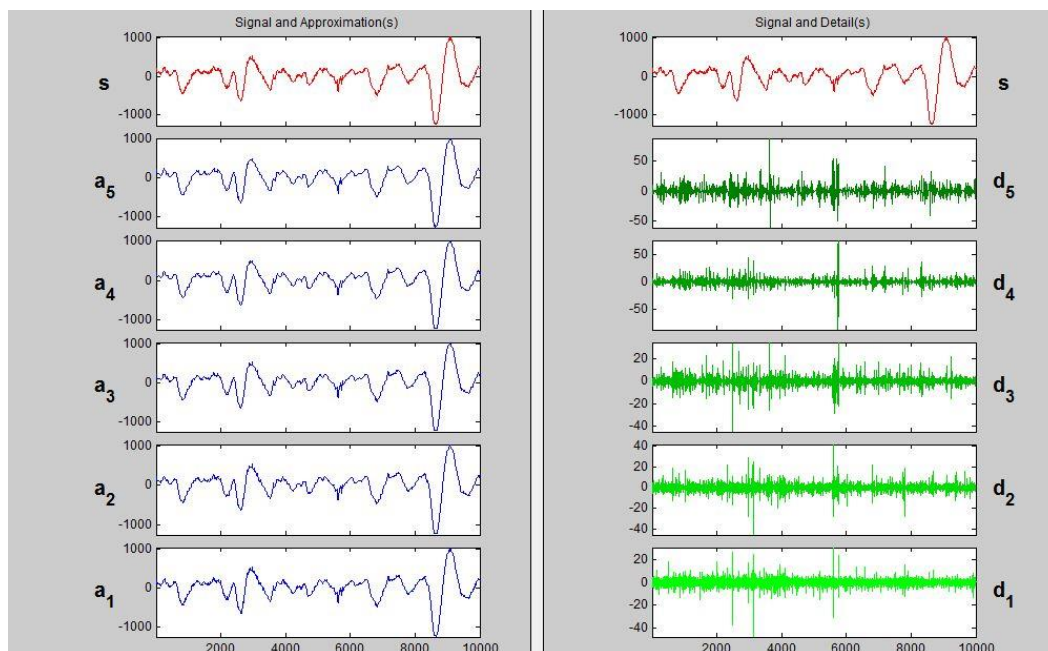
در مرحله بعد نیز می‌توان مؤلفه‌ی تقریب را به‌عنوان سیگنال اصلی در نظر گرفت و آن را تجزیه و تحلیل نمود که نمودار درختی روند انجام این کار در شکل ۲-۲۶ مشاهده می‌شود.

1-approximating
2-detail



شکل ۲-۲۶- نمودار درختی مراحل فیلتراسیون

در نهایت تمامی مراحل اول تا پنجم فیلتراسیون به وسیله تئوری موجک برای ۱۰۰۰ متر اول از داده‌ها در شکل ۲-۲۷ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که روند ذکر شده برای ۱۰ کیلومتر از جاده‌ی مشهد-سرخس مورد بررسی قرار گرفته است، که نمودارها و جداول مربوط به آن‌ها در پیوست ارائه شده است. مقادیر تقریب و جزئیات سیگنال به عنوان داده‌های اولیه و مقدماتی در تحلیل‌های این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۲۷- مقادیر ناهمواری‌های حذف شده (d) و تغییرات ناهمواری (a) در پنج مرحله فیلتراسیون

فصل سوم: پیشینه‌ی تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این فصل به مرور پیشینه‌ی تحقیق و مقالاتی که در محدوده‌ی این تحقیق ارائه شده‌اند، پرداخته خواهد شد. بعضی از مقالات با روش‌های گوناگون در تلاش برای شناسایی ترک‌ها و چاله‌ها بوده و بعضی دیگر مربوط به استفاده از روش آنالیز موجک در جهت تصفیه‌ی داده‌های خروجی دستگاه‌های پروفیل‌سنج بوده‌اند.

۳-۲- تاریخچه‌ی تحلیل ناهمواری و روش‌های تشخیص ترک

۳-۲-۱- مقاله ۱: آنالیز ناهمواری راه با استفاده از تئوری موجک^۱

ناهمواری راه‌ها، مدت زیادی است که به‌عنوان یکی از شاخص‌های مقدماتی وضعیت روسازی استفاده می‌شود. امروزه اندازه‌گیری ناهمواری طولی روسازی‌ها و محاسبه‌ی شاخص ناهمواری مناسب به‌عنوان تخمینی از میزان سرویس‌دهی راه‌ها امری رایج است. با پیشرفت پروفیل‌سنج‌های سرعت بالا، داده‌های گسترده‌ای از پروفیل‌های سطح راه به دست آمده که نیاز به ارزیابی دارد. ناهمواری راه معمولاً توسط یک شاخص ارائه می‌شود که این شاخص از بررسی طول مسیر راه بدست می‌آید. گزینه‌های موجود عبارتند از محاسبه‌ی شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI)، میانگین شتاب قائم (RMSVA)^۲ و مقادیر واریانس شیب (SV)^۳، با این وجود تمامی این شاخص‌ها تنها قادر به ارائه‌ی مقدار میانگینی از وضعیت یک مقطع طولی از راه می‌باشند و قادر به حفظ ماهیت واقعی ناهمواری راه نمی‌باشند. چنین اطلاعات دقیقی از جزئیات ناهمواری، ممکن است برای عملیات تعمیر و نگهداری، عیب‌یابی ناهمواری (به‌عنوان یک نقص) و تجزیه و تحلیل روند خراب شدن روسازی، مناسب و مفید فایده باشد.

این مقاله روش آنالیز تبدیلات موجک را ارائه می‌دهد که مکمل اطلاعاتی است که به صورت معمول در شاخص‌های ناهمواری از آن‌ها استفاده شده است. این روش آنالیز موجک می‌تواند اطلاعات مفیدی

۱- Pavement Roughness Analysis Using Wavelet Theory

۲- Root Mean Square Vertical Acceleration

۳- Slope Variance

را برای مدیریت شبکه روسازی و عملیات تعمیر و نگهداری فراهم کند. این روش می‌تواند به‌عنوان مکملی برای آنالیز IRI (یا سایر شاخص‌ها) و برای درک بهتری از رفتار و عملکرد روسازی در قیاس با هزینه‌ای که برای آن شده است، ابزار ارزشمندی برای مهندسان راه باشد.

براساس آنالیز ارائه شده که در این مقاله و اطلاعات بدست آمده از آن، نتایج زیر به دست آمده است:

الف) با به کار بردن تبدیل موجک گسسته (DWT)^۱ پروفیل ناهمواری می‌تواند به زیر شاخه‌های فرکانسی (اعداد موج) مختلفی تجزیه شود. هر کدام از این زیر شاخه‌ها، بازه‌ی مشخصی از طول موج‌های ناهمواری راه را ارائه می‌کند. برای ناهمواری‌های معمولی، در فواصل ۱۵۲ میلی‌متری، استفاده از اعداد موج زیر، برای ایجاد اطلاعات کافی برای آنالیز ناهمواری، ارائه شده است (نتیجه‌ی مقاله):

۰/۱۱-۰ سیکل بر متر برای a_5 ، ۰/۲۱-۰/۱۱ سیکل بر متر برای d_5 ، ۰/۴۱-۰/۲۱ سیکل بر متر برای d_4 ، ۰/۸۲-۰/۴۱ سیکل بر متر برای d_3 ، ۱/۶۴-۰/۸۲ سیکل بر متر برای d_2 ، ۳/۲۸-۱/۶۴ سیکل بر متر برای d_1 .

محدوده‌های مربوط به طول موج هم معکوس اعداد فوق برای اعداد موج می‌باشند.

ب) هر یک از تبدیل موجک گسسته (DWT) و پیوسته (CWT)^۲ می‌توانند موقعیت بی‌نظمی‌های موجود را در پروفیل ناهمواری آنالیز شده شناسایی کنند. آنالیز موجک می‌تواند تغییرات ناگهانی پروفیل ناهمواری و همچنین محل رخ دادن این گونه بی‌نظمی‌های خاص را شناسایی کند. مثال‌های ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که روش آنالیز موجک می‌تواند به طرز موفقیت آمیزی در شناسایی خرابی‌های روسازی به کار گرفته شود.

پ) روش تبدیل CWT و روش تبدیل PSD می‌توانند برای نظارت بر روند زوال ناهمواری راه استفاده شوند.

نمودار سه بعدی به دست آمده، از روش تبدیل CWT، درک بصری بسیار خوبی از تغییرات ناهمواری

۱- Discrete Wavelet Transform

۲- Continuous Wavelet Transform

به دست می‌دهد، که می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی مناسب برای نظارت و کنترل وضعیت جاده‌ها در سیستم مدیریت راه به کار گرفته شود. روش آنالیز موجک در مقایسه با روش آنالیز فوریه، در توصیف خصوصیات ناهمواری‌ها، بسیار دقیق‌تر و ساده‌تر است.

پروفیل ناهمواری راه یک برش عمودی در راستای مسیر حرکت چرخ می‌باشد که در آن ارتفاع به صورت تابعی از مسافت طی شده بیان می‌شود. تعریف ناهمواری راه به این صورت بیان می‌شود: نامنظمی‌های سطح جاده در پروفیل طولی که بر کیفیت سواری یک راننده‌ی در حال حرکت تاثیر می‌گذارد.

ناهمواری راه معمولاً با یک شاخص در طول مشخصی از راه بیان می‌شود. مقدار این شاخص به این شکل بدست می‌آید که ابتدا پروفیل طولی راه اندازه‌گیری و مشخص می‌شود و سپس با اعمال آنالیزهای ریاضی، پروفیل ساده ساده سازی می‌شود تا ارقام ناهمواری بدست آید. هدف از ایجاد هر یک از سه شاخص ذکر شده برای ناهمواری، طراحی مدل‌های پیش‌بینی سرویس‌دهی جاده‌هاست که می‌تواند برای عملیات بازسازی و یا نگهداری راه‌ها مفید باشد. با این حال این شاخص‌ها (که از خلاصه‌ای از هزاران نقطه ارتفاعی حاصل می‌شود) نتیجه‌ی بازپردازش پروفیل طولی راه است. بنابراین این شاخص‌ها تنها می‌توانند وضعیت میانگینی از مقاطع طولی راه ارائه دهند که این امر برای شناسایی محل و نوع خرابی‌ها کافی نیست. پیشرفت پروفیل‌سنج‌های سرعت بالا، برداشت پروفیل طولی با دقت کافی را میسر می‌سازد. پروفیل ناهمواری بعد دیگری از توصیف ناهمواری را به دست می‌دهد و با نمایش دادن حداکثر جزئیات می‌توان چگونگی توزیع ناهمواری را در طول مسیر دانست. یک پروفیل کامل ناهمواری راه باید شامل تمام ویژگی‌های برآمدگی و فرو رفتگی‌های مسیر باشد.

انحرافات سطح راه به طور طبیعی در طول راه یا اشکال گوناگون پخش شده‌اند ولی می‌توان آن‌ها را به صورت امواجی با طول موج و دامنه‌های متغیر مشخص کرد. PSD مجموعه‌ی کاملی از دامنه‌های ناهمواری را ارائه می‌کند که تابعی از عدد موج است (معکوس طول موج). استاندارد ISO8608 به استانداردسازی روش‌های مقایسه‌ی اندازه‌گیری پروفیل طولی راه می‌پردازد (براساس تابع PSD بدست

آمده از داده‌های پروفیل). برای بدست آوردن یک تخمین خوب از تابع PSD نیاز به داشتن یک نمونه‌ی منطقی و با طول مناسب می‌باشد. استاندارد ISO8608 این مقدار طول را حداقل یک کیلومتر می‌داند. بنابراین هدف استاندارد ISO8608، توصیف وضعیت میانگین از روسازی در یک طول مشخص است. با این حال بر اساس مطالعات صورت گرفته در فرانسه و پرتغال، PSD مرجع قابل اعتمادی برای سنجش سرویس‌دهی راه‌ها نیست. علاوه بر این محاسبه‌ی پروفیل PSD براساس استاندارد ISO8608، منجر به حذف تمام اطلاعات مکانی بدست آمده از داده‌ها می‌شود. بنابراین نمی‌توان از تابع PSD محل دقیق وقوع انواع خرابی‌ها را برداشت کرد.

آنالیز با تبدیل موجک یک ابزار تحلیلی توسعه یافته است که در جهت غلبه بر کاستی‌های تبدیل فوریه به کار می‌رود. موجک‌ها توابعی هستند که نیازهای ریاضی مشخصی را ارضا می‌کند و آن را می‌توان بر داده‌های ارائه شده و سایر توابع اعمال کرد. تبدیل موجک می‌تواند سیگنال را به اجزایی با فرکانس‌های مختلف تجزیه کند و سپس هر جزء را با دقتی مطابق با همان مقیاس ارائه کند. در پایان نتایج مجموعه‌ای از زمان و فرکانس‌هایی است که دارای دقت‌های مختلفی از سیگنال تجزیه شده می‌باشند.

یکی از مزایای خوب آنالیز موجک، توانایی در انجام آنالیز محلی است. بنابراین آنالیز موجک قادر به آشکار سازی جنبه‌ای از داده هاست که سایر روش‌های آنالیز از انجام آن ناتوان‌اند.

این مقاله روش آنالیز تبدیل موجک را ارائه می‌دهد که هدفش تکمیل اطلاعات شاخص‌های رایج ناهمواری (مانند IRI یا RMSVA) و همچنین درک بهتری از مشخصات پروفیل ناهمواری می‌باشد. این روش قادر به شناسایی مشخصات پروفیل ناهمواری در هر دو دامنه‌ی مکانی و فرکانسی می‌باشد. اثبات شده که استفاده از این روش می‌تواند مشخصات ناهمواری مورد نظر مهندسین راه را به طور دقیق بدست دهد، مشخصاتی که درحال حاضر نمی‌توان آن‌ها را از شاخص‌های ناهمواری بدست آورد، مشخصاتی که می‌توانند برای برنامه ریزی عملیات تعمیر و نگهداری راه در سیستم مدیریت راه (PMS) مفید باشند [۵].

۳-۲-۲- مقاله ۲: استفاده از پردازش سیگنال برای آنالیز و اندازه‌گیری

ناهمواری راه^۱

در این مقاله، کاربرد پردازش سیگنال در تحلیل داده‌های پراکنده‌ی پروفیل روسازی‌های آسفالتی (انعطاف پذیر) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی اول پروفیل راه به‌عنوان تابعی از زمان مدل می‌شود. سپس آنالیز PSD به‌طور خلاصه معرفی می‌شود. نشان داده می‌شود که این آنالیز می‌تواند مدل‌های خرابی را با شناسایی ویژگی‌هایی که باعث ناهمواری می‌شوند، بدست دهد. علاوه بر این تحلیل موجک هم به‌عنوان روش دیگری از پردازش سیگنال، برای تحلیل پروفیل راه، معرفی شده است. این روش نه تنها به بررسی ویژگی‌های ناهمواری راه می‌پردازد، بلکه قادر به شناسایی محل خرابی‌هایی با فرکانس بالا (مانند چاله‌ها و ترک‌ها) می‌باشد.

دو بخش برای آزمایش در نظر گرفته شده است، یکی هموار و دیگری ناهموار؛ هر دو بر بزرگرایی با ترافیک کم به طول ۱۰۰ متر بررسی شده اند؛ این مقاطع برای آزمودن دو روش PSD و موجک انجام شده است و نتایج آن نشان می‌دهد که تحلیل موجک براساس آنالیز پروفیل راه، می‌تواند ابزار تشخیص بهتری نسبت به PSD باشد و از آن می‌توان برای آنالیزهای دقت بالا و اندازه گیری ناهمواری راه استفاده‌های مناسب‌تری کرد.

توصیف پروفیل‌های راه از نظر ناهمواری به‌عنوان نشانه‌هایی از میزان رضایت و ایمنی رانندگان، سال‌هاست مورد نظر متصدیان جاده‌ها می‌باشد. تلاش‌های اولیه در جهت تشخیص ناهمواری جاده، توسط عده‌ای از متخصصان (سوار بر خودرویی آزمون‌گر) صورت گرفت که قضاوت آن‌ها از کیفیت سواری، ملاک عمل بود. رایج‌ترین شاخص ناهمواری راه، که توسط اکثر متصدیان راه‌های دنیا به کار می‌رود، شاخص بین‌المللی ناهمواری IRI نام دارد.

این شاخص از روی پاسخ کامپیوتری مدلی با نام "یک چهارم خودرو" بدست می‌آید. IRI با مجزا

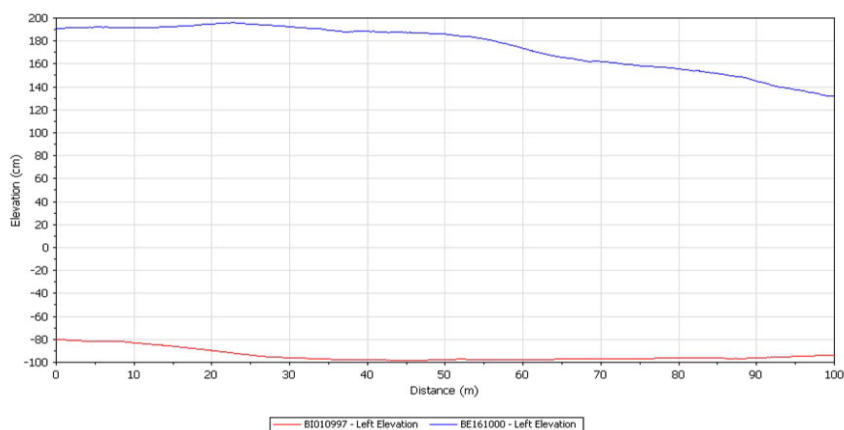
۱- Signal processing approach to road roughness analysis and measurement

کردن جمع دو مقدار محاسبه می‌شود، یکی مقادیری ثابت از جابجایی قائم و دیگری مسافت طی شده. به طور معمول، IRI به عنوان راهنمایی برای عملکرد جاده‌ها در سطح شبکه استفاده می‌شود. در سطح پروژه، اطلاعات از طریق ارزیابی استفاده کننده‌ها و مشاهده‌ی وضعیت بدست می‌آید و استفاده از IRI و بدست آوردن آن ضروری نیست. با توجه به رشد سریع تکنولوژی استفاده از لیزر، تجهیزات مورد استفاده برای برداشت انرژی پروفیل راه، به قدر کافی پیشرفت کرده‌اند. داده‌های ارتفاعی دقیق و گسترده، می‌توانند با سرعت نسبتاً زیاد و قیمت مناسب برداشت شوند.

به عنوان نتیجه باید گفت که تولید یک مدل فضایی دقیق و خودکار از شبکه‌ی راه که کاربرد داده‌ها را عملی کند ایده‌آل مهندسان راه است، مدلی که ارزیابی اتوماتیک عملکرد راه را در هر دو سطح شبکه و پروژه آسان می‌کند. در دسترس بودن داده‌های فضایی دقیق از راه، منجر به استفاده از روش‌های جدید عددی می‌شود، روش‌هایی که به قدری دقیق و واضح باشند که مستقل از ادراک راننده یا ویژگی‌های وسیله نقلیه باشند.

هدف این مقاله، استفاده از داده‌های پروفیل طولی بدست آمده توسط پروفیل لیزری دقیق می‌باشد، همچنین بررسی این که چگونه روش‌های پردازش سیگنال از قبیل PSD و موجک، می‌توانند بعنوان ابزارهایی عددی برای توصیف تحلیلی پروفیل راه به کار روند. تاکید اصلی بر روی کاربرد تبدیل موجک گسسته (DWT) در آنالیز ناهمواری راه می‌باشد.

مطالعه‌ی موردی بر روی دو پروفیل هموار و ناهموار (شکل ۳-۱) صورت گرفته است و سعی در واکاوی تفاوت‌های این دو پروفیل با استفاده از جزئیات موجود در نویزهای برگرفته از فیلتر موجک می‌باشد.



شکل ۳-۱- نمودار پروفیل طولی برای دو جاده‌ی هموار و ناهموار

آنالیز پروفیل راه، به وسیله ابزارهای پردازش سیگنال باعث پیشرفت روشهای مرسوم می‌شود، چرا که این ابزارها مستقل از ادراک مسافران از خصوصیات وسیله نقلیه به آنالیز می‌پردازند. مطالعات نشان می‌دهند که علاوه بر این که این روش‌ها همبستگی خوبی با روشهای سنتی دارد، آنالیزهای دقیق‌تری و اطلاعات جزئی‌تری فراهم می‌کند [۶].

۳-۲-۳- مقاله ۳: تقسیم‌بندی خودکار ترک‌ها با استفاده از روش آستانه‌یابی

تصاویر^۱

جاده‌ها همیشه در معرض خرابی‌هایی هستند که در اثر استفاده از آن‌ها به وجود می‌آیند. این خرابی‌ها که معمولاً به صورت ترک ظاهر می‌شوند، کارایی راه را پایین می‌آورند، کیفیت سرویس‌دهی را کم می‌کنند و گاهی باعث عدم دسترسی مناسب به مناطق دور افتاده می‌شوند. برای جلوگیری از چنین مشکلاتی، باید یک سیاست تعمیر و نگهداری خوب، با تکیه بر ایجاد روش‌های مدیریت نوسازی مناسب، اعمال کرد. مجموعه داده‌های لازم را می‌توان با بررسی‌های جاده‌ای از وضعیت روسازی راه‌ها بدست آورد. برای این امر، بازرسان به برداشت عکس و داده‌هایی از قبیل محل و نوع خرابی‌ها می‌پردازند. این‌گونه بررسی‌ها که بر پایه‌ی مشاهده‌ی انسانی است، نیازمند رانندگی با سرعتی کم (حدود ۱۰

۱- Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding

کیلومتر در روز) می‌باشد، همچنین مستعد خطاهای انسانی است، چرا که در وضعیت‌های خرابی مشابه، دو بازرس ممکن است نتایج تحلیلی متفاوتی گزارش کنند، از طرفی برداشت با سرعتی کم، ممکن است خطراتی را در جاده‌هایی (بزرگراه‌ها) برای بازرسان و سایر راننده‌ها داشته باشد.

برای انجام موفقیت آمیز اقدامات نوسازی مناسب، سیستم‌های خودکار برای شناسایی و آنالیز سریع و قابل اعتماد خرابی‌های راه پیشرفت یافته‌اند. این سیستم‌ها جایگزین روش‌های کند و با خطاهای انسانی شد. خودکار بودن این روش‌ها باعث کاهش مناسب هزینه‌ها می‌شود. تصویری که به وسیله‌ی یک سیستم بررسی خودکار خرابی‌های راه برداشت می‌شود دارای چالش‌هایی نیز می‌باشد. سخت افزار به کار رفته می‌تواند بسیار پیچیده و گران قیمت باشد، همچنین با توجه به تنوع بافت و وضعیت روسازی، تکنیک‌های پردازش اطلاعات پیچیده‌ای نیز مورد نیاز است. تکنیک‌هایی که تا کنون استفاده می‌شده عبارتند از: شبکه‌ی عصبی^۱، میدان تصادفی مارکوف^۲، روش سیستم زنده مصنوعی^۳.

در این مقاله سیستمی راحت برای آنالیز تصاویر بدست آمده در طول بررسی راه، پیشنهاد شده است. دو پایگاه داده‌ی متفاوت برای آزمایش پیشنهادی استفاده شده است:

الف) استفاده از سیستم‌های جمع آوری اطلاعات با سرعت بالا؛

ب) استفاده از روش جمع آوری اطلاعات توسط بررسی‌های چشمی و حضوری بازرسان.

اخیراً تکنیک‌های آنالیز مختلفی برای تشخیص ترک‌ها با استفاده از داده‌های بدست آمده از روش دوم (بازرسی چشمی) به کار رفته است، که این امر این امکان را می‌دهد که بتوان مقایسه‌ی خوبی بین دو روش (سرعت بالا و بازرسی چشمی) انجام داد.

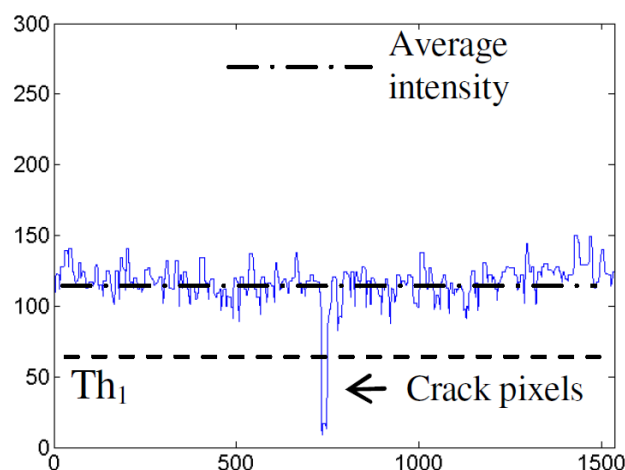
این مقاله یک چارچوب جدید برای تشخیص و طبقه بندی خودکار ترک‌ها (با استفاده از بررسی تصاویر بدست آمده از رانندگی با سرعت بالا) ارائه می‌کند. تصاویر حاصله به وسیله‌ی فیلترهای

۱- Neural networks

۲- Markov random fields

۳- Artificial living systems approaches

مورفولوژیکی (ظاهرشناسی) پیش پردازش می‌شوند. سپس روش «آستانه‌ی حرکت»^۱ برای شناسایی پیکسل‌های تاریک در تصویرها به کار می‌رود؛ این پیکسل‌ها به صورت بالقوه همان ترک‌ها می‌باشند (شکل ۳-۲). تصاویر حاصله به قطعات بدون اشتراک تقسیم می‌شوند (برای محاسبات آنروپی). سپس سیستم طبقه‌بندی به عکس‌ها عنوان‌های مختلف می‌دهد، از قبیل: عرضی، طولی، متفرقه یا بدون ترک. دو مجموعه از داده‌های تصویری برای اهداف آزمون استفاده می‌شوند تا به قدرت تحلیل روش‌هایی پی برده شود که یکی از آن روش‌ها به وسیله‌ی تجهیزات پیشرفته‌ی سرعت بالا بدست آمده است [۷].



شکل ۳-۲- شناسایی ترک از روی پیکسل‌های تصاویر برداشتی از سطح راه با روش آستانه حرکت

۳-۲-۴- مقاله ۴: طبقه بندی خودکار داده‌های ناهمواری راه با استفاده از روش

موجک^۲

این مقاله به ارائه‌ی یک الگوریتم جدید براساس تبدیلات موجک، برای طبقه‌بندی خودکار داده‌های وضعیت راه می‌پردازد. نویسندگان مقاله یک طرح حذف نویز را توسعه داده‌اند که با آن بتوان نویزهای خاصی را جدا کرد؛ برای حفظ اطلاعات مهم باید از یک الگوریتم خاص برای طبقه‌بندی و تشخیص پیروی کرد.

۱- dynamic thresholding

۲- Automatic segmentation of pavement roughness data using wavelet transform

در طول مرحله‌ی طبقه‌بندی، نقاط خاص در نويز شناسایی و علامت گذاری می‌شوند. از نقاط و حدود مرزی جدا شده، برای تقسیم‌بندی داده‌های وضعیت روسازی راه استفاده می‌شود (مناطق با توجه به ویژگی‌های مشابه تقسیم می‌شوند). روش پیشنهادی مقاله به دنبال دستیابی داده‌های اصلی روسازی است و بخش‌های جداشده‌ی حاصله، به طور علمی و عملی داده‌های اصلی را ارائه می‌کنند (بسیار بهتر از روش‌های قبلی).

در دو دهه‌ی گذشته، تجهیزات برداشت پروفیل راه، تبدیل به ابزارهایی برای اندازه‌گیری متغیرهای وضعیت روسازی مختلفی شده‌اند، متغیرهایی از قبیل عمق شیار چرخ و ناهمواری جاده. هدف، استفاده از تکنولوژی برای طبقه‌بندی و شناسایی خودکار کیفیت و یا وضعیت روسازی راه می‌باشد. داده‌های جمع‌آوری شده، برای فراهم کردن اساسی برای مدیریت و نظارت بهتر، به طور خودکار ارائه و تفسیر می‌شوند. چندین نوع از متغیرهای وضعیت روسازی وجود دارند اما شاخص بین المللی ناهمواری (IRI) و عمق شیار چرخ، در هنگام تصمیم‌گیری‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها، مهم‌ترین عوامل به شمار می‌آیند. IRI یک مقیاس اندازه‌گیری استاندارد برای سنجش ناهمواری در سواری می‌باشد؛ ناهمواری‌ای که راننده ممکن است در هنگام رانندگی آن راه حس کند. «شیار^۱» به فرورفتگی سطح راه در مسیر عبور چرخ گفته می‌شود. شیارها می‌توانند منجر به مشکلاتی در راندن خودرو شده و باعث ایجاد حرکات نامنظم شوند.

سازمان مدیریت راه‌ها، برای مشاهده و اندازه‌گیری وضعیت راه‌ها در تمامی جاده‌ها، از خودرویی که با لیزر و رادار و دوربین مجهز شده است استفاده می‌کند. اکثر داده‌های وضعیت روسازی، به طور مستمر اندازه‌گیری می‌شوند. هرچه داده‌های بیشتری جمع‌آوری شود، پایگاه داده‌ها هم به طور فزاینده‌ای بزرگ می‌شوند. برای مدیریت روسازی، ارائه‌ی نماینده‌ای از هر بخش گسترده می‌تواند بسیار مهم‌تر از ارائه تک تک متغیرهای اندازه‌گیری شده از ناهمواری باشد. بنابراین باید به دنبال راهی مؤثرتر برای تفسیر داده‌های وضعیت راه بود. یک راه حل بدیهی این است که داده‌ها را با توجه مناطقی که از لحاظ

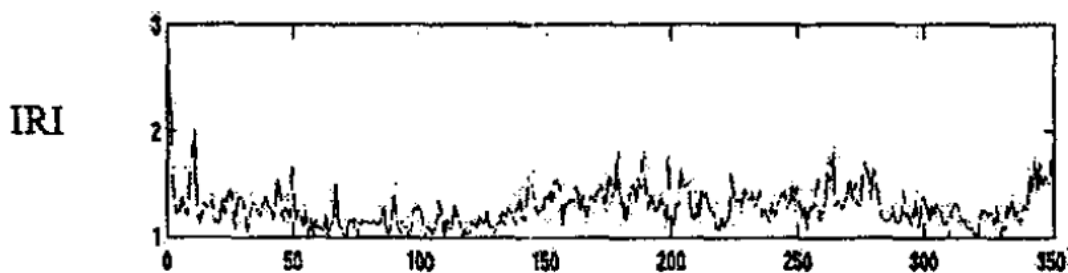
آماري ويژگي‌هاي مشابهي دارند تقسيم‌بندي کرد. اين امر مي‌تواند هم اطلاعاتي راجع به وضعيت روسازي فراهم کند و هم از اندازه‌ي حتمي اطلاعات مي‌کاهد.

براي تقسيم‌بندي خودکار داده‌ها، از روش‌هاي آماري استفاده مي‌شود. روش رايچ براي اينکار، روش CDA^۱ (روش اختلاف تجمعي) مي‌باشد. داده‌ها به چند بخش کوچک تقسيم مي‌شوند که عمق راه در هر بخش تقريباً يکسان مي‌باشد. ميانگين عمق راه در طول بخش‌هاي مختلف، مقدار عمق راه را در کل مسير برداشت شده ارائه مي‌کند. از CDA به‌عنوان اساس فرآيند تقسيم‌بندي استفاده مي‌شود. بخش‌هاي کوچک‌تر در تقسيم‌بندي، با بخش‌هاي مجاور ترکيب مي‌شوند. بخش‌هاي مجاور در صورتي با هم ترکيب مي‌شوند که ميانگين عمق برداشت شده‌ي آن دو بخش با هم تفاوت چنداني نداشته باشد. اين روش مي‌تواند به‌عنوان ابزاري مفيد در بخش‌هاي مختلف مديريت راه‌ها استفاده شود.

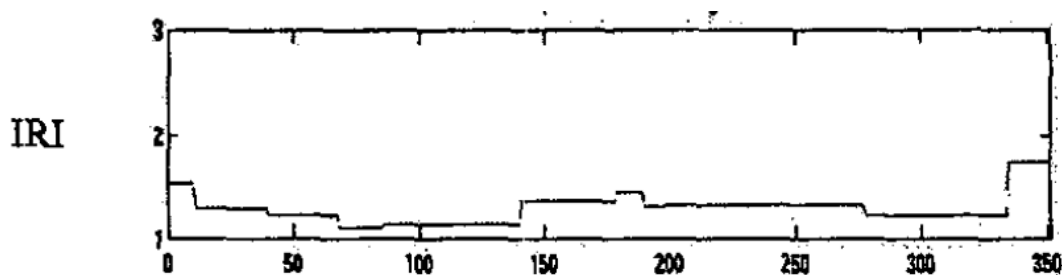
روش‌هاي متکي در CDA، آنچنان در عمل استفاده نمي‌شوند، چرا که امواج نويزي شکل مشاهده شده در پروفيل راه را مي‌توان به‌راحتي با روش‌هاي تجمعي ميانگين‌گيري کرد. همچنين اين نويزها در طول مسير به صورت اتفاقي دچار تغييرات ناگهاني مي‌شود که يا ناشي از دستگاه جمع‌آوري کننده‌ي اطلاعات است و يا ناشي از خرابي‌هاي شديد موجود در نقاط مختلف جاده. بنابر اين نياز به فيلتر کردن اين نويزهاي اتفاقي و تقسيم‌بندي بخش‌ها براساس مقدار IRI نسبتاً يکسان مي‌باشد. اين کار منجر به اخذ تصميمات مفيدتري در مديريت راه مي‌شود.

اين مقاله روش جديد براساس تبديلات موجک ارائه مي‌کند و از آن براي تقسيم‌بندي داده‌هاي وضعيت راه استفاده مي‌کند. يک طرح براي حذف نويز و امواج کوچک ارائه مي‌شود. در طول مرحله‌ي تقسيم‌بندي، نقاط خاصي در نويز شناسايي و علامت گذاري مي‌شوند. از نقاط و حدود مرزي جدا شده، براي تقسيم‌بندي داده‌هاي وضعيت روسازي راه استفاده مي‌شود (مناطق با توجه به ويژگي‌هاي مشابه تقسيم‌بندي مي‌شوند). در نهايت اين تقسيم‌بندي، يک بار بر اساس مقادير ميانگين و بار ديگر بر اساس مقادير ماکزيمم صورت مي‌گيرد که نتايج حاصل در شکل ۳-۳ قابل مشاهده است [۸].

۱- Cumulative Difference Approach



شکل ۳-۳-الف- نمودار اصلی IRI



شکل ۳-۳-ب- نمودار IRI تقسیم بندی شده بر اساس میانگین



شکل ۳-۳-پ- نمودار IRI تقسیم بندی شده بر اساس ماکزیمم

۳-۲-۵- مقاله ۵: یک روش جدید برای آنالیز توپوگرافی سطح راه^۱

این مقاله روشی جدید برای تحلیل توپوگرافی سطح راه براساس تجزیه‌ی تجربی ارائه می‌دهد. روشی که به خوبی قادر است پروفیل سطح راه را به بخش‌های مختلفی تقسیم‌بندی کند. همان‌طور که می‌دانید سطح راه از تعداد زیادی طول موج ناهمواری تشکیل شده است. این ویژگی‌های چند مقیاسی، با جنبه‌های مختلفی از سطح راه در ارتباط می‌باشند. تحلیل و توصیف این ویژگی‌ها، یکی از اهداف

^۱- A new approach to analysis of surface topography

مهندسان راه می‌باشد.

به منظور جدا کردن داده‌های پروفیل سطح به اجزایی با طول موج‌های مختلف، روش‌های فیلتراسیون زیادی وجود دارد، مانند روش‌های «فیلتر 2RC»^۱ و «فیلتر گاوسی»^۲. لیو و راجا^۳ و روسو و همکارانش^۴ مطالعه‌ای درخصوص کاربرد فیلتر موجک در آنالیز چند مقیاسی سطح راه انجام داده‌اند. فیلتر مورفولوژیکی^۵ (ظاهر شناسی) هم توسط دیتش و همکارانش^۶ به کار گرفته شد.

در سال ۱۹۹۸ هوانگ^۷ در ابتدا روش تجزیه‌ی تجربی^۸ (EMD) را ارائه داد که این روش قابلیت تجزیه‌ی سیگنال‌های متغیر و غیرخطی را داشت؛ سپس درک بهتری از خصوصیات فیزیکی سیگنال ارائه داد. مزیت اصلی روش EMD سازگاری مناسب آن با سیگنال بود، چرا که نتایج تجزیه، از خود سیگنال اخذ می‌شد.

در این مقاله روش EMD برای بررسی ویژگی‌های چند مقیاسی ناهمواری راه به کار گرفته شده است و برای اعتباردادن به قابلیت‌های این روش، از داده‌های پروفیل راه برای آزمایش روش مزبور استفاده شده است. فیلتر جدید EMD پروفیل اصلی برداشت شده از سطح راه را به مجموعه‌ای از نویزها با طول موج‌های مختلف تقسیم می‌کند، به طوری که مجموع نویزهای تفکیک شده، پروفیل اصلی را به دست می‌دهد (شکل ۳-۴) [۹].

۱- 2RC filter

۲- Gaussian filter

۳- Liu and Raja

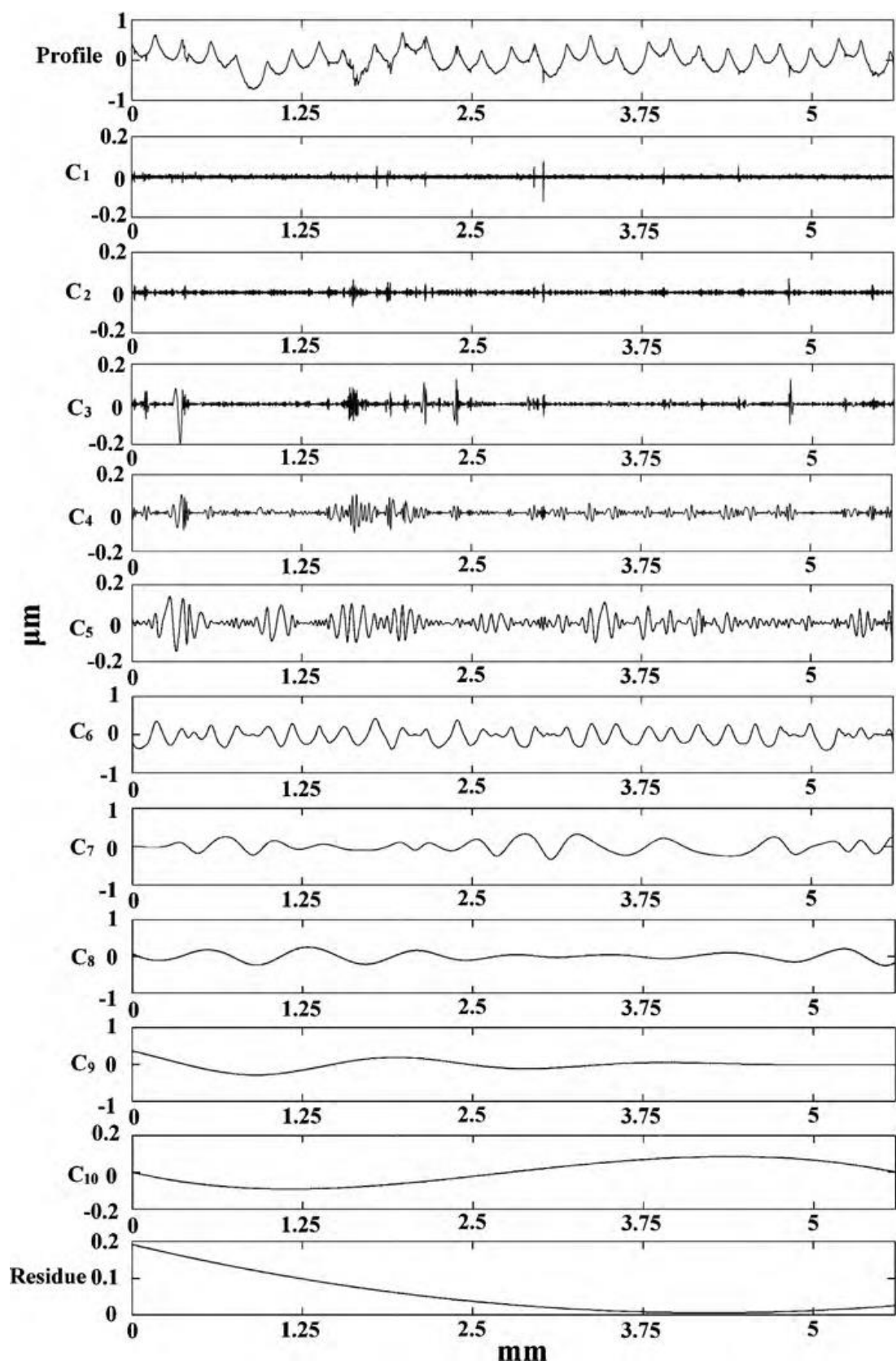
۴- Josso et al

۵- Morphological filter

۶- Dietzsch et al

۷- Huang

۸- Empirical mode decomposition



شکل ۳-۴- تجزیه‌ی پروفیل اصلی سطح راه به نویزهایی با طول موج‌های مختلف با فیلتر EMD

۳-۲-۶: مقاله ۶: نرمال کردن فرکانس تبدیل موجک برای آنالیز ناهمواری راه^۱

مشکلات عدیده‌ای در زمینه‌ی آنالیز ساختار سطح راه وجود دارد که این مشکلات به‌عنوان مسئله‌ای چالش برانگیز سال‌هاست محققان را درگیر مطالعات گسترده‌ای کرده است.

پردازش تصویر، می‌تواند یک گزینه‌ی خوب برای حل این‌گونه مشکلات باشد. اطلاعات ناهمواری را می‌توان از روی عکس‌های برداشت شده بدست آورد، به این‌گونه که مثلاً قسمت‌های تیره‌تر عکس نشان‌گر شیارها و ترک‌های عمیق‌ترند و قسمت‌های روشن‌تر نشان‌گر برآمدگی‌های سطح راه می‌باشند. ابزارهای جدید قادرند تصاویری سه بعدی از سطح راه ارائه کنند، بنابراین می‌توان از توابع دو بعدی برای پردازش و توصیف سطح راه بهره برد. مطالعات در خصوص آنالیز این تصاویر هنوز پایان نیافته است، چرا که هنوز روش واحدی برای توصیف ساختار سطح راه به طور کامل وجود ندارد. نقطه ضعف اکثر آنالیزهایی که تا کنون صورت گرفته این است که تنها به تحلیل یک مقیاسی پرداخته‌اند. این محدودیت را می‌توان با استفاده از روش‌های چند مقیاسی از قبیل تبدیلات موجک رفع کرد. به بیان دیگر اکثر روش‌های معمول، فقط قادر به آنالیز سیگنال‌های مکان ثابت می‌باشند؛ حال آنکه سیگنال‌های واقعی دارای مکان متغیراند. یک روش مؤثر در آنالیز سیگنال‌های دارای مکان متغیر، استفاده از روش‌های مکان-فرکانس^۲ می‌باشد.

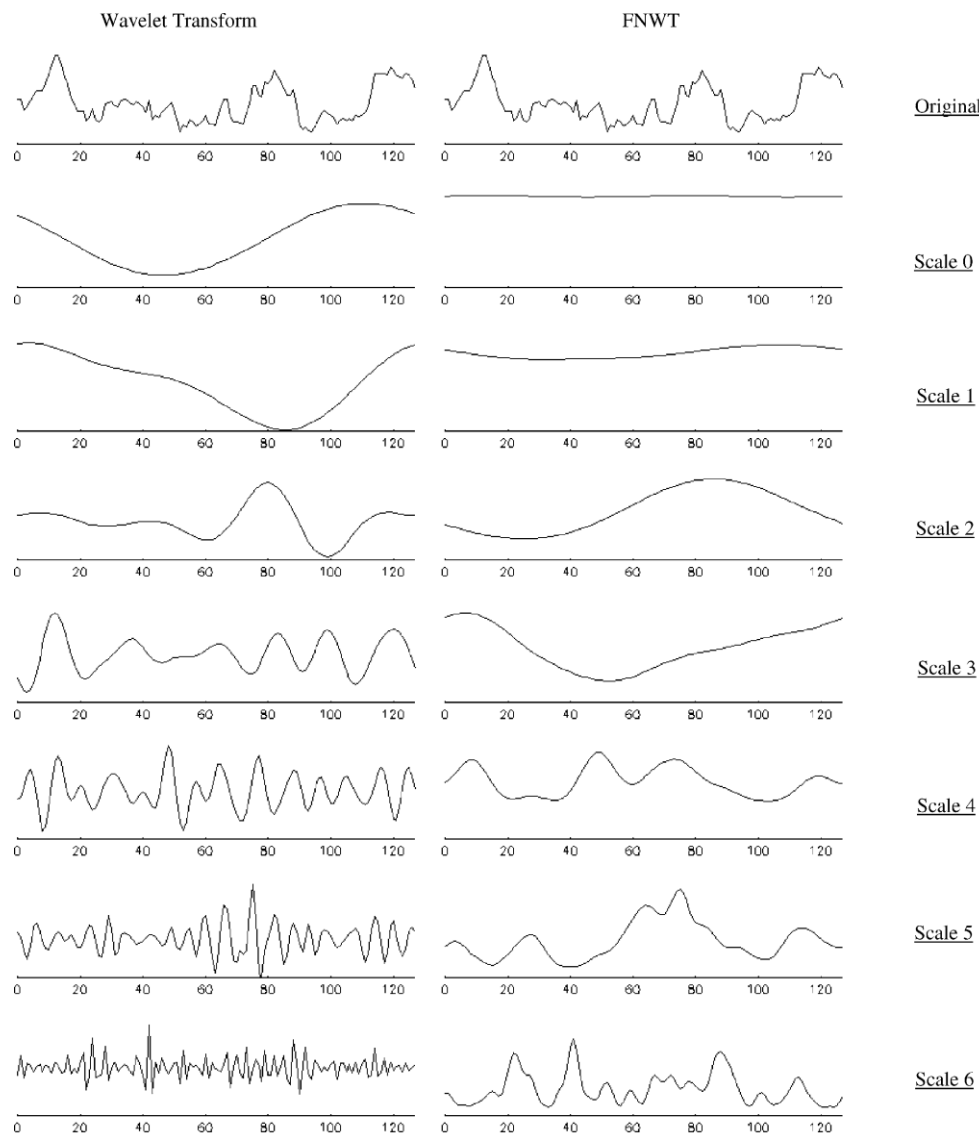
یکی از این روش‌ها، روش تبدیل موجک است که با دقت بالایی قادر به شناسایی و توصیف ساختار سطح راه می‌باشد. این مقاله یک روش جدید برای آنالیز و توصیف ناهمواری راه بر پایه‌ی تبدیلات موجک ارائه می‌کند. پس از یک مرور اجمالی بر کاربرد موجک در آنالیز ناهمواری، نتایج به دست آمده با استفاده از یک ابزار آنالیز جدید به نام FNWT^۳ (نرمال کردن فرکانس تبدیلات موجک) ارائه می‌شوند. فرایند نرمال کردن نویزهای فیلتر موجک در شکل ۳-۵ قابل مشاهده است. در پایان با استفاده از

۱- Frequency normalized wavelet transform for surface roughness analysis and characterization

۲- Space-frequency methods

۳- Frequency normalized wavelet transform

پردازش سیگنال، ارتباطی مابین نویزهای نرمال شده و تصاویر برداشت شده از سطح راه برقرار شده است [۱۰].



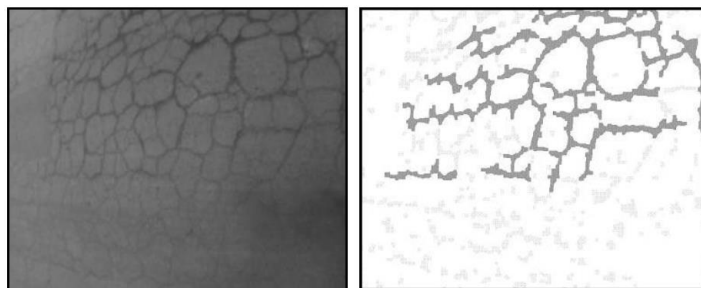
شکل ۳-۵- فرایند نرمال کردن فرکانس تبدیلات موجک

۳-۲-۷- مقاله ۷: روش شناسایی خودکار چاله ها، ترک ها و وصله ها با استفاده

از فیلم های ضبط شده از سطح راه^۱

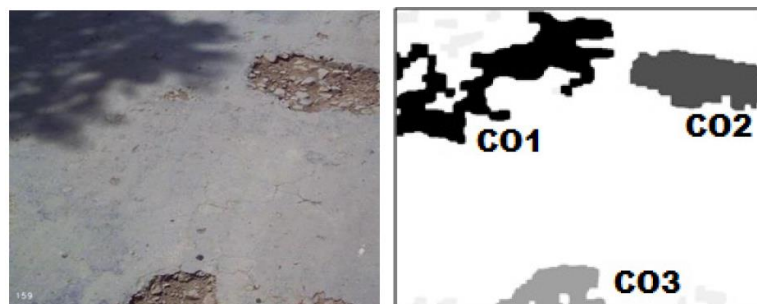
تشخیص خرابی هایی از قبیل چاله ها و ترک ها و وصله ها در کشور هند جزء ارزیابی های ضروری می باشد. تاکنون ارزیابی این خرابی ها از طریق جمع آوری داده های خرابی راه به صورت چشمی و پردازش این داده های خام صورت می گرفت. امروزه می توان با سیستم های خودکار و متنوعی از قبیل سیستم های برداشت داده ها به صورت تصویر، داده های مورد نظر را برداشت کرد. با این وجود، تحلیل داده های خام به دست آمده از ویدئوهای برداشت شده از خرابی های راه، هنوز به صورت دستی صورت می گیرد. این امر هم زمان و هزینه را اتلاف می کند و هم باعث افت سرعت در مدیریت نگهداری راه ها می شود.

در این مقاله روشی مناسب برای تشخیص خودکار و ارزیابی ترک ها و چاله ها از روی داده های تصویری برداشت شده از جاده های هند، ارائه شده است. این روش پیشنهادی از تکنیک های پردازش تصویر برای ارزیابی های خود بهره می گیرد که برای مثال نمونه ای از این ارزیابی برای ترک پوست سوسماری و چاله در شکل ۳-۶ قابل مشاهده است. دقت نتایج بدست آمده در پایان ارزیابی می شوند و با نتایج روش هایی که تا کنون ارائه شده است مقایسه می گردد و این نتیجه به دست می آید که روش جدید این مقاله قوی تر و کارآمدتر است. اطلاعات به دست آمده از روش پیشنهادی را می توان برای تعیین سطوح مختلف نگهداری (تعمیر و بازسازی راه ها) بکار برد [۱۱].



شکل ۳-۶-الف- تصویر حقیقی و پردازش شده ی ترک پوست سوسماری

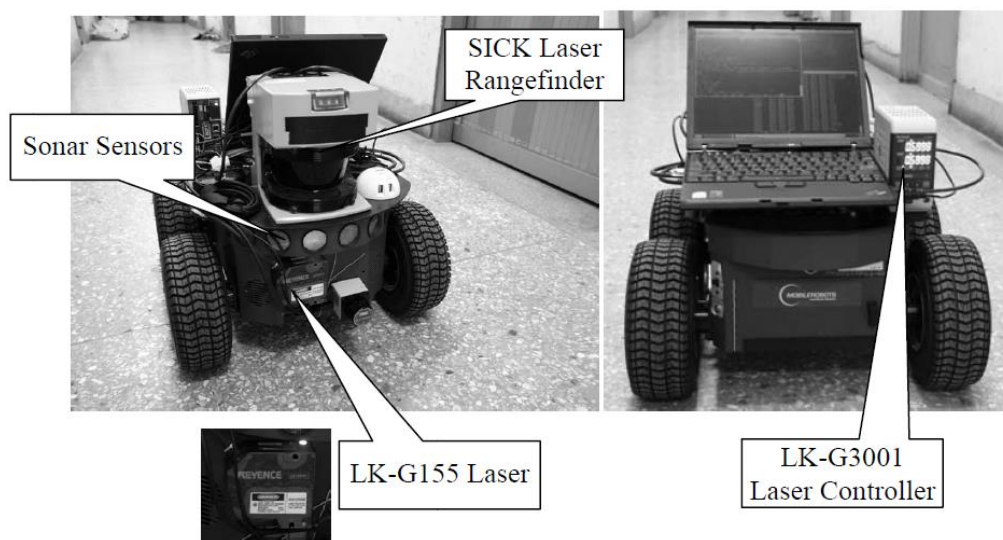
۱- Method for automated assessment of potholes, crack and patches from road surface video clips



شکل ۳-۶-ب- تصویر حقیقی و پردازش شده‌ی چاله

۳-۲-۸- مقاله ۸: اندازه‌گیری عدد IRI با استفاده از روبات خودکار P3-AT^۱

این مقاله به آزمایش روباتی خودکار برای بدست آوردن IRI در یک مسیر می‌پردازد. این روبات پایونیر P3-AT^۲ نام دارد و مجهز به قطعاتی همچون کیلومتر شمار، یک لپ تاپ و لیزر می‌باشد؛ نمایی از این ربات در شکل ۳-۷ قابل مشاهده است. از نرم افزار پرووال^۳ (ProVAL) هم جهت محاسبه‌ی IRI استفاده می‌شود.



شکل ۳-۷- تصویر حقیقی و پردازش شده‌ی چاله

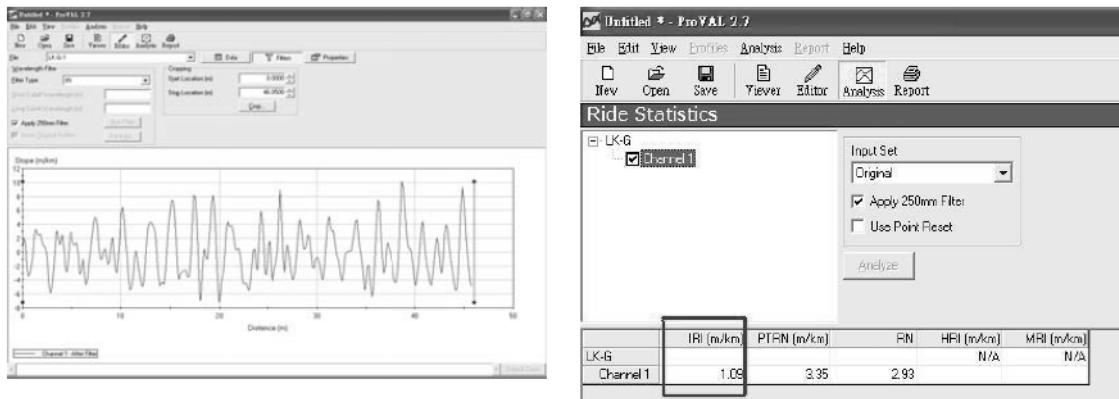
آزمایش اولیه بر روی ۵۰ متر از طول سطحی صاف و یکنواخت صورت گرفته است. میزان IRI بدست آمده توسط روبات نام برده ۱/۰۹ متر بر کیلومتر بدست آمد که بسیار نزدیک به میزان بدست آمده از دستگاه پروفیل‌سنج دستی می‌باشد؛ نمودار آن و مقدار آن که با نرم افزار پرووال محاسبه شده است

۱- Measurement of the IRI using an autonomous robot (P3-AT)

۲- Pioneer P3-AT

۳- Profile Viewing and AnaLysis

در شکل ۳-۸ آورده شده است. این کار یک گام اولیه در استفاده از روبات‌ها برای بررسی روسازی راه‌های می‌باشد. همچنین درباره‌ی ادغام سیستم هدایت شتابی^۱ (INS) و سیستم موقعیت‌یابی جهانی^۲ (GPS) با استفاده از روبات P3-AT بحث شده است.



شکل ۳-۸- نمودار IRI و مقدار محاسبه شده‌ی آن توسط نرم افزار پرووال

ناهمواری ارتباط مستقیمی با کیفیت سواری و هزینه‌ای استهلاک خودرو دارد. انجمن ASTM^۳ امریکا ناهمواری را انحراف سطح جاده از یک سطح صاف و مناسب تعریف می‌کند. پروفیل راه، ارتفاع‌های سطح راه را به صورت تابعی از فاصله‌ی طی شده در مسیر بیان می‌کند. در این مطالعه، برای اولین بار از روبات برای برداشت داده‌های ناهمواری در سطح پروژه استفاده شده است. روبات P3-AT قادر به ارائه‌ی پروفیل سطح راه در فواصل مقرر نمونه‌گیری می‌باشد و همچنین می‌تواند میزان IRI را محاسبه و ارائه کند. انتظار می‌رود که روبات‌ها در آینده‌ای نزدیک جایگزین تجهیزات دستی شوند [۱۲].

۳-۲-۹- مقاله ۹: شناسایی ترک‌های روسازی بر اساس FDWT^۴

از آنجایی که تشخیص خودکار ترک‌ها باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود، به موضوعی مهم در مدیریت راه‌ها تبدیل شده است. به دلیل پیچیدگی و تنوع تصاویر برداشت شده از سطح راه، ارائه‌ی یک الگوریتم

۱- Inertial navigation systems

۲- Global Positioning Systems

۳- American Society for Testing and Materials

۴- Pavement cracks detection based a FDWT

تشخیص ترک مؤثر کارآسانی نیست. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص ترک‌ها به نام FWD^۱ (دیفرانسیل کسری و تبدیل موجک) پیشنهاد شده است.

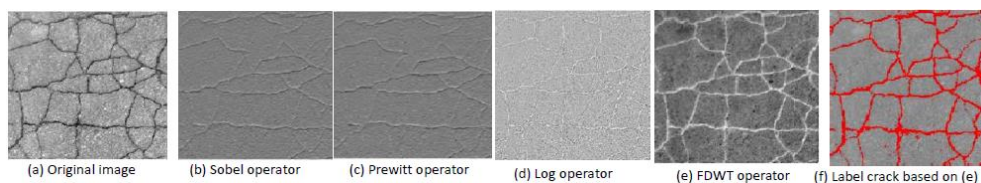
وضعیت راه‌های هر کشور، نقش مهمی را در اقتصاد ملی زندگی مردم ایفا می‌کند. بنابراین باید به طور منظم وضعیت راه‌ها بررسی شود و در پی آن اقدامات مقتضی در خصوص تعمیرات خرابی‌های موجود صورت گیرد. یکی از روش‌های سنتی مورد استفاده برای ارزیابی جاده‌ها، روش برداشت چشمی اطلاعات است، روشی که هزینه‌بر، ناکارآمد، خطرناک و غیرقابل اعتماد است. بنابراین نیاز به روش سریع‌تر و کارآمدتر احساس می‌شود. استفاده از تصاویر می‌تواند روش بسیار مناسبی قلمداد شود، چرا که استفاده از دوربین‌های سریع و با دقت بالا و همچنین استفاده از کامپیوترهای مناسب، پردازش اطلاعات خرابی‌ها را آسان‌تر می‌کند.

در بسیاری از مطالعات به استفاده از تصاویر برای شناسایی خرابی‌های روسازی راه، پرداخته‌اند در همین راستا نائوکی و همکاران^۲ یک الگوریتم براساس روش مورفولوژی^۳ برای شناسایی ترک‌ها ارائه داده است. همچنین در مقاله‌ای دیگر از روش شبکه‌های عصبی برای شناسایی تصاویر خرابی‌های راه استفاده شده است. با این حال به دلیل پیچیدگی و تنوع تصاویر برداشت شده از سطح راه، ارائه‌ی یک الگوریتم تشخیص ترک مؤثر، همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. در این مقاله تلاش شده تا با استفاده از دیفرانسیل کسری و تبدیلات موجک به شناسایی ترک‌های راه پرداخته شود. در شکل ۳-۹، پردازش تصویر یک نمونه ترک با روش‌های سابق با روش FDWT مقایسه شده است و در نتیجه کارا بودن این روش اثبات شده است؛ با این حال در پایان نتایج این امر را تصدیق می‌کند که روش پیشنهادی را فقط می‌توان در جاده‌های صاف و هموار به کار برد و فقط قادر به شناسایی ترک‌های جزئی و ضعیف می‌باشد [۱۳].

۱- Fractional differential and wavelet transform

۲- Naoki et al

۳- morphological method



شکل ۳-۹- پردازش تصویر یک ترک با چهار روش

۳-۲-۱۰- مقاله ۱۰: بهبود ارتباط بین ناهمواری و خرابی‌های قابل مشاهده‌ی

سطح راه^۱

مقدار ناهمواری یکی از ویژگی‌های مهم هر راه است که میزان صافی یا ناصافی هر راه اتلاق می‌شود و ارتباط مستقیمی با ایمنی رانندگان دارد. این مقدار را می‌توان با شاخص بین المللی ناهمواری IRI بیان کرد، شاخصی که به نوعی بیان‌گر میزان خرابی‌های سطح راه می‌باشد. تمرکز این مقاله بر روی ارتقای ارتباط بین ناهمواری و سایر خرابی‌های راه است. مطالعه‌ی موردی به بررسی بخشی از جاده‌های هند می‌پردازد. داده‌ها برای هر ۵۰ متر به طور جداگانه جمع آوری می‌شود. داده‌های ناهمواری به وسیله‌ی ((بامپ اینتگریتور^۲)) جمع آوری می‌شود که نمای دستگاه در شکل ۳-۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۰- دستگاه ناهمواری سنج بامپ اینتگریتور

جاده‌های روستایی به عنوان بخش مهم در توسعه‌ی روستاها، می‌تواند باعث بهبود دسترسی به خدمات اقتصادی و اجتماعی شوند، همچنین ایجاد آن‌ها می‌تواند منجر به درآمد کشاورزان و ایجاد فرصت‌های شغلی جدید شوند. برای حصول این ایده آل‌ها دولت هند با هزینه‌ی خود در سال ۲۰۰۰

۱- Development of Relationship between Roughness (IRI) and visible surface distresses

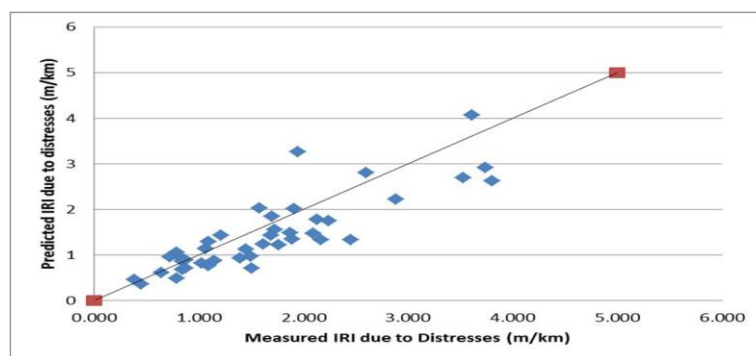
۲- Bump Integrator

برنامه PMGSY^۱ را ایجاد کرد. سرویس دهی یا کیفیت سواری در یک جاده شاخص مهمی از عملکرد آن راه می‌باشد. شاخص IRI در این ارزیابی می‌تواند کمک به سزایی به مهندسان راه بدهد.

اندازه‌گیری ناهمواری کار دشواری است، چرا که علاوه بر ناهمواری واقعی راه، مقدار آن، از ویژگی‌های خودروی برداشت کننده هم تأثیر می‌پذیرد. روش‌ها و تکنیک‌های زیادی برای اندازه‌گیری ناهمواری وجود دارند که از لحاظ پیچیدگی، قیمت، سرعت، دقت، با هم تفاوت دارند.

بامپ اینگریتور نصب شده بر روی خودرو، از حدود ۱۰ سال پیش توسط آزمایشگاه مطالعات راه و حمل و نقل انگلیس به کار گرفته شده است. این وسیله مقرون به صرفه است و استفاده از آن آسان است و برای کشورهای دارای تکنولوژی اندک هم مناسب است. همچنین در سرعت‌های مختلف می‌توان از آن استفاده کرد که این امر این دستگاه را کارآمدتر می‌کند.

دیوان و اسمیت^۲ در سال ۲۰۰۲ نشان دادند که اگر بتوانند یک رابطه‌ی مناسب بین IRI کنونی راه و IRI پیش‌بینی شده پیدا کنند، اداره‌های راه تنها نیاز به اطلاعات خرابی‌ها دارند تا بتوانند مقدار هزینه‌های عملکردی خودروها^۳ (VOC) را برای خیابان‌ها برآورده کنند. این ارتباط در شکل ۳-۱۱ قابل مشاهده است [۱۴].



شکل ۳-۱۱- نمودار ارتباط بین IRI کنونی راه و IRI پیش‌بینی شده ناشی از خرابی‌های سطح راه

۱- Pradhan Mantri Gram Sadak Yojana

۲- Dewan and. Smith

۳- Vehicle Operation Cost

فصل چہارم: جمع آوری دادہا

۴-۱- مقدمه

در فصل جاری ابتدا به نحوه‌ی برداشت داده‌ها از سطح راه مورد بررسی، پرداخته می‌شود و محل دقیق محلی که مورد مطالعه میدانی قرار گرفته است معرفی خواهد شد و نحوه‌ی ثبت ترک‌ها و چاله‌ها در فایل اکسل نیز تبیین می‌گردد.

در ادامه به معرفی شاخص‌های جدیدی پرداخته خواهد شد که از داده‌های خروجی آنالیز موجک استخراج شده است؛ این شاخص‌ها در فصل پنجم مورد تحلیل آماری و محاسبه‌ی ضرایب همبستگی پیرسون قرار خواهند گرفت تا برای هر ترک یا چاله، بهترین شاخص‌ها برگزیده شده و به ارائه‌ی رابطه‌ای منجر شود که بتوان با آن به شناسایی ترک‌ها و چاله‌ها پرداخت.

۴-۲- ارزیابی میدانی

دستگاه *RSP* داده‌های متنوعی از سطح راه ارائه می‌کند که بارزترین و کاربردی‌ترین آن‌ها، داده‌های ارتفاعی است؛ بدین منظور با استفاده از هفت عدد لیزر، هر ده سانتی‌متر، ارتفاع‌ها نسبت به سطح مبنا برداشت می‌شود (سه لیزر برای هر نیمه از مقطع مسیر و یک لیزر برای میانه‌ی مسیر). میانگین ارتفاع‌های قرائت شده از سه لیزر برای هر نیمه از راه، به‌عنوان کد ارتفاعی آن نیمه معرفی می‌گردد. بدین منظور در این تحقیق پنج کیلومتر از داده‌های دستگاه *RSP* در مسیر رفت مشهد به سرخس مورد استفاده قرار گرفته و مسیر به دو قسمت تقسیم می‌شود (نیمه راست و نیمه چپ) که در مجموع ده کیلومتر داده‌ی خام ارائه می‌کند. نمونه یک متر از این داده‌ها در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود که به صورت یک فایل اکسس از رایانه موجود در خودروی حامل دستگاه *RSP* استخراج می‌شود.

جدول ۱-۴- نمونه ای یک متری از اطلاعات خروجی دستگاه RSP

Segm	StartStation	StopStation	LeftProfile	CenterProfi	RightProfile
1	0.000000	0.000100	-1184	-1137	-1053
2	0.000100	0.000200	-1185	-1134	-1049
3	0.000200	0.000300	-1188	-1130	-1045
4	0.000300	0.000400	-1188	-1124	-1039
5	0.000400	0.000500	-1192	-1122	-1031
6	0.000500	0.000600	-1197	-1113	-1021
7	0.000600	0.000700	-1200	-1105	-1016
8	0.000700	0.000800	-1196	-1096	-1015
9	0.000800	0.000900	-1198	-1092	-1015
10	0.000900	0.001000	-1196	-1096	-1017

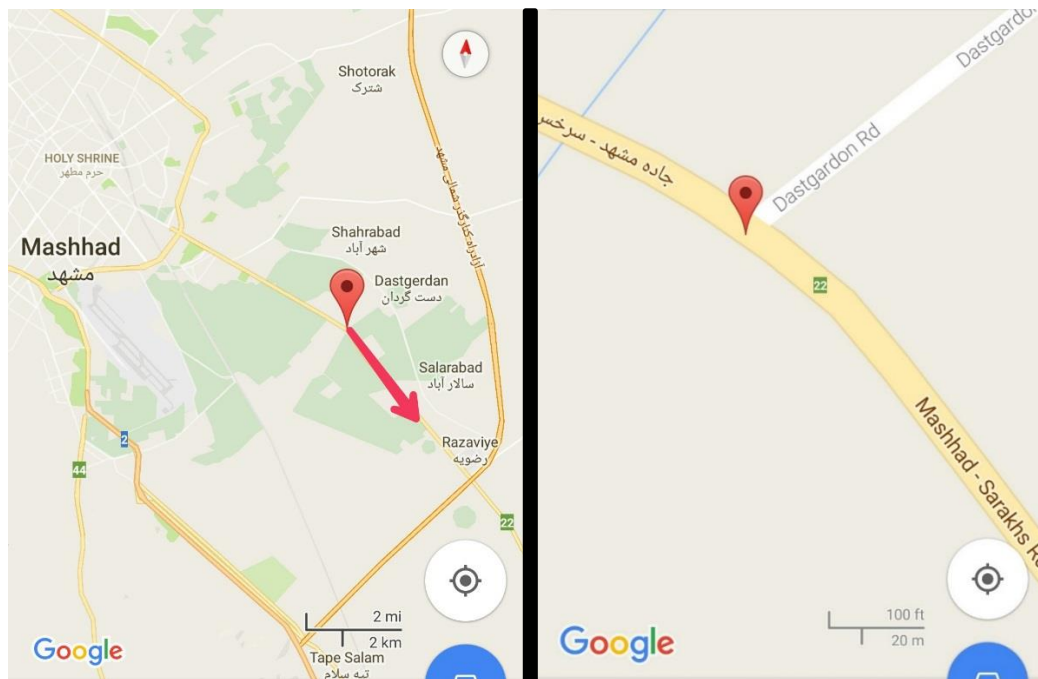
بنابراین برای برای تحقیق جاری، ده هزار کد ارتفاعی برای ده کیلومتر از مسیر مورد بررسی موجود می باشد.

ارزیابی میدانی در ۱۵ کیلومتری شرق مشهد، واقع در بلوار حر و از ابتدای تقاطع دست گردان (با موقعیتی دارای عرض جغرافیایی 36.243978 و طول جغرافیایی 59.721596) آغاز شده به طول پنج کیلومتر ادامه یافته است. تصویر استقرار خودروی حامل دستگاه RSP در ابتدای مسیر در شکل ۱-۴ مشاهده می شود.



شکل ۱-۴ - تصاویر مربوط به نقطه‌ی آغاز مسیر برداشت

همچنین این موقعیت در نقشه در شکل ۴-۲ مشخص شده است.

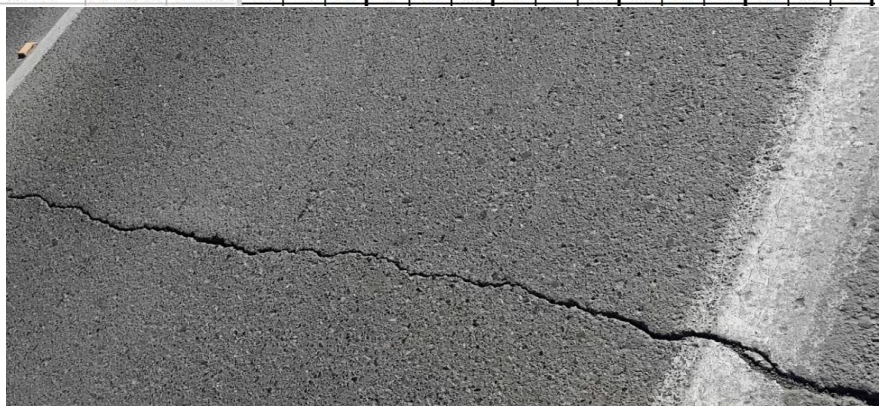


شکل ۴-۲- موقعیت مربوط به نقطه‌ی آغاز و طول مسیر و جهت برداشت روی نقشه

ارزیابی چشمی روسازی با استفاده از متر چرخ‌دار انجام شد و از خرابی‌های سطح جاده گزارشی تهیه شده که شامل نوع خرابی (که با توجه به نوع تحقیق فقط شامل چاله‌ها و ترک‌های عرضی و طولی و پوست سوسماری و بلوکی می‌باشد)، میزان شدت آن‌ها (ضعیف، متوسط و شدید)، مقادیر آن‌ها (برای ترک‌های طولی و عرضی با واحد طول و برای چاله و ترک‌های پوست سوسماری و بلوکی با واحد مربع طول) و همچنین موقعیت خرابی در مقطع جاده (چپ یا راست بودن) تهیه شده است.

سپس این اطلاعات به صورت تفکیکی برای ۱۰ سانتی‌متر به شکل صفر و یک درآمده است که عدد یک نشان از وجود خرابی خاص در آن ۱۰ سانتی‌متر دارد و برعکس عدد صفر فقدان خرابی به خصوص را در آن ۱۰ سانتی‌متر بیان می‌کند. نمونه‌هایی از هر خرابی به همراه گزارش آن در شکل‌های زیر قابل مشاهده است.

Segment ID	Start Station	Stop Station	Right														
			Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
			L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
3041	0.3040	0.3041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3042	0.3041	0.3042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3043	0.3042	0.3043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3044	0.3043	0.3044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3045	0.3044	0.3045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3046	0.3045	0.3046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3047	0.3046	0.3047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3048	0.3047	0.3048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3049	0.3048	0.3049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3050	0.3049	0.3050	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



شکل ۴-۳- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک عرضی معادل آن

Segment ID	Start Station	Stop Station	Right														
			Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
			L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
1	0.0000	0.0001	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.0001	0.0002	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.0002	0.0003	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.0003	0.0004	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.0004	0.0005	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0.0005	0.0006	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0.0006	0.0007	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.0007	0.0008	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.0008	0.0009	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.0009	0.0010	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



شکل ۴-۴- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک طولی معادل آن

Segment ID	Start Station	Stop Station	Right														
			Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
			L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
791	0.0790	0.0791	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
792	0.0791	0.0792	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
793	0.0792	0.0793	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
794	0.0793	0.0794	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
795	0.0794	0.0795	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
796	0.0795	0.0796	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
797	0.0796	0.0797	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
798	0.0797	0.0798	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
799	0.0798	0.0799	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
800	0.0799	0.0800	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0



شکل ۴-۵- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک بلوکی معادل آن

Segment ID	Start Station	Stop Station	Right														
			Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
			L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
3521	0.3520	0.3521	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3522	0.3521	0.3522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3523	0.3522	0.3523	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3524	0.3523	0.3524	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3525	0.3524	0.3525	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3526	0.3525	0.3526	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3527	0.3526	0.3527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3528	0.3527	0.3528	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3529	0.3528	0.3529	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3530	0.3529	0.3530	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0



شکل ۴-۶- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر ترک پوست سوسماری معادل آن

Segment ID	Start Station	Stop Station	Right														
			Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
			L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
7931	0.7930	0.7931	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7932	0.7931	0.7932	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7933	0.7932	0.7933	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7934	0.7933	0.7934	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7935	0.7934	0.7935	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7936	0.7935	0.7936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7937	0.7936	0.7937	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7938	0.7937	0.7938	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7939	0.7938	0.7939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7940	0.7939	0.7940	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



شکل ۴-۷- جدول گزارش خرابی به همراه تصویر چاله معادل آن

۴-۳- معرفی شاخص‌های ارزیابی

۴-۳-۱- شاخص اول: سیگنال اصلی

این شاخص در واقع همان کدهای اولیه و خامی است که از خروجی دستگاه RSP به دست آمده است، بنابراین یک سری داده به تعداد ۱۰۰,۰۰۰ کد عددی، به عنوان شاخص اول، تحت عنوان سیگنال اصلی، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص اول با علامت S مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳-۲- شاخص دوم و سوم: مؤلفه‌ی تقریب (approximation) و مؤلفه‌ی

جزئیات (details)

همان‌طور که در فصل قبل ذکر شد، پس از آنکه داده‌های سیگنال اصلی، مورد عملیات آنالیز مویک قرار داده می‌شود، در پنج مرحله، تقسیم به دو مؤلفه‌ی تقریب (approximations) و جزئیات (details)

می‌شد. مؤلفه‌ی تقریب (approximations)، در واقع همان سیگنال اصلی است با این تفاوت که در هر یک از مراحل پنج گانه‌ی فیلتراسیون، مقادیر جزئیات (details) از آن حذف و فیلتر شده‌اند.

بنابراین به ازای هر نقطه از نقاط سیگنال اصلی، یک نقطه برای مؤلفه‌ی تقریب (approximations) و یک نقطه برای مؤلفه‌ی جزئیات پدید می‌آید و با توجه به اینکه این مراحل پنج مرتبه تکرار می‌شوند، لذا پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص دوم، تحت عنوان مؤلفه‌ی تقریب (approximations) و پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص سوم، تحت عنوان مؤلفه‌ی جزئیات (details)، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت.

در مراحل بعدی شاخص دوم با علائم a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 و شاخص سوم با علائم d_1, d_2, d_3, d_4 ، d_5 مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳-۳- شاخص چهارم: مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات

با توجه به پیش بینی اولیه تحقیق، مبنی بر احتمال ارتباط محل وقوع انواع ترک‌ها با مقاطعی از راه که مؤلفه‌ی جزئیات آن‌ها تغییرات ناگهانی دارند، تلاش شد که با بررسی‌های بیشتر بر روی مؤلفه‌ی جزئیات، بتوان میزان درستی این پیش بینی را تعیین کرد.

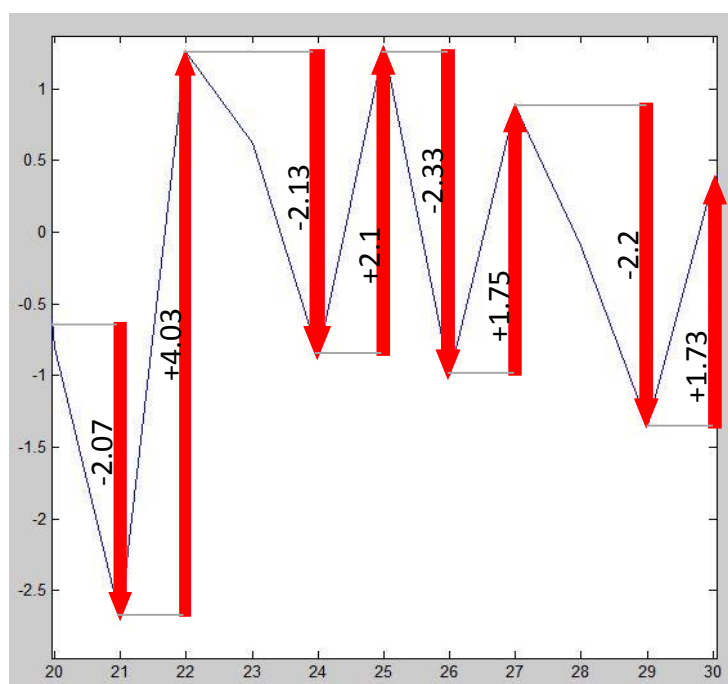
در شکل ۴-۸، نمونه‌ای یک متری از مؤلفه‌ی جزئیات مشاهده می‌شود. فراز و نشیب‌های پیاپی به وضوح در نمودار ترسیمی این مؤلفه قابل تشخیص است. در شاخص چهارم با استفاده از نرم افزار متلب، یک کد، برای یافتن اختلاف ارتفاعی مابین یک مینیمم و یک ماکزیمم پشت سر هم، نوشته شده است که خروجی آن همان اعدادی است که در شکل ۴-۸ در کنار اختلاف ارتفاعات مشاهده می‌شود.

لازم به ذکر است، همان‌طور که در شکل آشکار است، فاصله‌ی طولی بین یک مینیمم و یک ماکزیمم پشت سر هم، الزاماً یک واحد (۱۰ سانتی‌متر) نیست و ممکن است این فاصله ۲ واحد طولی یا بیشتر باشد، لذا جهت داشتن تعداد ۱۰۰,۰۰۰ کد عددی (جهت یکسان سازی تعداد کدها با سایر شاخص‌ها)، مقادیر اختلاف ارتفاع در این فاصله تکرار می‌شود؛ بنابراین برای این نمونه‌ی یک متری، مقادیر کد عددی شاخص چهارم به صورت زیر خواهد بود:

$+۱/۷۳, -۲/۲, -۲/۲, +۱/۷۵, -۲/۳۳, +۲/۱۹, -۲/۱۳, -۲/۱۳, +۴/۰۳, -۲/۰۷$

بنابراین با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد $۵۰۰,۰۰۰$ کد عددی، به‌عنوان شاخص چهارم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات (details)، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت.

در مراحل بعدی شاخص چهارم با علائم $Hd_1, Hd_2, Hd_3, Hd_4, Hd_5$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۸- نحوه‌ی شناسایی مشخصه‌ی ارتفاعی مؤلفه‌ی جزئیات (details)

۴-۳-۴- شاخص پنجم: مشخصه‌ی شیب مؤلفه‌ی جزئیات

در ادامه‌ی واکاوی‌های صورت گرفته بر روی مؤلفه‌ی جزئیات، شیب نمودار مورد ارزیابی قرار گرفته شده است؛ به این صورت که مابین هر ماکزیمم و مینیمم نمودار، خطی فرضی در نظر گرفته می‌شود و شیب آن به‌عنوان کد عددی شاخص پنجم برداشت می‌شود.

با استفاده از نرم افزار متلب، یک کد، برای یافتن مقادیر این شیب، نوشته شده است که خروجی آن همان اعدادی است که در شکل ۴-۹ در کنار هر شیب مشاهده می‌شود.

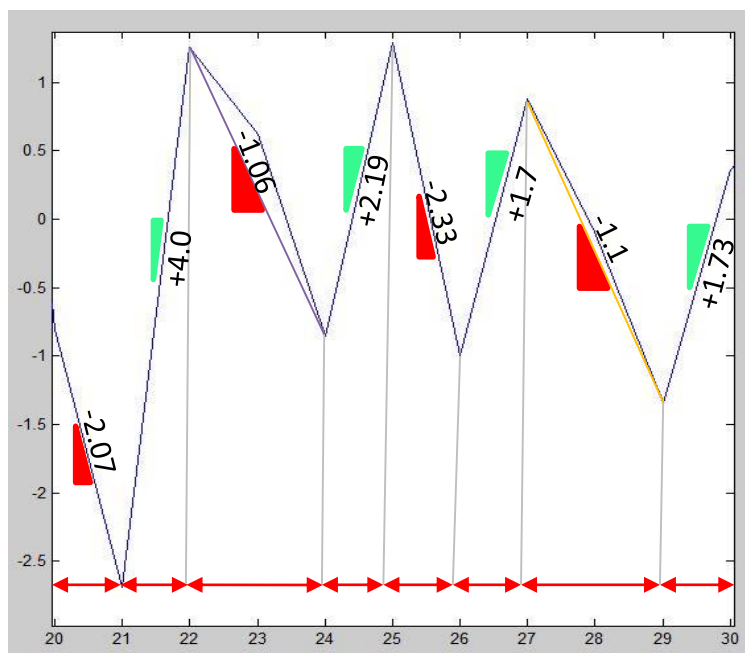
لازم به ذکر است، همان‌طور که در شکل آشکار است، فاصله‌ی طولی بین یک مینیمم و یک ماکزیمم

پشت سر هم، الزاما یک واحد (۱۰ سانتی متر) نیست و ممکن است این فاصله ۲ واحد طولی یا بیشتر باشد، لذا جهت داشتن تعداد ۱۰۰,۰۰۰ کد عددی (جهت یکسان سازی تعداد کدها با سایر شاخص ها)، مقادیر شیب در این فاصله تکرار می شود؛ بنابراین برای این نمونه ی یک متری، مقادیر کد عددی شاخص پنجم به صورت زیر خواهد بود:

$$-۲/۰۷, +۴/۰۳, -۱/۰۶, -۱/۰۶, +۲/۱۹, -۲/۳۳, +۱/۷۵, -۱/۱, -۱/۱, +۱/۷۳.$$

بنابراین با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج گانه به صورت مجزا صورت می گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به عنوان شاخص پنجم، تحت عنوان مشخصه ی شیب مؤلفه ی جزئیات (details)، مورد ارزیابی های آتی قرار خواهد گرفت.

در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم $Sd_1, Sd_2, Sd_3, Sd_4, Sd_5$ مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۴-۹- نحوه ی شناسایی مشخصه ی شیب مؤلفه ی جزئیات (details)

۴-۳-۵- شاخص‌های ششم تا دوازدهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی

جزئیات

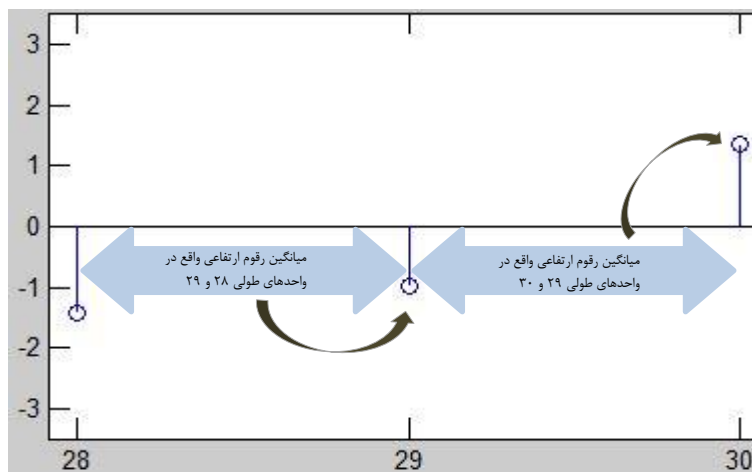
در این شاخص هم تلاش برای یافتن روشی دیگر جهت ارزیابی مؤلفه‌ی جزئیات بوده است. این بار هدف محاسبه ارتفاع میانگین در بازه‌های مختلف خواهد بود. ایجاد این بازه‌ها، به دلیل احتمال بروز مقداری خطایی است که در تطبیق محل بروز خرابی‌هایی که در بررسی میدانی برداشت شده و محل همان خرابی‌ها که با بررسی‌های تئوری حاصل از تحقیق به دست می‌آید، وجود دارد. این بازه‌ها در این تحقیق عبارتند از ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ واحد طولی و یا به عبارتی ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ سانتی‌متر. با استفاده از نرم افزار متلب، یک کد، برای یافتن مقادیر این میانگین در تمامی بازه‌ها، نوشته شده است که می‌توان با تغییر بازه، عملیات میانگین‌گیری را به انجام رساند.

۴-۳-۵-۱- شاخص ششم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر

۲ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه‌ی ۲ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۰ مشخص شده است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین دو کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم یاد داشت می‌شود، با این روش در هر بازه، یک پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه‌ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص ششم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۲ واحد طول، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم $A_2d_1, A_2d_2, A_2d_3, A_2d_4, A_2d_5$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱۰- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۲ واحد طول

۴-۳-۵- شاخص هفتم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر

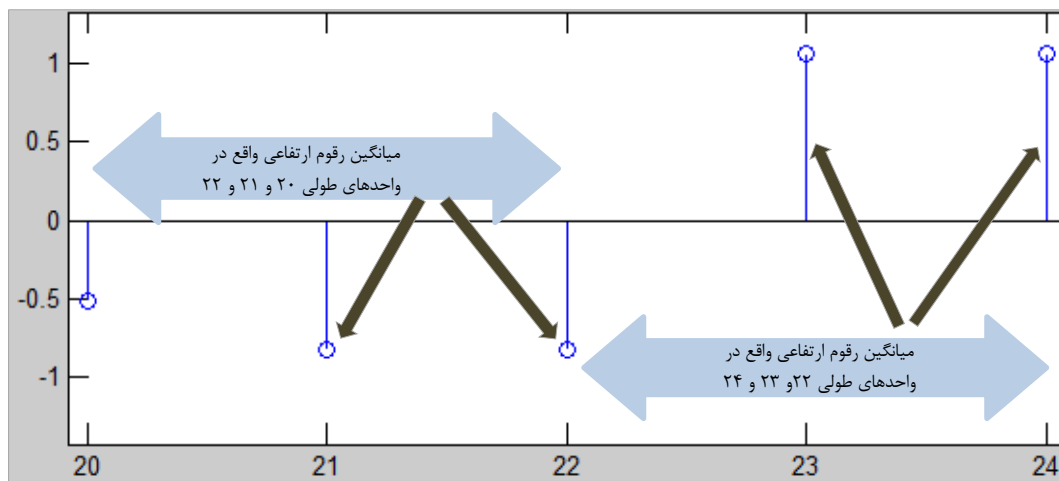
۳ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه‌ی ۳ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۱ مشخص شده است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین سه کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم و سوم یاد داشت می‌شود، با این روش در هر بازه، یه پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه‌ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص هفتم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۳ واحد طول، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت.

در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم A_3d_5 , A_3d_4 , A_3d_1 , A_3d_2 , A_3d_3 مورد استفاده قرار

می گیرد.



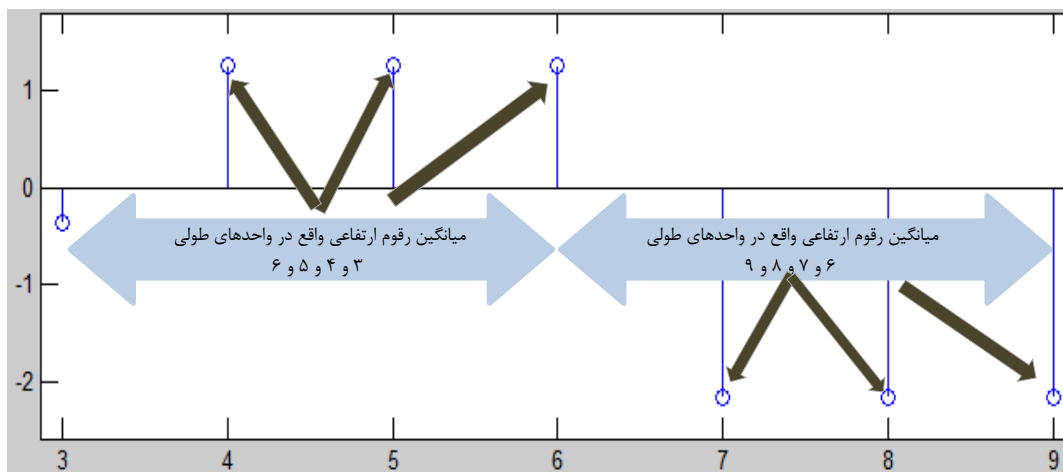
شکل ۴-۱۱- نحوه ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه ی جزئیات برای هر ۳ واحد طول

۴-۳-۵- شاخص هشتم: مشخصه ی ارتفاع میانگین مؤلفه ی جزئیات برای

هر ۴ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه ی ۴ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۲ مشخص شده است قرار می گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین چهار کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم و سوم و چهارم یاد داشت می شود، با این روش در هر بازه، یک پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج گانه به صورت مجزا صورت می گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به عنوان شاخص هشتم، تحت عنوان مشخصه ی ارتفاع میانگین مؤلفه ی جزئیات برای هر ۴ واحد طول، مورد ارزیابی های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم A_4d_5 , A_4d_4 , A_4d_3 , A_4d_2 , A_4d_1 مورد استفاده قرار می گیرد.



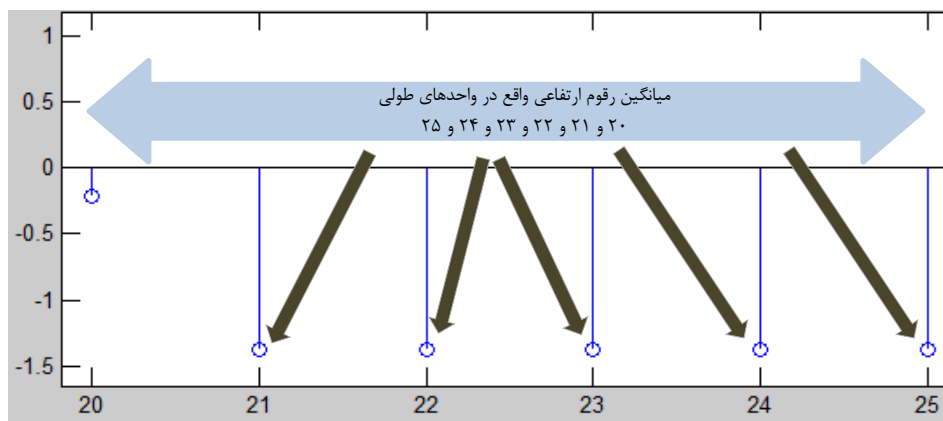
شکل ۴-۱۲- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۴ واحد طول

۴-۳-۵-۴- شاخص نهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر

۶ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه‌ی ۶ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۲ مشخص شده است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین شش کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم و سوم و چهارم و پنجم و ششم یاد داشت می‌شود، با این روش در هر بازه، یک پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه‌ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص نهم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۶ واحد طول، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم A_6d_1 , A_6d_2 , A_6d_3 , A_6d_4 , A_6d_5 مورد استفاده قرار می‌گیرد.



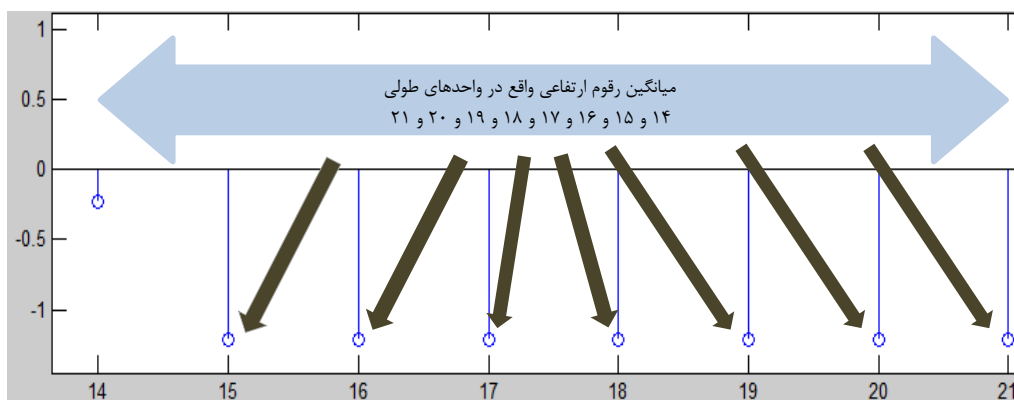
شکل ۴-۱۳- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۶ واحد طول

۴-۳-۵- شاخص دهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر

۸ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه‌ی ۸ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۴ مشخص شده است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین هشت کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم و سوم و چهارم و پنجم و ششم و هفتم و هشتم یاد داشت می‌شود، با این روش در هر بازه، یک پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه‌ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص دهم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۸ واحد طول، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم A_8d_1 , A_8d_2 , A_8d_3 , A_8d_4 , A_8d_5 مورد استفاده قرار می‌گیرد.



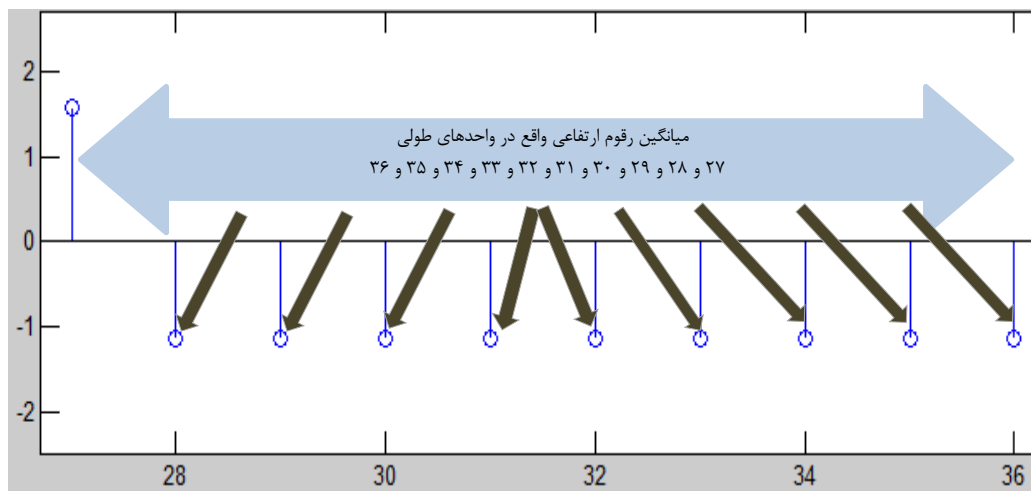
شکل ۴-۱۴- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۸ واحد طول

۴-۳-۵-۶- شاخص یازدهم: مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای

هر ۱۰ واحد طول

خروجی مقادیر میانگین در بازه‌ی ۱۰ واحدی، در همان جایگاهی که در شکل ۴-۱۵ مشخص شده است قرار می‌گیرد. به این ترتیب مقدار میانگین هشت کد ارتفاعی پیاپی، در جایگاه کد دوم و سوم و چهارم و پنجم و ششم و هفتم و هشتم و نهم و دهم یاد داشت می‌شود، با این روش در هر بازه، یک پله بازگشتی (هم پوشانی) برای محاسبه‌ی مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این عملیات برای هر یک از جزئیات پنج‌گانه به صورت مجزا صورت می‌گیرد، پنج سری داده به تعداد ۵۰۰,۰۰۰ کد عددی، به‌عنوان شاخص یازدهم، تحت عنوان مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۱۰ واحد طول، مورد ارزیابی‌های آتی قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی شاخص پنجم با علائم $A_{10}d_5$, $A_{10}d_4$, $A_{10}d_3$, $A_{10}d_1$, $A_{10}d_2$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

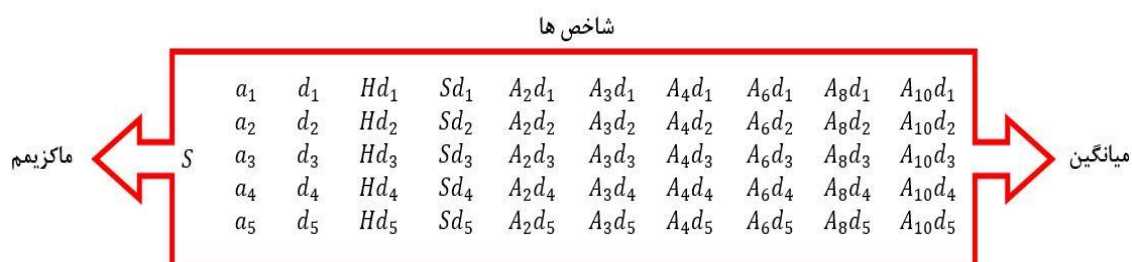


شکل ۴-۱۵- نحوه‌ی جایگذاری ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات برای هر ۱۰ واحد طول

بنابراین به غیر از شاخص اول که همان سیگنال اصلی است، ۱۰ شاخص باقیمانده به ۵ زیر شاخه تقسیم می‌شوند، پس در مجموع ۵۱ سری کد عددی موجود است که تعداد کل این سری اعداد، برابر ۵,۱۰۰,۰۰۰ می‌باشد که هم از لحاظ دقت و هم برای آنالیزهای آتی، تعداد بیش از اندازه بزرگی است.

بنابراین تصمیم بر این شد با توجه به سعی و خطاهای صورت گرفته برای یافتن ضریب همبستگی مناسب، برای اعداد هر شاخص، در هر ۱۰۰ واحد (۱۰ متر)، یک بار میانگین و یک بار ماکزیمم آنها به عنوان دو نماینده از هر ۱۰۰ واحد (۱۰ متر)، محاسبه و جایگزین شود.

به این ترتیب ۵,۱۰۰,۰۰۰ کد عددی قبلی، تبدیل به دو سری کد عددی به تعداد ۵۱,۰۰۰ خواهد شد و در مجموع ۱۰۲,۰۰۰ کد عددی مبنای آنالیزهای آتی خواهد شد (هر شاخص ۱۰۰۰ کد عددی میانگین و ۱۰۰۰ کد عددی ماکزیمم).



شکل ۴-۱۶- مجموعه شاخص های قابل استفاده برای عملیات شناسایی ترک و چاله

فصل پنجم: بررسی و تحلیل داده‌ها

۵-۱- مقدمه

پس از آن که در فصل چهارم، تمام شاخص‌های مورد نیاز برای پیش بینی ترک‌ها و چاله‌ها تعریف شدند و ارزیابی میدانی نیز به انجام رسید، در این فصل در ابتدا به بررسی همبستگی مابین این دو پرداخته می‌شود تا ۵ شاخصی که بیشترین همبستگی را با هر مدل از ترک‌ها و چاله‌ها دارند شناسایی شوند. پس از آن که ۵ شاخص همبسته مشخص شدند، به محاسبه‌ی شاخص ترک برای هر یک از ترک‌ها و چاله‌ها پرداخته می‌شود و مجدداً همبستگی مابین شاخص‌های ترک و ۵ شاخص همبسته با هر نوع ترک مورد محاسبه قرار خواهد گرفت و با استفاده از رگرسیون‌های خطی و غیر خطی، روابطی مابین آن‌ها ارائه می‌گردد که هدف اصلی این تحقیق می‌باشد.

۵-۲- بررسی شاخص‌ها

در این قسمت ابتدا به معرفی ضریب همبستگی پیرسون پرداخته و سپس به وسیله‌ی این ضریب، برای هر نوع خرابی پنج شاخصی که بیشترین همبستگی را با آن خرابی به خصوص داراست، تعیین می‌شود.

۵-۲-۱- ضریب همبستگی پیرسون

ضریب همبستگی پیرسون که به آن همبستگی گشتاوری پیرسون نیز گفته می‌شود و با علامت r همواره با کنار نوشت آن که معرف متغیرهایی است که ضریب همبستگی آن‌ها محاسبه می‌شود (برای نمونه، r_{xy} که همبستگی بین متغیرهای x و y را نشان می‌دهد) نمایش داده می‌شود به منظور بررسی رابطه بین دو متغیر پیوسته (فاصله‌ای یا نسبی) نظیر قد، وزن، نمره آزمون یا درآمد مورد استفاده قرار می‌گیرد و میزان تغییرپذیری مشترک بین دو متغیر یا اشتراک آن‌ها را نشان می‌دهد.

مقدار ضریب همبستگی بین $+1$ و -1 در نوسان است. اگر تغییر متغیرها همسو باشد (هر دو متغیر در یک جهت تغییر کنند و با هر گونه افزایش یا کاهش در یک متغیر، مقدار دیگر نیز به ترتیب و همسو با آن افزایش یا کاهش یابد)، همبستگی یا مقدار r مثبت بوده و به آن همبستگی مستقیم یا مثبت

می‌گویند. اما اگر تغییر متغیرها همسو نباشد (هر دو متغیر در جهت عکس هم تغییر کنند و با افزایش مقدار یک متغیر، مقدار متغیر دیگر کاهش یابد و برعکس)، همبستگی یا مقدار r منفی بوده و به آن همبستگی غیرمستقیم یا منفی می‌گویند. اگر مقدار به دست آمده برای ضریب همبستگی صفر باشد این بدان معناست که دو متغیر مورد نظر مستقل از هم هستند و هیچگونه رابطه‌ای بین آن‌ها وجود ندارد. باید توجه داشت که مقدار مطلق ضریب همبستگی نشانگر قوت همبستگی است و علامت مثبت یا منفی تاثیری در این زمینه ندارد.

۵-۲-۱-۱- محاسبه ضریب همبستگی پیرسون

اشکال عمده‌ای که در نمودار پراکندگی وجود دارد این است که با این روش نمی‌توان یک شاخص عددی از درجه همبستگی بین متغیرها به دست آورد. برای این منظور، شاخص‌های متعددی تدوین شده است. معروف‌ترین و در عین حال پر کاربردی‌ترین آن‌ها زمانی به کار برده می‌شود که متغیرهای مورد مطالعه با استفاده از مقیاس فاصله‌ای یا نسبی اندازه‌گیری شده باشد؛ این روش را کارل پیرسون تهیه و تنظیم کرده است و ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون نامیده شده است. ضریب همبستگی پیرسون با نماد r نشان داده می‌شود:

$$r_{xy} = \frac{(\sum x - \bar{x})(\sum y - \bar{y})}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \quad \text{رابطه ۵-۱}$$

ضریب همبستگی پیرسون برای توصیف همبستگی بین دو متغیر که با استفاده از مقیاس فاصله‌ای یا نسبی اندازه‌گیری شده‌اند به کار برده می‌شود. متغیرهایی نیز وجود دارند که نمی‌توان آن‌ها را به صورت فاصله‌ای یا نسبی اندازه‌گیری کرد [۱۵].

۵-۲-۱-۲- تفسیر ضریب همبستگی پیرسون

ضریب همبستگی جهت و شدت رابطه بین دو متغیر را تعیین می‌کند. گرچه این ضریب به صورت اعشاری بیان می‌شود اما تفسیر آن باید بر حسب درصد باشد. ضریب همبستگی 0.7 ، هفتاد درصد از رابطه بین متغیرها را تبیین می‌کند. ضریب همبستگی را نمی‌توان به صورت نسبت مورد مقایسه و

تفسیر قرار داد. مثلاً نمی‌توان گفت که ضریب همبستگی ۰/۹ دقیقاً دو برابر ضریب ۰/۴۵ است.

براساس یک قاعده کلی براساس مقادیر جدول ۵-۱ می‌توان درباره میزان همبستگی متغیرها قضاوت

کرد. بخاطر داشته باشید همین تفسیر برای مقادیر منفی نیز قابل استفاده است.

جدول ۵-۱- تفسیر بازه‌های مختلف ضریب همبستگی

ضریب همبستگی	تفسیر
0.0 – 0.1	خیلی اندک و قابل چشم پوشی
0.1 – 0.3	اندک
0.3 – 0.5	متوسط
0.5 – 1.0	زیاد

۵-۲-۲- شناسایی شاخص‌های همبسته با هر خرابی

پس از معرفی ضریب همبستگی پیرسون، در این مرحله به صورت مجزا، برای هر یک از ۵ خرابی مورد مطالعه در این تحقیق، ۵ شاخصی که بیشترین همبستگی را با آن خرابی به خصوص دارا باشد، تعیین می‌شود.

در این جهت، همبستگی کلیه‌ی خرابی‌ها (هر نوع دارای ۳ سطح شدت کم، متوسط و زیاد) با کلیه‌ی شاخص‌ها توسط نرم افزار آماری SPSS استخراج شده است که به کمک آن شاخص‌های مؤثر بر هر خرابی شناسایی شده که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۵-۲-۲-۱- شاخص‌های همبسته با ترک عرضی

پنج شاخص $A_{10}d_5(max)$ و $A_8d_5(max)$ ، $A_6d_5(max)$ ، $d_5(max)$ ، $Hd_5(max)$

بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک عرضی می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۲

قابل مشاهده است. مقادیری که در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱ قرار دارند با رنگ قرمز، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۱

تا ۰/۳ قرار دارند با رنگ زرد، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارند با رنگ آبی و مقادیری که در بازه‌ی ۰/۵ تا ۱ قرار دارند با رنگ سبز نمایان‌اند.

جدول ۵-۲- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک عرضی با شدت‌های مختلف آن ترک

Correlations		$Hd_5(max)$	$d_5(max)$	$A_6d_5(max)$	$A_8d_5(max)$	$A_{10}d_5(max)$
ترک عرضی شدت کم	Pearson Correlation	-0.244749218	-0.125376078	-0.412578194	-0.41790324	-0.218895118
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک عرضی شدت متوسط	Pearson Correlation	-0.573	-0.59	-0.55	-0.535	-0.545
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک عرضی شدت زیاد	Pearson Correlation	-0.587518243	-0.452792041	-0.441227758	-0.552439316	-0.559320845
	N	1000	1000	1000	1000	1000

با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی جدول ۵-۲ که غالباً مقادیر نسبتاً بالایی می‌باشند، همچنین با توجه به بازه‌های معین شده در جدول ۵-۱ می‌توان ارتباط شاخص‌های انتخابی را با ترک عرضی مطلوب دانست.

۵-۲-۲-۲- شاخص‌های همبسته با ترک طولی

پنج شاخص $A_{10}d_1(max)$ و $A_{10}d_2(max)$ ، $Sd_5(ave)$ ، $A_4d_1(ave)$ ، $A_4d_2(ave)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک طولی می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۳ قابل مشاهده است. مقادیری که در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱ قرار دارند با رنگ قرمز، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارند با رنگ زرد، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارند با رنگ سبز نمایان‌اند.

جدول ۵-۳- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک طولی با شدت‌های مختلف آن ترک

Correlations		$A_{10}d_1(max)$	$A_{10}d_2(max)$	$Sd_5(ave)$	$A_4d_1(ave)$	$A_4d_2(ave)$
ترک طولی شدت کم	Pearson Correlation	0.534750298	0.536422729	-0.190330234	0.423892369	-0.3511422
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک طولی شدت متوسط	Pearson Correlation	0.411291187	0.47376926	0.520905779	0.582661587	-0.57
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک طولی شدت زیاد	Pearson Correlation	0	0	0	0	0
	N	1000	1000	1000	1000	1000

با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی جدول ۵-۳، می‌توان دریافت که در طول مسیر مورد آزمایش، ترک طولی با شدت زیاد وجود نداشته است، لذا مقادیر همبستگی این شدت از ترک طولی با شاخص‌های

انتخابی آن، صفر شده است. همچنین با توجه به بازه‌های معین شده در جدول ۵-۱ می‌توان ارتباط شاخص‌های انتخابی را با شدت‌های متوسط و کم ترک طولی نسبتاً مطلوب دانست.

۵-۲-۲-۳- شاخص‌های همبسته با ترک بلوکی

پنج شاخص $d_1(max)$, $A_2d_1(max)$, $A_3d_1(max)$, $Sd_1(max)$ و $Hd_1(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک بلوکی می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۴ قابل مشاهده است. مقادیری که در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱ قرار دارند با رنگ قرمز، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارند با رنگ زرد، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارند با رنگ سبز نمایان‌اند.

جدول ۵-۴- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک بلوکی با شدت‌های مختلف آن ترک

Correlations		$Hd_1(max)$	$Sd_1(max)$	$d_1(max)$	$A_2d_1(max)$	$A_3d_1(max)$
ترک بلوکی شدت کم	Pearson Correlation	-0.555	-0.555	-0.5625	-0.5775	-0.6075
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک بلوکی شدت متوسط	Pearson Correlation	-0.525	-0.5025	-0.6	-0.555	-0.555
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک بلوکی شدت زیاد	Pearson Correlation	-0.479946546	-0.466792382	-0.519236073	-0.5105378	-0.512670556
	N	1000	1000	1000	1000	1000

با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی جدول ۵-۳ که مقادیر نسبتاً بالایی می‌باشند، همچنین با توجه به بازه‌های معین شده در جدول ۵-۱ می‌توان ارتباط شاخص‌های انتخابی را با ترک بلوکی بسیار مطلوب دانست، به نحوی که ۱۳ ضریب از ۱۵ ضریب همبستگی قابل مشاهده در جدول ۵-۳، در بازه‌ی مطلوب ۰/۵ تا ۱ قرار دارند.

۵-۲-۲-۴- شاخص‌های همبسته با ترک پوست سوسماری

پنج شاخص $d_3(max)$, $A_{10}d_3(max)$, $A_3d_1(ave)$, $A_8d_2(ave)$ و $Sd_3(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک پوست سوسماری می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۵ قابل مشاهده است. مقادیری که در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱ قرار دارند با رنگ قرمز، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارند با رنگ زرد، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارند با رنگ آبی

و مقادیری که در بازه‌ی ۰/۵ تا ۱ قرار دارند با رنگ سبز نمایان‌اند.

جدول ۵-۵- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک پوست سوسماری با شدت‌های مختلف آن ترک

		Correlations				
		$Hd_3(max)$	$Sd_3(max)$	$A_{10}d_3(max)$	$A_3d_1(ave)$	$A_8d_2(ave)$
ترک پوست سوسماری شدت کم	Pearson Correlation	-0.500881925	-0.455076743	-0.496910776	-0.168167898	0.638833447
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک پوست سوسماری شدت متوسط	Pearson Correlation	-0.518059873	-0.065415697	-0.151151047	-0.5695	0.371678797
	N	1000	1000	1000	1000	1000
ترک پوست سوسماری شدت زیاد	Pearson Correlation	-0.497867477	-0.432409624	-0.412559628	-0.493971538	0.638405737
	N	1000	1000	1000	1000	1000

با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی جدول ۵-۵ و همچنین با توجه به بازه‌های معین شده در جدول

۵-۱ می‌توان دریافت که ارتباط شاخص‌های انتخابی با ترک پوست سوسماری نسبتاً مطلوب است.

۵-۲-۲-۵- شاخص‌های همبسته با چاله

پنج شاخص $a_1(max)$ ، $a_2(max)$ ، $a_3(max)$ ، $a_4(max)$ و $a_5(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف چاله می‌باشد. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۶ قابل مشاهده است. مقادیری که در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱ قرار دارند با رنگ قرمز، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارند با رنگ زرد، مقادیری که در بازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارند با رنگ آبی و مقادیری که در بازه‌ی ۰/۵ تا ۱ قرار دارند با رنگ سبز نمایان‌اند.

جدول ۵-۶- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته چاله با شدت‌های مختلف آن

		Correlations				
		$a_1(max)$	$a_2(max)$	$a_3(max)$	$a_4(max)$	$a_5(max)$
چاله شدت کم	Pearson Correlation	-0.470468694	-0.470532809	-0.469130134	-0.469854224	-0.476534783
	N	1000	1000	1000	1000	1000
چاله شدت متوسط	Pearson Correlation	-0.290267855	-0.291241613	-0.293651029	-0.292802223	-0.295661641
	N	1000	1000	1000	1000	1000
چاله شدت زیاد	Pearson Correlation	0.118812155	0.116933885	0.11815112	0.121771816	0.119226322
	N	1000	1000	1000	1000	1000

با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی جدول ۵-۶ که مقادیر اندک و نامطلوبی می‌باشند، همچنین با توجه به بازه‌های معین شده در جدول ۵-۱ می‌توان ارتباط شاخص‌های انتخابی را با چاله نسبتاً نامطلوب دانست، به نحوی که ۱۰ ضریب از ۱۵ ضریب همبستگی قابل مشاهده در جدول ۵-۶، در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارند.

۵-۳- شاخص ترک

محل خرابی‌ها تا کنون برای شناسایی اولیه‌ی شاخص‌ها، با کدهای صفر و یک مشخص می‌شد. در این مرحله برای ساختن مدل پیش بینی هر خرابی به جای معرفی خرابی‌ها با کدهای صفر و یک، از شاخص‌های ترک استفاده می‌شود.

بر اساس آیین نامه‌ی FHWA، حداکثر حد مجاز برای محاسبه‌ی هر شاخص ترک، ۳۲/۱۹ متر (۰/۰۲ مایل) از طول جاده می‌باشد؛ به این معنی که شاخص ترک می‌تواند برای هر ۳۲/۱۹ متر از طول جاده یا کمتر از آن محاسبه شود. در این تحقیق بازه‌ی ۳۲ متر برای محاسبه‌ی شاخص ترک انتخاب شده است، با این تفاوت که ۱۰ متر هم پوشانی هم در نظر گرفته شده است؛ بدین ترتیب که شاخص اول در ۳۲ متر ابتدایی محاسبه و ثبت می‌شود و برای محاسبه‌ی شاخص دوم، از متر ۲۲ تا ۵۴ و برای محاسبه‌ی شاخص سوم، از متر ۴۴ تا ۷۶ و... ملاک محاسبات خواهند بود.

در پایان این محاسبات، برای هر یک از ۵ خرابی مورد بررسی، ۱۰۰۰ کد عددی به دست می‌آید که کلیه آن‌ها درصد‌های معرف شاخص ترک می‌باشند؛ به نحوی که شاخص ترک ۱۰۰٪ نشانگر آن است که جاده فاقد خرابی به خصوص، در آن بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشد [۱۶].

۵-۳-۱- شاخص ترک عرضی

فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی شاخص ترک عرضی به صورت رابطه ۵-۲ خواهد بود.

$$TC\ INDEX = 100 - \left\{ \left[20 * \left(\left(\frac{LOW}{15.1} \right) + \left(\frac{MED}{7.5} \right) \right) \right] + \left[40 * \frac{HI}{1.9} \right] \right\} \quad \text{رابطه ۵-۲}$$

مقادیر LOW ، MED ، HI به ترتیب تعداد ترک عرضی مشاهده شده با شدت زیاد، متوسط و کم، در بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشند.

فرمول محاسبه‌ی تعداد ترک عرضی به صورت رابطه ۵-۳ است.

$$\text{رابطه ۵-۳} \quad \text{تعداد ترکهای عرضی} = \frac{\text{طول کل ترکهای عرضی}}{\text{عرض خط}}$$

در فرمول شاخص ترک عرضی، مخرج‌های ۱۵/۱، ۷/۵ و ۱/۹ حدود مجاز حداکثر برای هر شدت

خرابی می‌باشند؛ به‌عنوان مثال، برای ترک عرضی با شدت متوسط، نهایتاً قرار دادن تعداد ۷/۵ ترک در صورت کسر مجاز خواهد بود. مقادیری از شاخص ترک که از ۶۰ کمتر شوند در واقع دچار شکست (تخریب) شده‌اند.

۵-۳-۲- شاخص ترک طولی

فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی شاخص ترک طولی به صورت رابطه ۴-۵ خواهد بود.

$$LC \text{ INDEX} = 100 - 40 * \left[\left(\frac{\%LOW}{350} \right) + \left(\frac{\%MED}{200} \right) + \left(\frac{\%HI}{75} \right) \right] \quad \text{رابطه ۴-۵}$$

مقادیر $\%LOW$ ، $\%MED$ ، $\%HI$ به ترتیب درصد‌های مشاهده شده‌ی ترک طولی با شدت زیاد، متوسط و کم، در بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشند.

فرمول محاسبه‌ی درصدهای یاد شده به صورت رابطه ۵-۵ است.

$$\text{رابطه ۵-۵} \quad \text{درصد ترک طولی مشاهده شده} = \frac{\text{طول ترک طولی (متر)}}{۳۲ \text{ متر}}$$

در فرمول شاخص ترک طولی، مخرج‌های ۳۵۰، ۲۰۰ و ۷۵ حدود مجاز حداکثر برای هر شدت خرابی می‌باشند؛ به عبارت دیگر به‌عنوان مثال، برای ترک طولی با شدت متوسط، نهایتاً قرار دادن ۲۰۰ درصد در صورت کسر مجاز خواهد بود. مقادیری از شاخص ترک که از ۶۰ کمتر شوند در واقع دچار شکست (تخریب) شده‌اند.

۵-۳-۳- شاخص ترک بلوکی

فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی شاخص ترک بلوکی به صورت رابطه ۶-۵ خواهد بود.

$$BC \text{ INDEX} = 100 - 40 * \left[\left(\frac{\%LOW}{70} \right) + \left(\frac{\%MED}{30} \right) + \left(\frac{\%HI}{10} \right) \right] \quad \text{رابطه ۶-۵}$$

مقادیر $\%LOW$ ، $\%MED$ ، $\%HI$ به ترتیب درصد‌های مشاهده شده‌ی ترک بلوکی با شدت زیاد، متوسط و کم، در بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشند.

فرمول محاسبه‌ی درصدهای یاد شده به صورت رابطه ۷-۵ است.

$$\text{رابطه ۷-۵} = \frac{\text{مساحت کل ترک بلوکی (متر مربع)}}{\text{عرض خط * ۳۲ متر}} = \text{درصد ترک بلوکی مشاهده شده}$$

در فرمول شاخص ترک بلوکی، مخرج‌های ۳۲، ۷۰، ۳۰ و ۱۰ حدود مجاز حداکثر برای هر شدت خرابی می‌باشند؛ به عبارت دیگر به‌عنوان مثال، برای شدت متوسط، نهایتاً قرار دادن ۳۰ درصد در صورت کسر مجاز است. مقادیری از شاخص ترک که از ۶۰ کمتر شوند در واقع دچار شکست (تخریب) شده‌اند.

۵-۳-۴- شاخص ترک پوست سوسماری

فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی شاخص ترک پوست سوسماری به صورت رابطه ۸-۵ خواهد بود.

$$\text{رابطه ۸-۵} \quad AC \text{ INDEX} = 100 - 40 * \left[\left(\frac{\%LOW}{70} \right) + \left(\frac{\%MED}{30} \right) + \left(\frac{\%HI}{10} \right) \right]$$

مقادیر $\%LOW$ ، $\%MED$ ، $\%HI$ به ترتیب درصد‌های مشاهده شده‌ی ترک پوست سوسماری با شدت زیاد، متوسط و کم، در بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشند.

فرمول محاسبه‌ی در صد‌های یاد شده به صورت رابطه ۹-۵ است.

$$\text{رابطه ۹-۵} = \frac{\text{مساحت کل ترک پوست سوسماری (متر مربع)}}{\text{عرض خط * ۳۲ متر}} = \text{درصد ترک پوست سوسماری مشاهده شده}$$

در فرمول شاخص ترک پوست سوسماری، مخرج‌های ۷۰، ۳۰ و ۱۰ حدود مجاز حداکثر برای هر شدت خرابی می‌باشند؛ به عبارت دیگر به‌عنوان مثال، برای شدت متوسط، نهایتاً قرار دادن ۳۰ درصد در صورت کسر مجاز می‌باشد. مقادیری از شاخص ترک که از ۶۰ کمتر شوند در واقع دچار شکست (تخریب) شده‌اند.

۵-۳-۵- شاخص چاله

فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی شاخص چاله به صورت رابطه ۱۰-۵ خواهد بود.

$$\text{رابطه ۱۰-۵} \quad P \text{ INDEX} = 100 - 40 * \left(\frac{\%POTHOLE}{80} \right)$$

مقدار $\%POTHOLE$ درصد مشاهده شده‌ی چاله در بازه‌ی ۳۲ متری می‌باشند.

فرمول محاسبه‌ی در صد یاد شده به صورت رابطه ۱۱-۵ است.

$$\text{رابطه ۵-۱۱} \quad \text{درصد چاله موجود} = \frac{\text{مساحت کل چاله (متر مربع)}}{\text{عرض خط} * ۳۲ \text{ متر}}$$

در فرمول شاخص چاله، مخرج ۸۰ حد مجاز حداکثر برای خرابی می‌باشد؛ به عبارت دیگر، نهایتاً قرار دادن ۸۰ درصد در صورت کسر مجاز می‌باشد. مقادیری از شاخص ترک که از ۶۰ کمتر شوند در واقع دچار شکست (تخریب) شده‌اند.

۵-۴- مدل پیش بینی خرابی

در این مرحله، هدف یافتن مدل و رابطه‌ای برای پیش بینی هر یک از خرابی‌های مورد تحقیق خواهد بود. برای نایل آمدن به این مقصود، مجدداً بین شاخص ترک هر خرابی (که در بخش ۵-۳ به تفصیل معرفی شد) و ۵ شاخص مناسب آن (که در بخش ۵-۲-۲ به تفصیل معرفی شد) به دنبال ضریب همبستگی پیرسون بوده و سپس با بهره‌گیری از رگرسیون، رابطه‌ای منطقی بین آن‌ها معرفی کرد که در ادامه به این امر جامه‌ی عمل پوشانده خواهد شد.

۵-۴-۱- مدل پیش بینی ترک عرضی

در بخش ۵-۲-۲-۱ مشاهده شد که پنج شاخص $A_6d_5(max)$ ، $d_5(max)$ ، $Hd_5(max)$ و $A_{10}d_5(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک عرضی می‌باشد.

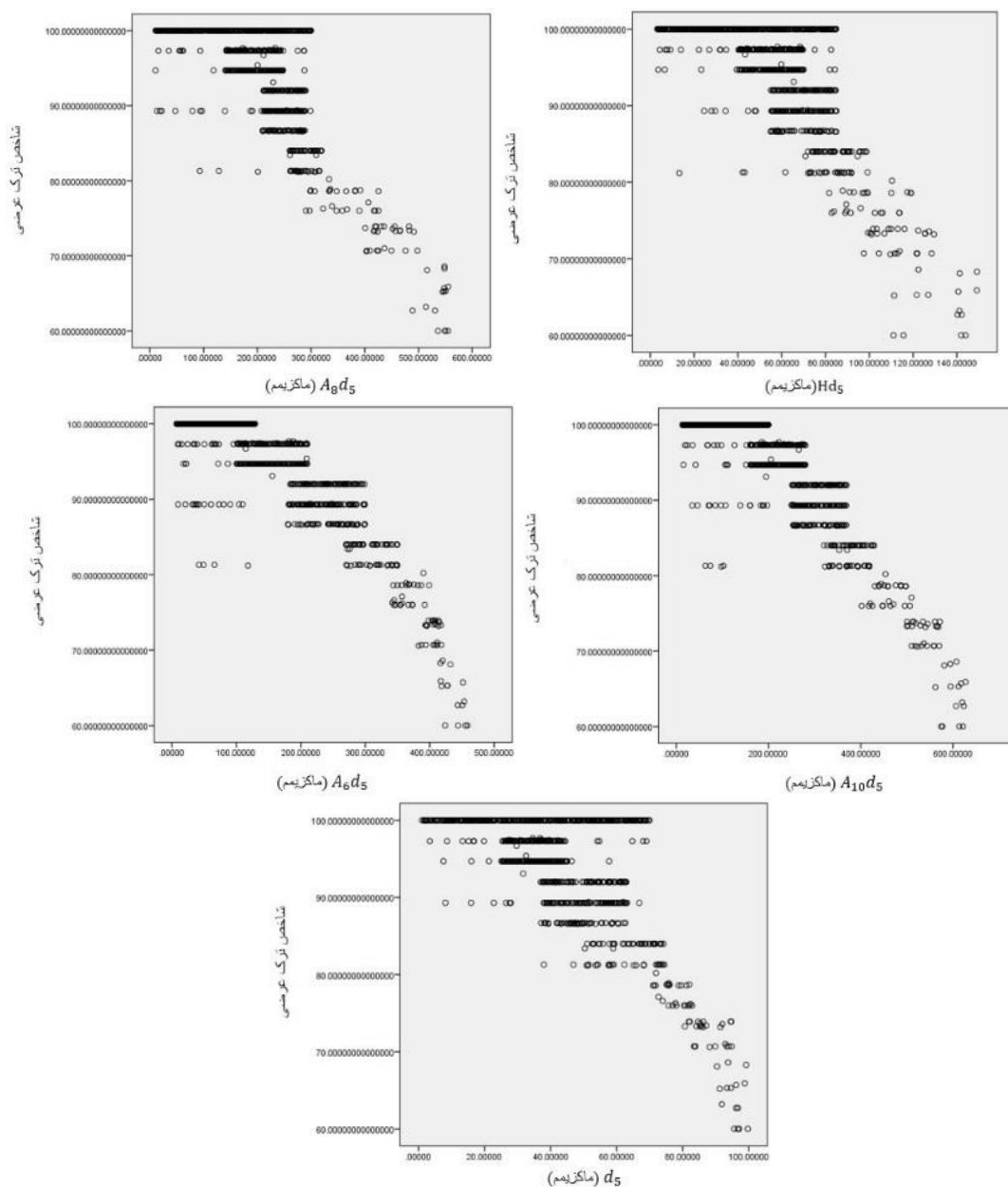
حال بار دیگر این شاخص‌ها با کدهای عددی متناظر با شاخص ترک عرضی مقایسه و ضریب همبستگی پیرسون مجدداً برای آن‌ها محاسبه می‌شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۷ قابل مشاهده است که با توجه به جدول ۵-۱، این میزان همبستگی، زیاد محسوب می‌شود، بنابراین پنج شاخص مورد نظر از توانایی بالایی برای تخمین رابطه‌ی متناسب با شاخص ترک عرضی برخوردارند.

جدول ۵-۷- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک عرضی با شاخص ترک آن

		Correlations				
		$Hd_5(max)$	$d_5(max)$	$A_6d_5(max)$	$A_8d_5(max)$	$A_{10}d_5(max)$
شاخص ترک عرضی	Pearson Correlation	-0.725	-0.69	-0.881	-0.756	-0.876
	N	1000	1000	1000	1000	1000

نمودار ارتباطی شاخص ترک عرضی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن در ادامه آمده

است:



شکل ۵-۱- نمودار ارتباطی شاخص ترک عرضی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن

برای تخمین مدل و فرمول مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک عرضی، از یک رگرسیون خطی و سه رگرسیون غیر خطی استفاده شده است و روابط متناظر با آن‌ها از نرم افزار SPSS استخراج شده و در جدول ۸-۵ آورده شده است. با توجه به مقادیر عرض از مبدأ و ضریب تعیین R^2 ، رابطه‌ی چهارم، به عنوان بهترین مدل پیش بینی ترک عرضی معرفی می‌شود.

جدول ۸-۵- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک عرضی

N	TC INDEX	R^2
1	$105.26 - 0.036A_6d_5(max) - 0.027A_{10}d_5(max)$	0.814
2	$-19167.1 + 19271.3 e^{-0.0000015A_6d_5(max)} - 1.77e^{-0.005A_{10}d_5(max)}$	0.875
3	$-12566.3 + 6647.14A_6d_5(max)^{-0.001} + 6050.93A_{10}d_5(max)^{-0.001}$	0.545
4	$100.17 - 0.0001A_6d_5(max)^2 + 0.001A_6d_5(max) - 0.00005A_{10}d_5(max)^2 + 0.0003A_{10}d_5(max)$	0.889

۵-۴-۲- مدل پیش بینی ترک طولی

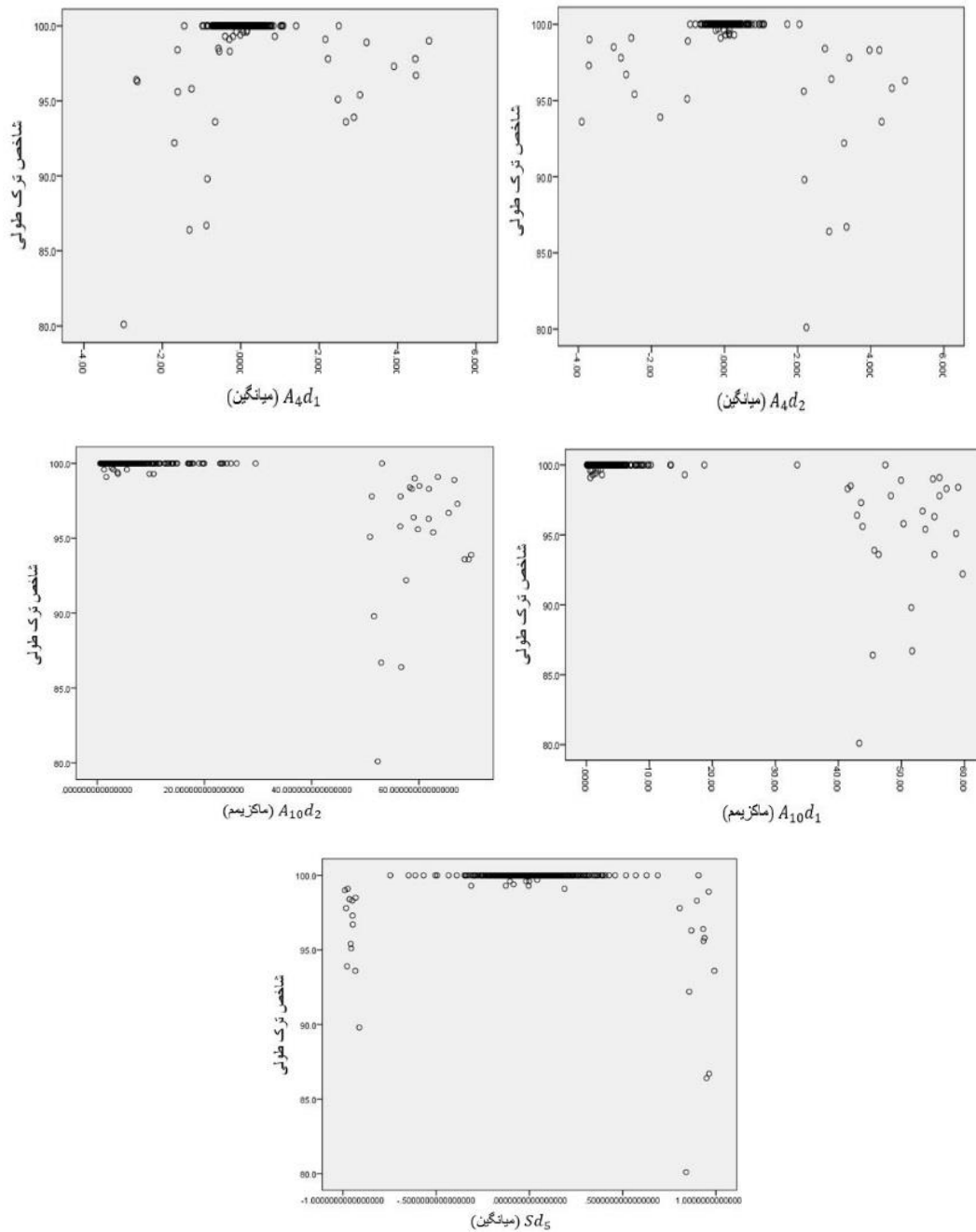
در بخش ۵-۲-۲-۲ مشاهده شد که پنج شاخص $Sd_5(ave)$ ، $A_4d_1(ave)$ ، $A_4d_2(ave)$ و $A_{10}d_1(max)$ و $A_{10}d_2(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک طولی می‌باشد.

حال بار دیگر این شاخص‌ها با کدهای عددی متناظر با شاخص ترک طولی مقایسه و ضریب همبستگی پیرسون مجدداً برای آن‌ها محاسبه می‌شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۹-۵ قابل مشاهده است که با توجه به جدول ۵-۱، این میزان همبستگی، متوسط محسوب می‌شود، بنابراین پنج شاخص مورد نظر از توانایی بالایی برای تخمین رابطه‌ی متناسب با شاخص ترک طولی برخوردار نیستند.

جدول ۹-۵- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک طولی با شاخص ترک آن

Correlations		$A_{10}d_1(max)$	$A_{10}d_2(max)$	$Sd_5(ave)$	$A_4d_1(ave)$	$A_4d_2(ave)$
شاخص ترک طولی	Pearson Correlation	-0.689	-0.659	-0.141	0.077	-0.326
	N	1000	1000	1000	1000	1000

نمودار ارتباطی شاخص ترک طولی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن در ادامه آمده است:



شکل ۵-۲- نمودار ارتباطی شاخص ترک طولی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن

برای تخمین مدل و فرمول مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک طولی، از یک رگرسیون خطی و دو رگرسیون غیر خطی استفاده شده است و روابط متناظر با آن‌ها از نرم افزار SPSS استخراج شده و در جدول ۵-۱۰ آورده شده است. با توجه به مقادیر عرض از مبدأ و ضریب تعیین R^2 ، رابطه‌ی سوم، به‌عنوان بهترین مدل پیش بینی ترک طولی معرفی می‌شود.

جدول ۵-۱۰- روابط مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک طولی

N	LC INDEX	R ²
1	$100.2 - 0.069A_{10}d_1(max) - 0.022A_{10}d_2(max)$	0.481
2	$-90.23 + 192.07e^{-0.0003A_{10}d_1(max)} - 1.66e^{-0.011A_{10}d_2(max)}$	0.482
3	$100.11 + 0.106A_{10}d_1(max)^2 - 1.91A_{10}d_1(max) - 0.107A_{10}d_2(max)^2 + 1.85A_{10}d_2(max)$	0.483

۵-۴-۳- مدل پیش بینی ترک بلوکی

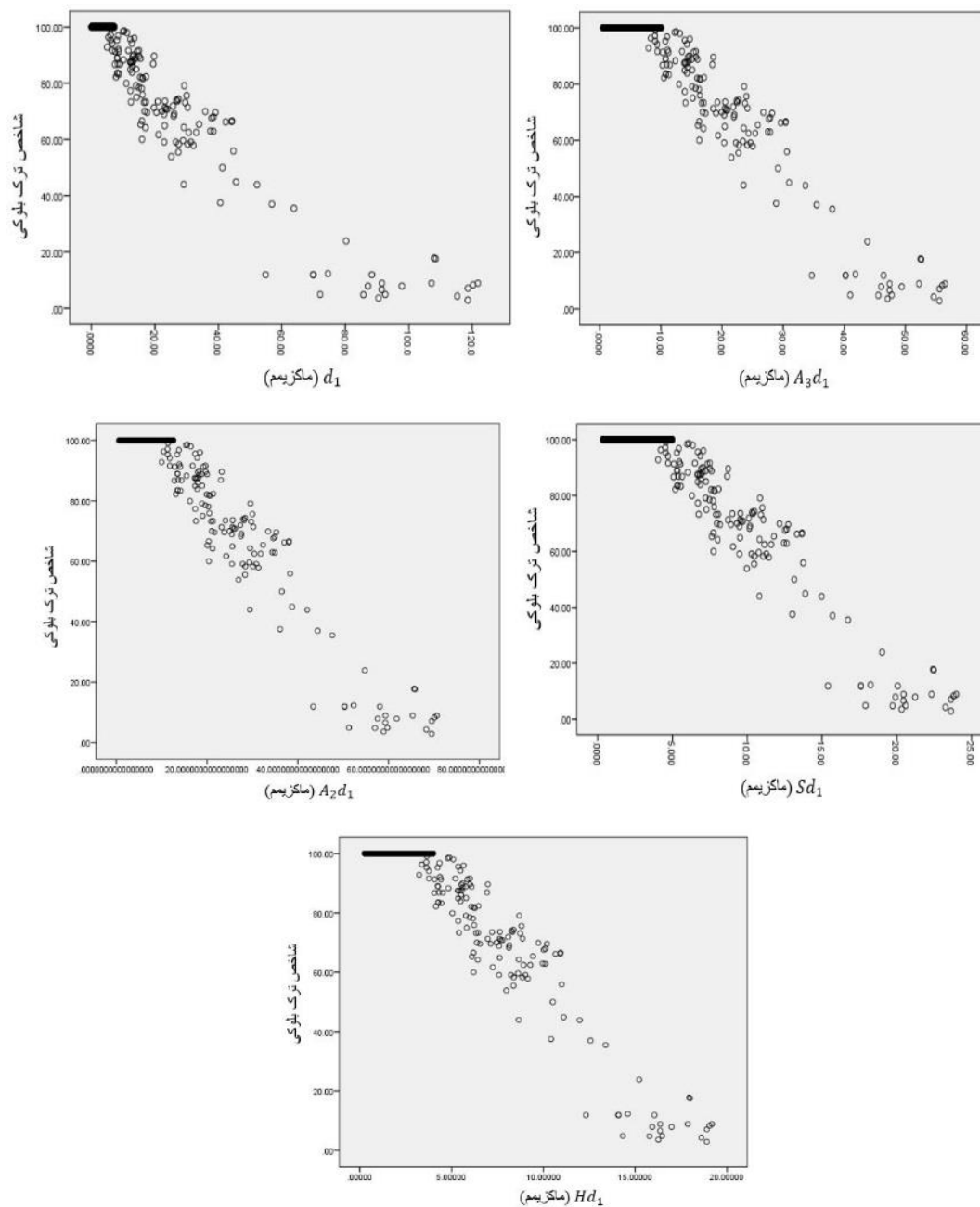
در بخش ۵-۲-۲-۳ مشاهده شد که پنج شاخص $d_1(max)$ ، $A_2d_1(max)$ ، $A_3d_1(max)$ و $Sd_1(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک بلوکی می‌باشد. حال بار دیگر این شاخص‌ها با کدهای عددی متناظر با شاخص ترک بلوکی مقایسه و ضریب همبستگی پیرسون مجدداً برای آن‌ها محاسبه می‌شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۱۱ قابل مشاهده است که با توجه به جدول ۵-۱، این میزان همبستگی، زیاد محسوب می‌شود، بنابراین پنج شاخص مورد نظر از توانایی بالایی برای تخمین رابطه‌ی متناسب با شاخص ترک بلوکی برخوردارند.

جدول ۵-۱۱- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک بلوکی با شاخص ترک آن

Correlations		$Hd_1(max)$	$Sd_1(max)$	$d_1(max)$	$A_2d_1(max)$	$A_3d_1(max)$
شاخص ترک بلوکی	Pearson Correlation	-0.914	-0.914	-0.953	-0.928	-0.928
	N	1000	1000	1000	1000	1000

نمودار ارتباطی شاخص ترک بلوکی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن در ادامه آمده

است:



شکل ۵-۳- نمودار ارتباطی شاخص ترک بلوکی با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن

برای تخمین مدل و فرمول مناسب پیش بینی کننده‌ی ترک بلوکی، از یک رگرسیون خطی و سه

رگرسیون غیر خطی استفاده شده است و روابط متناظر با آن‌ها از نرم افزار SPSS استخراج شده و در

جدول ۵-۱۲ آورده شده است. با توجه به مقادیر عرض از مبدأ و ضریب تعیین R^2 ، رابطه‌ی دوم، به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی ترک بلوکی معرفی می‌شود.

جدول ۵-۱۲- روابط مناسب پیش‌بینی کننده‌ی ترک بلوکی

N	BC INDEX	R^2
1	$102.94 - 0.895d_1(max) - 0.545Hd_1(max)$	0.910
2	$-49 - 14.75e^{-0.174Hd_1(max)} - 14.75e^{-0.139Sd_1(max)} +$ $172.07 e^{-0.013d_1(max)} + 0.002 e^{0.17A_3d_1(max)} + 3.4 e^{0.0002A_2d_1(max)}$	0.950
3	$-49.43 + 30.57 Hd_1(max)^{-0.075} + 19.63Sd_1(max)^{-0.07} +$ $76.45d_1(max)^{-0.04} + 12.76A_2d_1(max)^{-0.065} +$ $13.48A_3d_1(max)^{-0.065}$	0.320
4	$125.51 + 247.1Hd_1(max)^2 - 7437.5Hd_1(max) + 183.36Sd_1(max)^2$ $+5056.4Sd_1(max) + 0.01d_1(max)^2 - 986.2d_1(max)$ $-2.5A_2d_1(max)^2 + 171.45A_2d_1(max) - 24.15A_3d_1(max)^2$ $+370.16A_3d_1(max)$	0.952

۵-۴-۴- مدل پیش‌بینی ترک پوست سوسماری

در بخش ۵-۲-۲-۴ مشاهده شد که پنج شاخص $A_{10}d_3(max)$ ، $A_3d_1(ave)$ ، $A_8d_2(ave)$ و $Hd_3(max)$ و $Sd_3(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت‌های مختلف ترک پوست سوسماری می‌باشد.

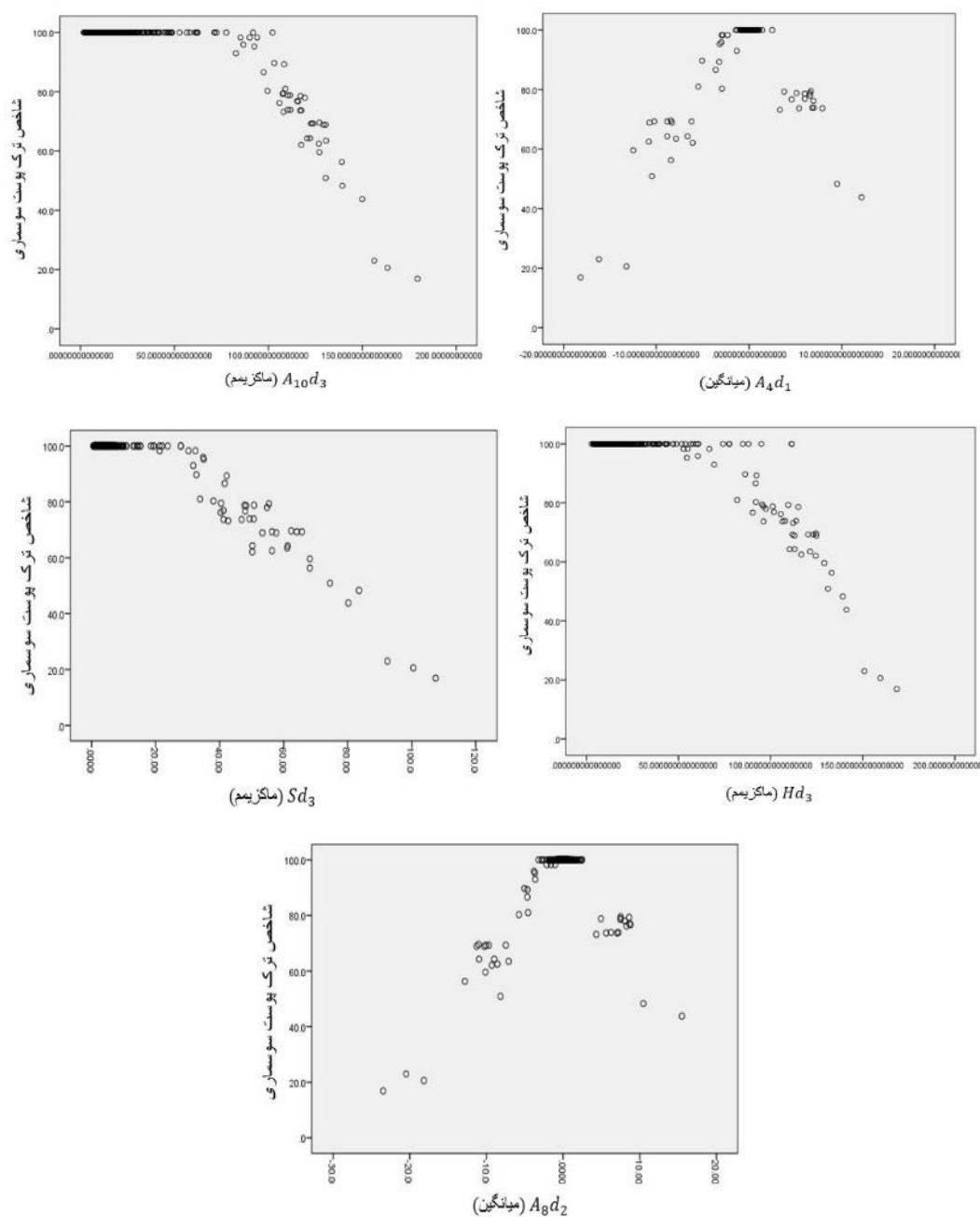
حال بار دیگر این شاخص‌ها با کدهای عددی متناظر با شاخص ترک پوست سوسماری مقایسه و ضریب همبستگی پیرسون مجدداً برای آن‌ها محاسبه می‌شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۱۳ قابل مشاهده است که با توجه به جدول ۵-۱، این میزان همبستگی، نسبتاً زیاد محسوب می‌شود، بنابراین پنج شاخص مورد نظر از توانایی نسبتاً بالایی برای تخمین رابطه‌ی متناسب با شاخص ترک پوست سوسماری برخوردارند.

جدول ۵-۱۳- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته ترک پوست سوسماری با شاخص ترک آن

		Correlations				
شاخص ترک پوست سوسماری		$Hd_3(max)$	$Sd_3(max)$	$A_{10}d_3(max)$	$A_3d_1(ave)$	$A_8d_2(ave)$
	Pearson Correlation	-0.833	-0.94	-0.832	0.446	0.437
	N	1000	1000	1000	1000	1000

نمودار ارتباطی شاخص ترک پوست سوسماری با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن در

ادامه آمده است:



شکل ۵-۴- نمودار ارتباطی شاخص ترک پوست سوسماری با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن

برای تخمین مدل و فرمول مناسب پیش بینی کننده ی ترک پوست سوسماری، از یک رگرسیون خطی و دو رگرسیون غیر خطی استفاده شده است و روابط متناظر با آن ها از نرم افزار SPSS استخراج شده و در جدول ۵-۱۴ آورده شده است. با توجه به مقادیر عرض از مبدأ و ضریب تعیین R^2 ، رابطه ی چهارم به عنوان بهترین مدل پیش بینی ترک پوست سوسماری معرفی می شود.

جدول ۵-۱۴- روابط مناسب پیش بینی کننده ی ترک پوست سوسماری

N	AC INDEX	R^2
1	$100.27 + 0.188Hd_3(max) - 0.998Sd_3(max) + 0.024A_{10}d_3(max)$	0.923
2	$-149.13 + 21.04e^{0.002Hd_3(max)} + 236.15e^{-0.004Sd_3(max)}$ $-7.843 e^{0.023A_{10}d_3(max)}$	0.892
3	$88.47 + 0.97 Hd_3(max)^{0.316} - 0.042Sd_3(max)^{1.643}$ $+9.86A_{10}d_3(max)^{-0.005}$	0.963
4	$99.09 - 0.001Hd_3(max)^2 + 0.062Hd_3(max) - 0.004Sd_3(max)^2$ $-0.032Sd_3(max) - 0.001A_{10}d_3(max)^2 + 0.06A_{10}d_3(max)$	0.969

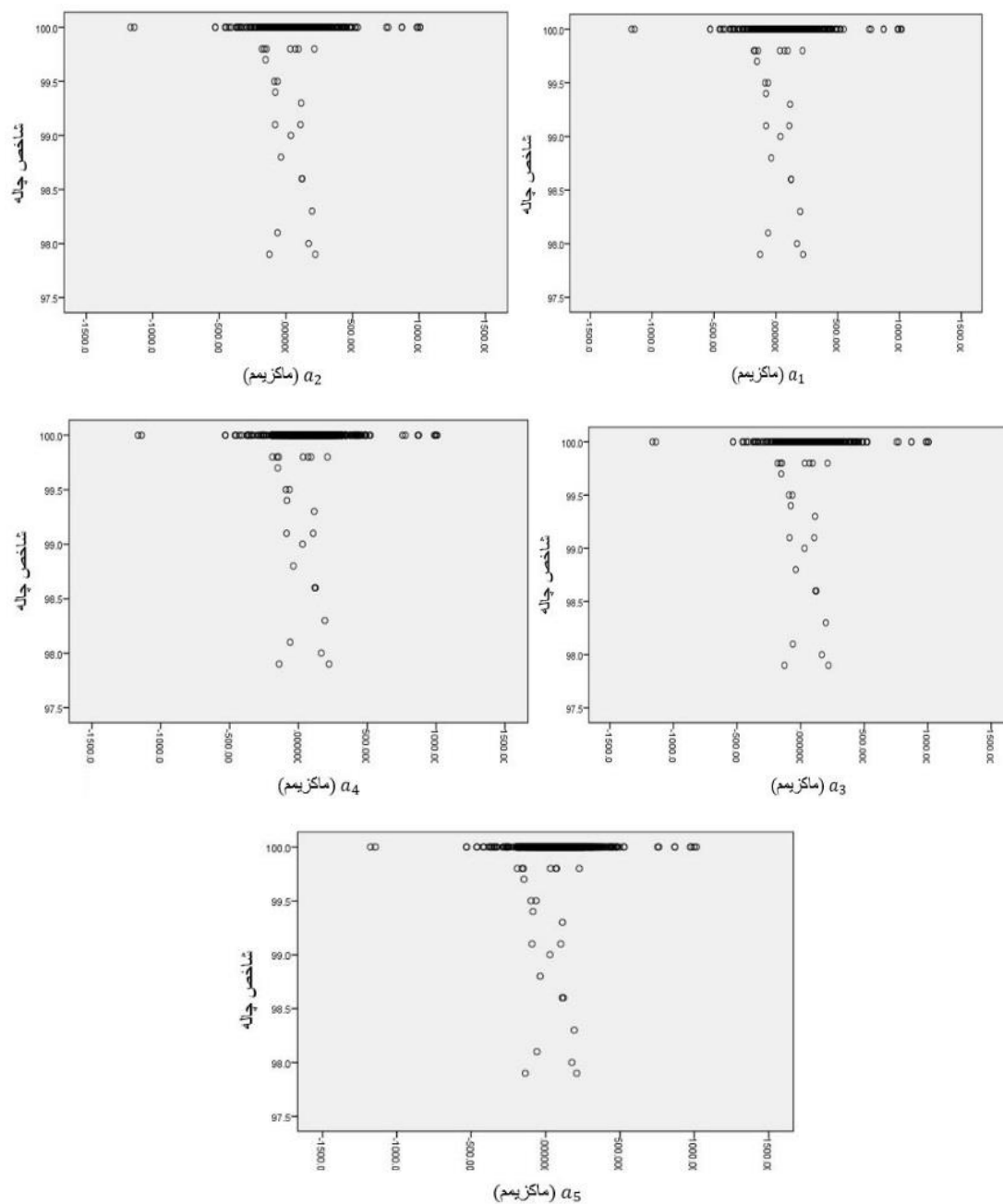
۵-۴-۵- مدل پیش بینی چاله

در بخش ۵-۲-۲-۴ مشاهده شد که پنج شاخص $a_1(max)$ ، $a_2(max)$ ، $a_3(max)$ ، $a_4(max)$ و $a_5(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت های مختلف خرابی چاله می باشد. حال بار دیگر این شاخص ها با کدهای عددی متناظر با شاخص چاله مقایسه و ضریب همبستگی پیرسون مجدداً برای آن ها محاسبه می شود. مقادیر این ضرایب در جدول ۵-۱۵ قابل مشاهده است که با توجه به جدول ۵-۱، این میزان همبستگی، خیلی اندک محسوب می شود، بنابراین پنج شاخص مورد نظر فاقد توانایی مطلوب برای تخمین رابطه ی متناسب با شاخص چاله می باشند.

جدول ۵-۱۵- ضرایب همبستگی معادل شاخص‌های همبسته چاله با شاخص ترک آن

Correlations		$a_1(max)$	$a_2(max)$	$a_3(max)$	$a_4(max)$	$a_5(max)$
شاخص ترک چاله	Pearson Correlation	0.016	0.016	0.016	0.017	0.018
	N	1000	1000	1000	1000	1000

نمودار ارتباطی شاخص چاله با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن در ادامه آمده است:



شکل ۵-۵- نمودار ارتباطی شاخص چاله با هر یک از شاخص‌های ابداعی متناظر با آن

۵-۵- نتایج نهایی

در این بخش به طور خلاصه نتایج و روابط مناسب برای پیش بینی هر ترک و شاخص های مناسب برای رسیدن به آن، آورده شده است:

*ترک عرضی: پارامترهای $A_6d_5(max)$ و $A_{10}d_5(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت های مختلف ترک عرضی می باشند و رابطه ی ۵-۱۲ با مقدار $R^2 = 0.889$ به عنوان بهترین مدل پیش بینی این ترک معرفی می گردد:

رابطه ۵-۱۲

$$TC\ INDEX = 100.17 - 0.0001A_6d_5(max)^2 + 0.001A_6d_5(max) - 0.00005A_{10}d_5(max)^2 + 0.0003A_{10}d_5(max)$$

*ترک طولی: پارامترهای $A_{10}d_2(max)$ و $A_{10}d_1(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت های مختلف ترک طولی می باشند و رابطه ی ۵-۱۳ با مقدار $R^2 = 0.483$ به عنوان بهترین مدل پیش بینی این ترک معرفی می گردد:

رابطه ۵-۱۳

$$LC\ INDEX = 100.11 + 0.106A_{10}d_1(max)^2 - 1.91A_{10}d_1(max) - 0.107A_{10}d_2(max)^2 + 1.85A_{10}d_2(max)$$

*ترک بلوکی: پارامترهای $A_3d_1(max)$ ، $A_2d_1(max)$ ، $d_1(max)$ ، $Sd_1(max)$ و $Hd_1(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت های مختلف ترک بلوکی می باشند و رابطه ی ۵-۱۴ با مقدار $R^2 = 0.950$ به عنوان بهترین مدل پیش بینی این ترک معرفی می گردد:

رابطه ۵-۱۴

$$BC\ INDEX = -49 - 14.75e^{-0.174Hd_1(max)} - 14.75e^{-0.139Sd_1(max)} + 172.07e^{-0.013d_1(max)} + 0.002e^{0.17A_3d_1(max)} + 3.4e^{0.0002A_2d_1(max)}$$

*ترک پوست سوسماری: پارامترهای $A_{10}d_3(max)$ ، $Sd_3(max)$ و $Hd_3(max)$ دارای بالاترین مقدار همبستگی با شدت های مختلف ترک پوست سوسماری می باشند و رابطه ی ۵-۱۵ با مقدار $R^2 = 0.969$ به عنوان بهترین مدل پیش بینی این ترک معرفی می گردد:

$$AC\ INDEX = 99.09 - 0.001Hd_3(max)^2 + 0.062Hd_3(max) - 0.004Sd_3(max)^2 - 0.032Sd_3(max) - 0.001A_{10}d_3(max)^2 + 0.06A_{10}d_3(max)$$

*چاله: هیچ یک از پارامترهای $a_1(max)$, $a_2(max)$, $a_3(max)$, $a_4(max)$ و $a_5(max)$

دارای همبستگی مناسب با شدت‌های مختلف چاله نیستند چرا که این پارامترها دارای مقادیر

همبستگی نزدیک به صفر هستند، لذا نمی‌توان مدل پیش‌بینی مناسبی برای شناسایی چاله فاقد ارائه

کرد.

فصل ششم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۶-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به جمع‌بندی نتایج پرداخته و به اختصار مروری بر خروجی‌های تحقیق جاری صورت خواهد گرفت و سپس پیشنهاداتی به عنوان زمینه‌ساز تحقیق‌های آتی ارائه خواهد شد.

۶-۲- نتایج تحقیق

همانطور که از ابتدای تحقیق عنوان شد، هدف نهایی، دستیابی به مدلی برای پیش‌بینی انواع ترک‌ها و چاله‌ها بود که در ادامه به مرور نتایج بدست آمده در راستای رسیدن به هدف فوق پرداخته خواهد شد.

* ترک عرضی: پارامترهای $A_6d_5(max)$ و $A_{10}d_5(max)$ که در فصل ۴ معرفی شدند، دارای بالاترین مقدار همبستگی با ترک عرضی می‌باشند و مدل پیش‌بینی این ترک با استفاده از پارامترهای فوق، توسط رابطه‌ی ۵-۱۲ معرفی گردیده است که به دلیل داشتن ضریب تعیین مناسب، از دقت بالایی در شناسایی ترک عرضی برخوردار است.

* ترک طولی: پارامترهای $A_{10}d_2(max)$ و $A_{10}d_1(max)$ که در فصل ۴ معرفی شدند، دارای بالاترین مقدار همبستگی با ترک طولی می‌باشند و مدل پیش‌بینی این ترک با استفاده از پارامترهای فوق، توسط رابطه‌ی ۵-۱۳ معرفی گردیده است که به دلیل داشتن ضریب تعیین نه چندان مطلوب، از دقت بالایی در شناسایی ترک طولی برخوردار نمی‌باشد.

* ترک بلوکی: پارامترهای $A_3d_1(max)$ ، $A_2d_1(max)$ ، $d_1(max)$ و $Sd_1(max)$ و $Hd_1(max)$ که در فصل ۴ معرفی شدند، دارای بالاترین مقدار همبستگی با ترک بلوکی می‌باشند و مدل پیش‌بینی این ترک با استفاده از پارامترهای فوق، توسط رابطه‌ی ۵-۱۴ معرفی گردیده است که به دلیل داشتن ضریب تعیین مناسب، از دقت بالایی در شناسایی ترک بلوکی برخوردار است.

* ترک پوست سوسماری: پارامترهای $A_{10}d_3(max)$ و $Sd_3(max)$ و $Hd_3(max)$ که در فصل ۴ معرفی شدند، دارای بالاترین مقدار همبستگی با ترک پوست سوسماری می‌باشند و مدل پیش‌بینی این

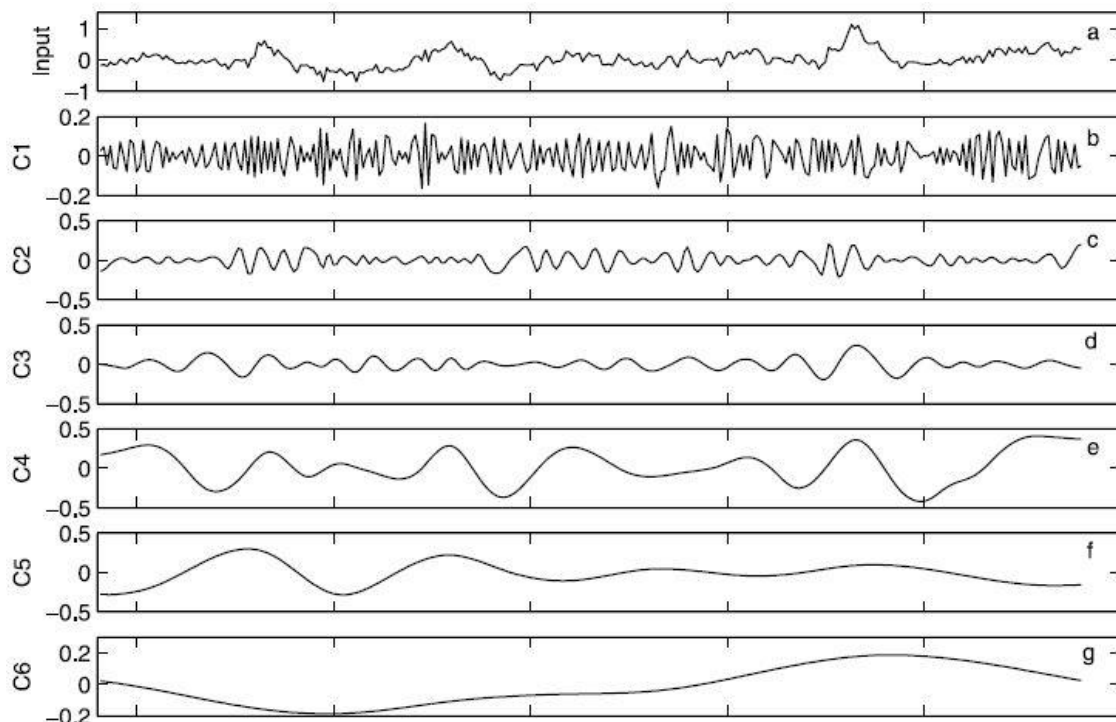
ترک با استفاده از پارامترهای فوق، توسط رابطه‌ی ۵-۱۴ معرفی گردیده است که به دلیل داشتن ضریب تعیین مناسب، از دقت بالایی در شناسایی ترک پوست سوسماری برخوردار است.

*چاله: هیچ یک از پارامترهای $a_1(max)$ ، $a_2(max)$ ، $a_3(max)$ ، $a_4(max)$ و $a_5(max)$ که در فصل ۴ معرفی شدند، دارای همبستگی مناسب با چاله نیستند و مقادیر همبستگی‌شان نزدیک به صفر است؛ لذا نمی‌توان مدل پیش‌بینی مناسبی برای شناسایی چاله فاقد ارائه کرد.

۳-۶- پیشنهاد ادامه کار

در تحقیق جاری، استفاده از روش آنالیز موجک برای فیلتراسیون داده‌های خام دستگاه RSP مبنای کار قرار گرفت.

امروزه روش‌های متعدد و نوینی جهت انجام فرآیند فیلتراسیون وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش EMD اشاره کرد. در آنالیز EMD سیگنال اصلی، به مجموعه‌ای نویز با طول موج‌های مختلف تقسیم می‌شود، به نحوی که سیگنال اصلی، از حاصل جمع آن نویزها تشکیل می‌شود. این فرآیند در شکل ۶-۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۱- فرآیند فیلتراسیون با روش آنالیز EMD

تمامی سؤالاتی که در ابتدای این تحقیق در رابطه با چگونگی شناسایی محل ترک‌ها و چاله‌ها مطرح شد، می‌توان با روش آنالیز EMD مورد ارزیابی قرار داد.

پیشنهاد دیگر برای ادامه کار می‌تواند پیش‌بینی شاخص خرابی (مانند PCI^۱) بر اساس ناهمواری باشد. در مطالعات قبلی، رابطه‌ی PCI-IRI مطلوب نبوده است. امکان برقراری رابطه‌ی مناسب بین این دو، با بررسی نویزهای ناهمواری وجود دارد.

1- Pavement Condition Index

- [1] Sayers M. and Gillespie T., (1986) **"The Ann Arbor Road Profilometer Meeting"** Federal Highway Administration Report No. FHWA/RD-86/100 July.
- [2] Shahin M. Y., (1993) **"Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots"** Vol.1, Springer, pp.96.
- [3] Sayers M. and Karamihas S. M. (1998) **"The Little Book of Profiling"**, Vol. 1, University of Michigan, USA.
- [4] Sayers M., Gillespie T. and Paterson W., (1986) **"Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements"** World Bank Technical Paper No. 46.
- [5] Wei L., Fwa T. F. and Zhe Z., (1995) **"Pavement Roughness Analysis Using Wavelet Theory"**
- [6] Hesami R., McManus K. J., (1999) **"Signal Processing Approach to Road Roughness Analysis and Measurement"**
- [7] Oliveira H. and Correia P. L., (2009) **"Automatic Road Crack Segmentation Using Entropy Andimage Dynamic Thresholding"** EUSIPCO, pp622, Glasgow, Scotland.
- [8] Cuhadar A., Shalaby A. and Tasdoken S., (2002) **"Automatic Segmentation of Pavement Condition Data Using Wavelet Transform"** Canadian Conference, pp1009, Toronto, Canada.
- [9] Zhang Z. and Zhu Y., (2010) **"A New Approach to Analysis of Surface Topography"** Precision Engineering, 34, pp807.
- [10] Josso B., Burton D. R. and Lalor M. J., (2002) **"Frequency Normalised Wavelet Transform for Surface Roughness Analysis and Characterization"** Wear, 252, pp491.
- [11] Huidrom L., Das L. K. and Sud S. K., (2013) **"Method for Automated Assessment of Potholes, Cracks And Patches from Road Surface Video Clips"** Procedia,104, pp312.
- [12] Chang J., Su Y. and Huang T., (2009) **"Measurement of the International Roughness Index (IRI) Using an Autonomous Robot (P3-AT)"** ISARC, pp325, Taipei, Taiwan.
- [13] Changxia M., Wang W. and Zhao C., (2009) **"Pavement Cracks Detection Based on FDWT"** Lianyungang, China.
- [14] Prasad J. R., Kanuganti S. and Bhanegaonkar P. N., (2013) **"Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses"** Procedia,104, pp322.
- [15] Boslaugh S., (2012) **"Statistics in a Nutshell"** 2nd Edition, O'Reilly Media, pp.233.
- [16] **"Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program"**, Publication No. FHWA-RD 03-031, June (2003).

پیوست ۱:

کدهای ورودی به نرم افزار متلب

کدهای مربوط به مشخصه‌ی ارتفاع میانگین مؤلفه‌ی جزئیات:

```
function S = WinArea(x,wL,t0)

Win = ones(1,wL);

xL = length(x);

k = 1;
p = wL;

if t0==0
    jj=1;
    j=0;
else
    jj=0;
    j=1;
end

while(p<=xL)

    WinX(1,:) = x(1,k:k+wL-1).*Win;
    S(1,k:k+wL-1) = sum(WinX);
    k = k+jj*(wL-1)+j*(t0);
    p = wL+k;
end

figure,
subplot(2,1,1),plot(x);
subplot(2,1,2),stem(S);
```


کدهای مربوط به مشخصه‌ی شیب و ارتفاع مؤلفه‌ی جزئیات:

```
function [Max , VecH] = CalCyc2(x)
xn = x - mean(x);
L = length(x);
cc = 1;i = 1;
first = true;
cH = 1;
flagS = false;
flagB = false;
while i~=L

    while sign(xn(i+1)) == sign(xn(i))
        if first,
            cV1 = i;
            flagS = true;
            first = false;
        end
        cH = cH + 1;
        i = i+1;
        if i == L;
            flagB = true;
            break;
        end
    end
    if flagS
        cV2 = i;
        VecH(cc)= cH;
        if sign(x(cV1)) == -1
            Max(cc)= min(x(1,cV1: cV2));
        elseif sign(x(cV1)) == 1
            Max(cc)= max(x(1,cV1: cV2));
        end
        cc = cc+1;
        flagS = false;
        first = true;
        cH = 1;
    end
    if flagB
        break;
    end

    i = i+1;
end
```


پیوست ۲:

مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای

۳۰۰ متر از مسیر مورد مطالعه

جدول پ ۱-۲- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از کدهای صفر و یک معرف شدت‌های مختلف خرابی‌های مشاهده شده از

سطح روسازی

Start Station(m)	Stop Station(m)	Transverse			Longitudinal			Block			Alligator			Pothole		
		L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
0	10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	60	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	70	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	80	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	90	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	100	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	110	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	120	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	130	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	140	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	150	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	160	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	170	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	180	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	190	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
190	200	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	210	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	220	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	230	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
230	240	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	260	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	270	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	280	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
280	290	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
290	300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

جدول پ ۲-۲- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های اول و دوم و سوم (سیگنال اصلی، مؤلفه تقریب و مؤلفه جزئیات) - ماکزیمم

Start Station(m)	Stop Station(m)	S (max)	a_1 (max)	a_2 (max)	a_3 (max)	a_4 (max)	a_5 (max)	d_1 (max)	d_2 (max)	d_3 (max)	d_4 (max)	d_5 (max)
0	10	216	214.4052	214.7204	214.7884	215.8159	217.3873	5.00657	7.106435	3.391028	4.866403	9.15214
10	20	152	149.7958	150.4696	151.4191	144.6599	142.6723	10.56907	4.965564	6.116831	14.91249	12.14426
20	30	229	229.1863	229.2732	226.1476	225.9095	240.7541	4.379487	7.399068	12.84563	8.392191	29.90515
30	40	145	145.3191	147.1375	141.6847	141.9904	142.0907	4.965304	11.24094	7.203669	8.388249	18.55127
40	50	91	79.5278	76.15268	73.51134	72.18168	74.03772	17.40489	6.399574	4.531042	3.307926	6.145754
50	60	155	155.578	153.6933	151.4343	152.4442	155.9368	4.274519	5.893199	3.957884	4.55516	10.11422
60	70	150	149.1887	150.4679	147.093	147.0107	148.5972	8.701842	19.25788	17.21117	11.35214	14.22506
70	80	-197	-197.834	-197.31	-194.651	-195.771	-193.011	8.127083	9.936989	11.64896	6.112194	8.374256
80	90	-314	-314.492	-316.171	-315.3	-318.235	-325.637	7.391425	13.30585	8.320696	21.89614	21.69835
90	100	-162	-160.69	-162.91	-170.096	-169.421	-161.6	9.101361	3.135687	10.13495	19.1323	25.49593
100	110	36	37.51106	35.1504	34.17573	25.8893	12.60288	9.677323	17.10044	11.69263	17.81987	13.81972
110	120	114	112.4106	111.2109	109.4273	102.6526	106.023	10.46082	8.088696	11.25623	17.77532	17.41222
120	130	188	185.491	186.9467	188.7058	187.4545	184.4802	4.804728	5.88451	6.278297	11.03088	5.677834
130	140	187	186.587	187.3395	182.8367	182.8518	185.597	4.277804	4.786143	6.573355	8.018886	13.06482
140	150	166	167.0535	165.4408	166.0691	170.0949	160.0082	8.901602	7.77218	4.187212	11.3213	13.15814
150	160	153	154.799	154.9779	154.5438	154.256	163.3603	8.689583	6.978726	14.78349	11.40246	15.21728
160	170	151	150.1929	151.2157	139.8826	136.2828	137.1502	7.020032	6.411493	23.24425	24.00641	26.68975
170	180	267	266.5433	267.7997	259.6996	237.1881	242.4722	6.094791	7.474814	8.100055	26.34543	9.88512
180	190	201	198.6238	197.3139	196.6608	202.609	205.299	9.339102	9.355383	14.82583	8.906044	12.08576
190	200	222	219.1573	219.5279	223.4142	217.2703	220.7231	17.34567	5.838126	7.416121	16.26011	10.01447
200	210	115	116.0748	115.8952	113.6119	117.0405	108.2196	7.413861	8.770853	11.91386	14.59183	9.041824
210	220	-185	-185.535	-187.997	-186.704	-184.408	-181.686	6.241025	7.550079	3.921918	5.305855	8.206526
220	230	-103	-103.439	-106.646	-107.115	-107.31	-105.982	9.169551	6.027804	18.52596	7.028671	16.72976
230	240	134	132.52	132.5296	130.6891	137.9186	147.9965	12.05561	21.75863	9.328632	25.05337	20.23609
240	250	130	130.7108	127.0376	126.3461	126.2674	152.1559	26.22877	11.19145	32.94909	23.29244	29.82359
250	260	-341	-340.118	-339.385	-335.013	-341.966	-343.948	5.712019	4.405548	7.018778	13.11233	14.6803
260	270	-350	-352.066	-351.952	-350.381	-362.593	-363.47	9.570272	5.136583	26.79367	22.6735	26.91792
270	280	286	285.2243	282.2177	282.8461	282.0862	270.5379	3.786779	10.39936	8.691707	9.435598	11.54836
280	290	502	498.7566	494.9843	491.9488	487.692	460.9793	6.921633	12.98253	12.74943	22.77341	30.25812
290	300	550	549.764	540.1328	525.3715	493.0206	482.3953	17.22035	29.32881	14.76127	42.9365	10.62534

جدول پ ۲-۳- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های چهارم و پنجم (مشخصه ارتفاعی و شیب مؤلفه جزئیات) - ماکزیمم

Start Station(m)	Stop Station(m)	Hd_1 (max)	Hd_2 (max)	Hd_3 (max)	Hd_4 (max)	Hd_5 (max)	Sd_1 (max)	Sd_2 (max)	Sd_3 (max)	Sd_4 (max)	Sd_5 (max)
0	10	8.627083	9.332391	7.286301	8.021127	10.72351	6.766747	4.666195	1.821575	1.002641	0.810118
10	20	14.38365	9.681024	12.43219	21.21682	18.63134	14.38365	4.840512	3.108047	2.285709	1.164459
20	30	14.51883	9.316456	16.04821	14.02804	44.74977	14.51883	4.658228	4.012053	1.219458	2.796861
30	40	8.628285	15.77022	13.18028	15.52441	23.4881	8.628285	7.88511	3.29507	1.788248	2.936012
40	50	22.93269	9.167958	10.92758	7.527054	12.72679	22.93269	4.533804	2.731896	0.940882	1.590848
50	60	13.43958	10.82013	8.358041	11.26134	16.29039	13.43958	4.199296	2.08951	1.407668	1.01815
60	70	16.93269	28.18619	32.13213	20.77627	19.51286	11.97877	14.0931	4.30699	2.597033	2.439107
70	80	12.01314	16.71541	21.64653	14.70824	19.82358	12.01314	6.654983	5.411633	1.83853	1.238974
80	90	19.11362	21.72821	23.15049	32.85241	44.25251	19.11362	5.432052	5.787622	2.542231	2.765782
90	100	15.80769	7.986984	18.98928	28.53707	31.42746	12.41146	3.993492	4.74732	2.572179	1.826296
100	110	15.29455	25.44635	20.78162	32.88811	33.0985	7.647275	9.178464	3.306276	2.307495	2.068656
110	120	14.65937	12.63436	19.13784	32.08454	18.57934	14.44375	6.317182	4.78446	2.526813	1.911567
120	130	9.988621	13.70118	14.2699	20.2145	9.323129	8.966506	6.85059	3.567474	2.526813	0.943896
130	140	12.85016	10.23521	12.92448	16.58114	22.20413	6.425079	3.715364	3.23112	2.072643	1.387758
140	150	22.50417	12.37292	6.879922	16.40585	23.53249	22.50417	6.186461	1.71998	1.885648	2.941561
150	160	13.03109	12.34099	24.41612	22.93514	44.97191	13.03109	4.015342	3.377796	2.866893	1.405372
160	170	11.9641	13.73272	27.43379	35.07965	44.97191	11.9641	6.866358	6.858448	3.030822	1.969012
170	180	11.50985	17.93025	21.07079	36.6334	13.69348	11.50985	8.965123	5.267698	4.579175	0.855842
180	190	13.94287	13.6145	17.04585	23.47365	22.8986	9.013462	6.807248	3.40917	1.536961	2.862325
190	200	21.71378	12.30386	18.44433	26.9455	20.28704	21.71378	3.075965	4.611084	3.368187	2.53588
200	210	13.09567	15.98681	19.47531	19.8672	15.52411	8.393829	7.07681	2.709721	2.4834	1.401521
210	220	10.09479	18.27454	6.67622	12.31619	23.31208	10.09479	9.137269	1.669055	1.539524	2.91401
220	230	13.63694	10.05211	21.60877	15.28213	27.89954	13.63694	5.026056	5.402192	1.910266	3.487442
230	240	16.05977	34.32733	17.41822	28.52126	22.99619	16.05977	8.581832	2.206195	3.721408	0.999834
240	250	62.79839	28.34233	77.44603	55.1609	42.54263	62.79839	14.17117	19.36151	6.895112	5.317829
250	260	12.41955	9.351592	15.8331	25.92462	24.6697	6.941987	4.675796	3.958275	2.171021	3.083713
260	270	15.71771	10.81056	38.6301	37.08904	53.59623	15.71771	5.40528	5.95878	2.318065	3.554817
270	280	7.969791	17.24002	23.83512	18.98581	14.42957	7.969791	4.310006	5.95878	2.373226	0.627373
280	290	10.28558	15.58405	21.94491	29.81999	43.26573	9.851361	7.792027	3.257493	3.208144	3.425947
290	300	27.92908	57.52942	39.45308	50.88209	21.89693	27.92908	14.38236	9.863269	6.360261	2.737116

جدول پ ۴-۲- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های ششم و هفتم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات برای ۲ و ۳ واحد طول) - ماکزیمم

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_2d_1 (max)	A_2d_2 (max)	A_2d_3 (max)	A_2d_4 (max)	A_2d_5 (max)	A_3d_1 (max)	A_3d_2 (max)	A_3d_3 (max)	A_3d_4 (max)	A_3d_5 (max)
0	10	5.257772	10.7435	6.211339	9.187812	17.80849	3.549038	10.37388	6.965719	11.7239	24.47499
10	20	6.754487	7.163531	10.16425	28.3011	23.63796	6.995513	7.13436	11.18989	35.6339	32.52045
20	30	8.040064	10.94248	22.64039	15.97743	57.96716	3.265544	10.62172	26.34379	20.19742	78.62006
30	40	3.427323	16.18198	12.50017	16.00259	36.37564	3.474279	16.10329	14.56583	20.52735	51.29648
40	50	11.87708	9.433955	7.189675	6.03217	11.85255	11.52332	9.670012	9.586266	7.760803	16.37154
50	60	7.899519	9.391747	7.011867	8.247512	19.57668	3.375	8.575126	8.176132	10.98068	26.41811
60	70	10.42284	27.37885	31.48701	21.61664	27.46569	5.402804	26.33115	37.23895	27.54569	36.74477
70	80	5.919551	15.83824	20.62899	11.87616	15.96156	6.05681	16.75763	24.20155	16.21705	22.07724
80	90	10.8101	20.98576	14.2866	41.67787	41.66825	5.947355	20.75097	18.78489	53.07036	54.68467
90	100	9.453044	4.590119	17.86059	36.36996	49.69355	6.75657	4.724354	20.47135	46.07012	68.68363
100	110	9.510177	26.40498	21.22147	34.07119	27.27828	3.892949	24.64685	24.50895	44.05262	39.78252
110	120	9.268829	11.4019	19.81971	34.02039	34.13957	6.248798	10.72023	22.34233	44.14464	48.13143
120	130	6.13157	8.659546	11.04327	20.99994	10.92465	4.066987	8.593475	12.79766	26.73974	14.44248
130	140	7.706329	8.055934	11.74607	14.72798	25.26385	3.032291	8.632963	12.7854	18.16598	33.97974
140	150	9.785576	11.44318	7.204712	21.30874	25.9073	8.264342	12.47805	8.735668	27.11781	37.03046
150	160	7.94976	11.22918	26.72872	22.03453	29.65059	3.896234	11.63708	31.53107	29.54942	40.93867
160	170	5.220994	10.3599	41.1422	45.58552	52.21673	4.745513	9.952374	47.73614	57.54643	73.09043
170	180	5.845994	8.515374	12.85916	49.50598	19.20253	5.402804	9.249584	17.49783	62.5809	26.23956
180	190	8.579247	13.32187	26.30587	16.36255	23.32514	4.959614	12.79138	30.63061	20.0671	31.15907
190	200	12.97756	9.749871	13.98334	30.84166	18.98706	10.3113	9.807899	17.36691	38.75286	27.18477
200	210	7.805608	14.13293	21.56133	27.44185	17.86273	4.273317	13.5006	25.42759	34.7927	23.59245
210	220	4.640544	11.9019	6.954113	9.670924	15.91519	5.024519	11.32597	8.078935	12.50018	21.62517
220	230	5.502083	9.454166	32.82197	12.86354	32.13226	6.537981	8.757266	38.25147	16.22211	42.53924
230	240	8.051443	34.18601	17.04057	47.40555	39.40648	7.75	33.72106	20.12362	59.56	54.30303
240	250	21.51819	14.60227	52.97194	42.18039	57.53354	12.14832	15.20806	66.69209	56.42102	76.73654
250	260	7.571475	6.201277	11.33845	25.11062	28.18215	3.498798	6.735222	14.31857	32.64954	36.93904
260	270	6.746715	8.193685	47.88493	43.25133	51.70837	8.464102	8.144867	54.70994	55.47081	67.9421
270	280	3.320272	16.56113	15.46984	17.13601	23.75277	3.911779	16.86994	18.72479	22.34188	34.61286
280	290	6.538861	19.40338	23.03945	43.15127	59.04095	4.75	18.3886	26.94262	54.61543	81.9109
290	300	16.45633	48.19133	24.64817	81.10936	20.38402	8.81907	47.67141	32.84652	101.9738	26.65451

جدول پ ۲-۵- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های هشتم و نهم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات یرای ۴ و ۶ واحد طول) - ماکزیمم

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_4d_1 (max)	A_4d_2 (max)	A_4d_3 (max)	A_4d_4 (max)	A_4d_5 (max)	A_6d_1 (max)	A_6d_2 (max)	A_6d_3 (max)	A_6d_4 (max)	A_6d_5 (max)
0	10	3.279006	9.375711	8.09776	16.21746	31.75268	1.8125	5.091767	12.04598	21.68419	41.65422
10	20	7.05024	9.688186	9.043015	47.42813	41.96237	2.558013	7.264749	9.527439	49.04837	62.98913
20	30	7.645032	8.704327	33.55679	28.74106	108.5252	2.823557	2.551377	33.23475	28.13835	139.3458
30	40	4.154006	13.22421	13.41737	28.9156	69.84775	0.911779	6.865189	19.63305	38.80044	97.58091
40	50	12.35256	6.295764	10.84476	9.846674	22.03427	2.216506	6.05369	13.47632	11.42108	29.28213
50	60	5.595994	9.404648	10.44865	13.7268	36.53232	3.158494	6.260877	10.84415	17.4686	46.87086
60	70	4.56907	13.40287	51.28813	34.71613	50.96984	6.239823	2.468244	59.96887	50.94217	59.22547
70	80	2	15.85411	30.88115	22.32924	26.7504	2.761057	12.17294	26.29991	30.10784	39.90636
80	90	2.899519	21.9711	23.28648	70.68375	69.02452	5.953044	9.915545	31.68155	75.48178	103.7393
90	100	3.25657	6.243379	25.81634	65.20242	89.70934	3.428525	5.752148	25.92892	86.73624	118.1938
100	110	2.844791	11.1722	33.75663	55.64712	54.50039	2.125	9.751758	39.73312	73.59853	73.02143
110	120	6.395032	8.122676	28.62231	61.91996	62.8493	5.921633	4.178615	19.71345	74.51854	94.25339
120	130	3.549038	8.100976	16.68082	37.77061	18.77796	3.88726	6.535076	18.09222	37.1719	22.52369
130	140	5.331329	9.710872	16.68082	23.44847	45.08468	4.290064	5.902954	11.42266	21.38552	60.02553
140	150	2.366025	7.893239	8.635532	37.34386	48.66315	2.25	3.813391	10.04581	38.10597	70.32895
150	160	6.049038	13.03716	42.00911	37.47121	53.72223	5.558013	5.993344	34.16928	51.91235	73.66575
160	170	5.23774	12.26973	43.57376	76.61599	99.78018	4.904006	7.438532	62.76333	97.27633	128.7866
170	180	3.553525	6.280499	19.64526	86.42875	33.74684	4.268829	7.364773	24.08795	112.3618	44.16544
180	190	4.19976	7.164803	39.19774	26.9719	43.24483	4.965304	5.127218	40.77032	34.28777	55.24055
190	200	11.16506	6.150772	24.78304	51.03466	35.14884	2.399519	6.716387	33.79989	63.64019	49.70972
200	210	5.174038	14.65953	32.90041	41.96301	34.85255	3.241025	7.424639	36.60089	51.72927	35.60037
210	220	5.69976	15.74222	10.33845	15.83279	29.73107	4.349279	14.35485	12.01434	17.72426	36.98101
220	230	2.768829	3.834596	48.30532	20.75348	58.92016	2.710817	6.863741	42.17991	25.32474	79.47328
230	240	7.92524	35.25089	26.19318	74.30829	74.53912	3.282291	15.44401	22.57569	111.5161	105.285
240	250	11.67316	14.53942	76.92935	65.21543	100.4202	23.61843	11.36733	38.1594	86.27135	130.3924
250	260	4.726683	7.544961	16.55364	45.76187	49.59916	3.410576	2.292423	17.61945	54.77116	66.50012
260	270	7.166266	8.944301	70.64715	78.14432	90.04065	5.343589	3.35341	73.11872	78.99162	104.9607
270	280	2.911779	18.36035	23.11138	27.40276	43.78271	1.786779	10.85569	26.15404	30.84583	63.19875
280	290	4.466506	15.78708	26.70009	76.79404	105.6314	5.084614	9.724385	39.48147	102.2744	141.9384
290	300	11.36362	28.10514	37.06177	135.1386	40.28988	11.10016	20.20366	37.65713	190.0932	40.76376

جدول پ ۲-۶- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های هشتم و نهم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات برای ۸ و ۱۰ واحد طول) - ماکزیمم

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_8d_1 (max)	A_8d_2 (max)	A_8d_3 (max)	A_8d_4 (max)	A_8d_5 (max)	$A_{10}d_1$ (max)	$A_{10}d_2$ (max)	$A_{10}d_3$ (max)	$A_{10}d_4$ (max)	$A_{10}d_5$ (max)
0	10	2.0625	3.796069	10.58887	18.16269	48.3925	2.286779	4.437355	7.214096	25.02086	70.89973
10	20	2.853766	5.29697	10.96062	68.74542	76.69365	3.402804	6.427224	11.2373	44.64533	86.9539
20	30	2.183013	5.29697	21.22291	44.03532	188.3315	1.683013	2.878706	25.35467	31.99735	165.9858
30	40	3.344791	3.374424	16.25894	32.24678	119.9758	2.616025	7.233609	9.235224	25.95379	152.2492
40	50	3.128285	6.818641	10.85568	13.38603	32.08462	2.323557	5.379297	14.71999	15.03215	40.1522
50	60	2.470994	6.818641	10.85568	19.55849	58.72033	2.933013	5.313541	14.71999	15.03215	54.2708
60	70	3.433013	26.81846	21.88814	57.29416	87.2262	7.190785	4.010892	58.21921	51.37111	101.1388
70	80	4.919551	6.079918	26.27069	39.08932	49.03584	2.900721	10.22068	18.37724	49.49146	55.00014
80	90	6.272114	9.925596	33.44139	87.00867	111.42	2.524519	10.62455	36.6584	76.16713	127.6619
90	100	8.25657	1.519401	25.00203	72.53717	150.8103	2.390544	2.643574	16.26139	106.5716	173.9962
100	110	3.716506	8.540064	33.0415	84.71296	118.5154	3.417468	11.77908	16.06342	110.2818	137.4669
110	120	5.870513	7.843094	22.57174	101.6709	118.5154	6.305608	8.409535	8.893396	108.8615	137.4669
120	130	4.111538	6.443619	18.39864	51.2167	33.67949	1.603766	4.523097	17.33005	61.5427	29.45735
130	140	2.570272	2.014133	17.43447	24.35166	66.05766	4.49431	2.606556	11.46428	17.79218	77.1944
140	150	2.515544	3.490941	5.410496	57.60972	86.66497	2.216506	6.400751	4.806308	47.11605	96.0323
150	160	6.920753	5.891897	31.32582	70.33067	100.3824	2.138462	6.200375	22.85147	54.21369	105.2966
160	170	6.132772	6.939718	38.29936	122.9354	181.0033	1.103766	7.44025	25.96782	135.1868	200.4517
170	180	3.204247	4.656074	21.6575	118.5981	63.67973	6.419551	5.41273	26.33756	81.00829	59.35707
180	190	7.186298	10.01125	36.445	26.14285	66.89182	3.541266	3.614002	30.00147	17.80518	77.11276
190	200	2.757772	4.96284	14.09867	50.33638	64.48127	3.541266	3.029197	10.67449	73.67634	72.71498
200	210	4.503285	6.112806	15.08704	66.51219	64.48127	1.103766	7.898382	10.67449	76.242	44.2806
210	220	2.445272	5.698147	36.18295	17.17216	64.48326	3.774519	8.28191	29.98499	19.06018	65.81834
220	230	3.111538	4.18754	36.18295	30.65172	89.25352	2.799038	4.122716	29.98499	24.04152	112.3049
230	240	2.291266	8.998637	11.30318	126.5898	120.9884	2.746715	3.677744	25.22383	138.6477	155.8881
240	250	25.66146	15.7252	26.0185	100.4063	162.3152	2.766747	12.6627	4.946022	114.904	174.2292
250	260	2.353766	6.611127	18.74147	70.93029	86.36086	2.241025	12.6627	19.76073	114.904	97.76982
260	270	4.939583	2.053951	70.48866	85.91196	140.0275	2.32476	5.227384	22.56433	131.2889	137.5023
270	280	4.939583	1.720422	22.42879	67.56043	79.59617	2.957532	9.035341	21.40044	36.9466	86.37916
280	290	3.44976	10.04678	34.02276	116.9708	199.9866	1.753285	5.582247	26.40961	110.06	239.5336
290	300	1.107051	20.09642	60.61674	155.8056	49.75425	13.44167	24.17814	32.76833	219.6065	70.53053

جدول پ ۲-۷- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های اول و دوم و سوم (سیگنال اصلی، مؤلفه تقریب و مؤلفه جزئیات) - میانگین

Start Station(m)	Stop Station(m)	S (ave)	a_1 (ave)	a_2 (ave)	a_3 (ave)	a_4 (ave)	a_5 (ave)	d_1 (ave)	d_2 (ave)	d_3 (ave)	d_4 (ave)	d_5 (ave)
0	10	136.16	136.1375	136.1359	136.1334	136.0447	135.6752	0.022533	0.001599	0.002423	0.088726	0.369499
10	20	97.48	97.45805	97.47939	97.53083	97.46395	97.5567	0.021953	-0.02134	-0.05144	0.066876	-0.09275
20	30	190.56	190.5883	190.5643	190.5191	190.7053	190.6042	-0.02833	0.024023	0.045155	-0.1862	0.101158
30	40	107.81	107.8042	107.8224	107.8574	107.8164	107.9482	0.005792	-0.01823	-0.035	0.041015	-0.1318
40	50	41.99	41.97045	41.99727	41.95816	41.91975	42.08782	0.019551	-0.02682	0.039111	0.038414	-0.16807
50	60	131.45	131.4867	131.4214	131.4957	131.4446	131.48	-0.03675	0.065365	-0.07428	0.051042	-0.03536
60	70	21.98	21.98301	22.04273	21.95914	21.73577	21.4033	-0.00301	-0.05971	0.083584	0.223368	0.33248
70	80	-326.06	-326.055	-326.09	-326.054	-325.717	-325.868	-0.00479	0.034737	-0.03563	-0.33774	0.151031
80	90	-403	-403.017	-403.028	-403.028	-402.996	-402.041	0.016585	0.01123	-0.00029	-0.03173	-0.95527
90	100	-234.61	-234.606	-234.595	-234.636	-234.795	-236.014	-0.00387	-0.01081	0.040943	0.158804	1.218819
100	110	-84.71	-84.6909	-84.7569	-84.7339	-85.1793	-84.7683	-0.01912	0.066014	-0.02295	0.445316	-0.41098
110	120	72.38	72.35872	72.40508	72.34564	73.04606	73.21863	0.021283	-0.04636	0.059442	-0.70042	-0.17258
120	130	155.54	155.5558	155.5806	155.6695	155.516	155.4469	-0.01579	-0.0248	-0.08892	0.153469	0.069146
130	140	120.71	120.7118	120.6999	120.6817	120.6848	121.0648	-0.00183	0.01194	0.018166	-0.00305	-0.38006
140	150	117.75	117.7292	117.7376	117.7319	117.2781	116.0278	0.020825	-0.00842	0.005643	0.453802	1.250363
150	160	107.58	107.5974	107.6409	107.6651	107.8435	110.0536	-0.01744	-0.04344	-0.02425	-0.17841	-2.21008
160	170	108.74	108.756	108.7056	108.6767	108.8045	107.6821	-0.016	0.050439	0.028878	-0.12785	1.122421
170	180	197.81	197.7903	197.7721	197.7842	197.9585	197.4846	0.019665	0.018267	-0.0121	-0.17435	0.473922
180	190	169.78	169.7927	169.801	169.7705	170.0023	170.1372	-0.01275	-0.00822	0.030457	-0.23181	-0.13492
190	200	169.92	169.8967	169.9004	170.0091	169.7127	169.3755	0.023325	-0.00369	-0.10876	0.296382	0.33723
200	210	-38.19	-38.1911	-38.1175	-38.2244	-38.327	-37.4347	0.001071	-0.07357	0.106911	0.102608	-0.89229
210	220	-252.02	-252.004	-252.049	-251.887	-251.839	-251.84	-0.01552	0.044273	-0.1614	-0.04786	0.000337
220	230	-215.46	-215.475	-215.514	-215.653	-215.571	-216.226	0.014788	0.039631	0.138247	-0.08138	0.654348
230	240	33.7	33.72256	33.83479	33.79783	33.7685	34.40409	-0.02256	-0.11223	0.036964	0.029324	-0.63559
240	250	-55.06	-55.0769	-55.1751	-55.183	-55.1657	-56.2099	0.016887	0.098228	0.007896	-0.01736	1.044243
250	260	-516.66	-516.654	-516.619	-516.506	-516.635	-516.137	-0.00592	-0.03486	-0.11321	0.128829	-0.49769
260	270	-555.08	-555.075	-555.092	-555.142	-555.887	-555.889	-0.005	0.016851	0.050074	0.745517	0.001425
270	280	-40.63	-40.6432	-40.6692	-40.7188	-40.2543	-40.4827	0.01317	0.026016	0.049569	-0.46447	0.22845
280	290	390.41	390.4205	390.4646	390.4664	390.696	389.0716	-0.01046	-0.04412	-0.00183	-0.22958	1.624433
290	300	458.52	458.5142	458.5309	458.5291	458.6752	461.1237	0.005825	-0.0167	0.001721	-0.14606	-2.44849

جدول پ ۲-۸- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های چهارم و پنجم (مشخصه ارتفاعی و شیب مؤلفه جزئیات) - میانگین

Start Station(m)	Stop Station(m)	Hd_1 (ave)	Hd_2 (ave)	Hd_3 (ave)	Hd_4 (ave)	Hd_5 (ave)	Sd_1 (ave)	Sd_2 (ave)	Sd_3 (ave)	Sd_4 (ave)	Sd_5 (ave)
0	10	-0.13448	-0.03373	-0.21958	-0.56391	1.087329	-0.05773	0.008155	-0.00935	0.002772	0.020037
10	20	0.448981	-0.05505	-0.32828	3.273765	2.235093	-0.05961	-0.01994	0.00011	0.08226	0.013931
20	30	0.051507	0.093978	0.066402	-0.50392	1.408083	0.078558	0.020533	0.007397	-0.08368	-0.07373
30	40	-0.40082	0.29388	0.396671	1.482941	-1.79387	-0.02665	-0.01566	-0.00207	0.032193	0.047053
40	50	-0.10232	-0.37373	-0.2073	-0.22361	-0.77947	-0.0444	-0.00642	0.018085	-0.00901	-0.02067
50	60	-0.04397	0.410878	-0.06953	0.330826	2.236131	0.101994	0.024579	0.000636	-0.00951	0.011296
60	70	-0.10547	-0.42715	0.225068	-0.02302	-0.03543	0.000224	-0.02109	-0.0394	0.015412	-0.01218
70	80	0.253346	0.106439	0.145031	-0.62384	0.282429	0.01058	0.018512	0.018326	0.012186	0.008901
80	90	-0.44646	0.369518	1.193914	1.102534	3.960684	-0.03892	0.003172	-0.00498	0.003954	0.104717
90	100	-0.21114	-0.34305	0.174746	1.428672	5.515029	0.00413	-0.00478	0.014655	-0.06998	-0.21836
100	110	0.387769	0.808588	1.147446	3.064914	0.637488	0.047623	0.005255	0.005532	0.088526	0.277553
110	120	0.153891	-0.4519	0.075703	0.929357	-2.29595	-0.055	-0.00484	-0.02395	-0.00119	-0.16542
120	130	0.159686	-0.17559	1.100668	1.392936	0.624005	0.040245	-0.00544	0.069158	-0.04207	0.017707
130	140	0.037345	-0.3072	-0.16161	-0.34713	1.560131	0.008705	0.002029	-0.05015	-0.05922	-0.00577
140	150	-0.48546	-0.59247	-0.19994	2.595646	-4.15075	-0.05369	-0.00171	-0.00136	0.094088	-0.02758
150	160	-0.02304	0.295999	1.029686	-1.07806	5.969953	0.052797	-0.00562	0.007452	-0.07413	0.066093
160	170	-0.39902	-0.4171	0.073031	2.368435	3.114108	0.024981	0.010677	-0.02937	0.055271	-0.05932
170	180	-0.46772	0.36361	0.399134	-0.93275	1.911783	-0.04121	0.002873	0.027919	-0.07726	0.004638
180	190	0.427849	-0.48491	0.229702	0.076422	-2.71933	0.026585	-0.00699	-0.05077	0.021144	0.039052
190	200	0.315865	0.529119	0.550407	2.456226	-1.70827	-0.05592	0.009351	0.059556	-0.00641	0.074895
200	210	0.246986	-0.02452	-0.22563	-0.21619	-2.32641	-0.0032	-0.01982	-0.02583	0.015348	-0.13838
210	220	-0.05277	-0.49517	0.096611	0.164027	-0.81306	0.026815	0.017668	-0.02112	0.00513	0.11156
220	230	-0.18089	-0.12976	0.128673	0.747655	-1.11113	-0.02332	0.009774	0.034016	0.013891	-0.07509
230	240	0.023556	0.70901	-0.01267	0.030665	-2.99321	0.05125	-0.03268	-0.01508	-0.00352	-0.21539
240	250	-0.43464	0.228578	0.634085	0.522645	3.98398	-0.03961	0.014384	-0.03324	0.093019	0.298184
250	260	0.363403	-0.28868	-0.23761	1.295346	-0.04534	0.017398	-0.00547	0.055023	-0.04278	-0.01841
260	270	-0.16665	-0.25324	2.194631	0.784117	-0.6336	0.009833	0.002842	-0.03706	0.040524	-0.04451
270	280	-0.17868	-0.12823	-0.23	-2.27176	3.596797	-0.03474	0.001822	0.016913	-0.12007	0.117212
280	290	-0.16052	-0.43761	1.124391	-0.15396	7.707465	0.027545	0.006176	-0.06547	-0.04982	0.080162
290	300	0.017958	1.371685	0.00806	-0.32763	-6.28008	-0.01186	-0.0091	0.06991	0.041759	-0.21059

جدول پ ۲-۹- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های ششم و هفتم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات برای ۲ و ۳ واحد طول) - میانگین

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_2d_1 (ave)	A_2d_2 (ave)	A_2d_3 (ave)	A_2d_4 (ave)	A_2d_5 (ave)	A_3d_1 (ave)	A_3d_2 (ave)	A_3d_3 (ave)	A_3d_4 (ave)	A_3d_5 (ave)
0	10	-0.01267	0.011967	-0.00557	0.18273	0.751655	0.081585	0.023795	-0.00967	0.277279	1.125547
10	20	-0.0157	-0.06218	-0.10175	0.214203	-0.16822	-0.05656	-0.09788	-0.1512	0.32406	-0.25366
20	30	0.021908	0.068636	0.097753	-0.43516	0.13261	-0.01478	0.107136	0.147024	-0.64951	0.201806
30	40	-0.01507	-0.05462	-0.06233	0.096179	-0.22471	-0.44114	-0.087	-0.09033	0.139514	-0.33481
40	50	-0.00529	-0.04991	0.086556	0.062859	-0.33423	0.257697	-0.05943	0.124759	0.089823	-0.49986
50	60	0.028496	0.138202	-0.14086	0.094045	-0.07381	-0.24413	0.182154	-0.19997	0.140245	-0.11413
60	70	-0.0058	-0.12443	0.119385	0.452706	0.655002	0.179306	-0.1623	0.168974	0.674579	0.981332
70	80	0.001005	0.076035	-0.05218	-0.64887	0.308535	0.542099	0.102638	-0.07854	-0.962	0.462508
80	90	-0.00575	0.022927	-0.00162	-0.0619	-1.80879	-0.54632	0.029457	-0.00025	-0.09058	-2.70724
90	100	-0.00362	-0.02238	0.09315	0.239506	2.227085	0.08634	-0.02906	0.138144	0.34613	3.333982
100	110	0.009387	0.122201	-0.04012	0.927681	-0.55212	0.295335	0.144834	-0.05921	1.375506	-0.82092
110	120	-0.01243	-0.07472	0.09454	-1.3346	-0.51839	0.312655	-0.07672	0.133836	-1.97047	-0.78215
120	130	0.00866	-0.06234	-0.11027	0.258955	0.1617	0.188325	-0.09143	-0.14849	0.380299	0.239984
130	140	0.005045	0.033649	-0.01105	-0.07365	-0.73731	0.06875	0.052203	-0.02419	-0.11743	-1.09879
140	150	-0.01204	-0.02485	0.011279	0.961451	2.424967	0.21366	-0.03935	0.017239	1.431235	3.626658
150	160	0.011552	-0.08504	-0.0558	-0.36348	-4.29573	-0.12455	-0.10573	-0.085	-0.53183	-6.43101
160	170	-0.00067	0.101889	0.040642	-0.25572	2.18568	-0.11359	0.129852	0.056258	-0.39116	3.280918
170	180	-0.00188	0.043752	0.003871	-0.40586	0.918511	0.344486	0.062457	0.012592	-0.59731	1.369533
180	190	0.001095	-0.03056	0.005963	-0.42797	-0.2302	0.026029	-0.05258	-0.0037	-0.637	-0.34689
190	200	-0.00926	0.000247	-0.14775	0.583799	0.749936	0.800556	0.007848	-0.20075	0.865536	1.127064
200	210	-0.00106	-0.14502	0.178057	0.216547	-1.90002	0.383481	-0.18129	0.251314	0.326988	-2.84226
210	220	0.014812	0.097166	-0.34029	-0.08812	0.097625	0.102704	0.131393	-0.50622	-0.13223	0.150711
220	230	-0.01279	0.071457	0.316229	-0.14023	1.223509	0.30433	0.082658	0.479608	-0.20449	1.82029
230	240	0.006136	-0.22541	0.053239	0.047677	-1.49587	0.169796	-0.28598	0.070363	0.067217	-2.25518
240	250	-0.00583	0.185329	-0.01656	0.038624	2.348449	-0.16174	0.223385	-0.02915	0.038945	3.515753
250	260	0.005568	-0.0682	-0.18971	0.237525	-0.96752	-0.34882	-0.08474	-0.27342	0.378321	-1.43123
260	270	-0.00017	0.038646	0.110809	1.444995	-0.03871	-0.789	0.053758	0.183965	2.131236	-0.05949
270	280	-0.0084	0.04369	0.083936	-0.9304	0.572828	-0.03632	0.047012	0.101567	-1.36568	0.864879
280	290	0.00663	-0.09131	-0.06545	-0.53274	3.199882	0.11116	-0.1185	-0.10085	-0.78829	4.759729
290	300	0.002933	-0.01961	0.069863	-0.269	-4.97391	-0.35603	-0.01118	0.108738	-0.41765	-7.42093

جدول پ ۲-۱۰- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های هشتم و نهم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات یرای ۴ و ۶ واحد طول) - میانگین

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_4d_1 (ave)	A_4d_2 (ave)	A_4d_3 (ave)	A_4d_4 (ave)	A_4d_5 (ave)	A_6d_1 (ave)	A_6d_2 (ave)	A_6d_3 (ave)	A_6d_4 (ave)	A_6d_5 (ave)
0	10	0.464889	0.051038	-0.04819	0.470362	1.430836	-0.03331	-0.48538	0.051995	0.568784	2.246476
10	20	0.638397	0.089054	-0.15122	0.43367	-0.45607	-1.01398	0.051111	-0.14829	0.331118	-0.37373
20	30	0.106466	0.191462	-0.04101	-0.78894	0.455088	-0.36764	-0.10895	0.322465	-1.17681	0.28495
30	40	0.785331	-0.50191	-0.14206	0.280562	-0.16541	-0.83726	-0.71246	0.002128	0.747752	-0.78462
40	50	0.319135	-0.07931	0.258507	0.052583	-0.58432	-0.70211	-0.12296	0.336917	0.067579	-0.96142
50	60	0.832012	0.334062	-0.35504	0.138789	-0.09031	0.130922	0.442457	-0.42632	0.067863	-0.29577
60	70	0.453435	-0.3115	0.621422	0.567695	1.382379	-0.46838	-1.88983	0.472438	1.608753	2.06383
70	80	-0.44831	0.607955	0.050049	-1.13907	0.487328	-0.52255	-0.74593	0.233346	-1.78533	0.917954
80	90	-0.62302	-0.26958	0.270655	-0.25465	-3.79038	-0.13298	0.720635	0.070528	-0.20989	-5.17634
90	100	-0.50686	-0.2079	0.342014	0.662481	4.342423	-0.17841	0.264335	-0.01771	0.861924	6.458058
100	110	-0.70459	-0.44628	0.14681	1.472173	-0.95024	-0.02907	0.233594	-0.41664	2.673869	-1.4447
110	120	-0.63652	-0.11582	0.135957	-2.16022	-1.10758	-0.25489	-1.92156	0.359223	-3.84939	-1.44924
120	130	-0.07992	-0.12694	-0.39938	0.67461	0.234982	0.225465	0.734742	-0.30826	0.597622	0.505862
130	140	0.283945	0.31254	-0.11885	-0.21987	-1.3903	-0.18097	0.395672	-0.15513	-0.08937	-2.25768
140	150	-0.67588	0.204552	-0.12494	1.866172	4.835261	-0.65356	-0.04834	-0.07338	2.904647	7.3142
150	160	0.761016	-0.55672	0.172249	-0.80805	-8.49125	0.537768	-0.28588	-0.22145	-1.26408	-13.173
160	170	-0.39652	0.094664	-0.12364	-0.73814	4.648406	0.260929	0.667577	-0.01144	-0.96484	6.657576
170	180	0.303718	0.275929	-0.08675	-0.47478	1.78859	-0.37974	0.475677	-0.01798	-0.77685	2.713563
180	190	-0.9783	0.241459	-0.15015	-0.73624	-0.38329	0.376779	-0.36216	-0.05037	-1.28948	-0.57704
190	200	0.454222	-0.10026	0.109471	0.914096	1.557058	-0.39698	-0.06932	-0.21976	1.797294	2.268947
200	210	-0.24248	-0.1112	0.347999	0.294496	-3.76781	-0.68659	-0.84876	0.853265	1.082749	-5.71665
210	220	0.58722	0.609024	-0.63962	-0.22737	0.122134	0.922308	0.040931	-0.9506	-0.4209	0.322489
220	230	-0.36288	0.068035	0.810907	-0.34282	2.476577	-0.14708	1.036322	1.405419	-0.24711	3.416719
230	240	0.421432	-0.47258	0.011426	-0.12626	-2.81914	-0.24698	-0.63374	0.224793	0.103023	-4.26597
240	250	-0.28455	0.442395	0.164807	0.133127	4.291817	1.954696	0.545462	-0.92309	0.004552	6.873316
250	260	0.544393	-0.09321	-0.24832	0.918839	-1.76568	-0.06667	-0.60044	-0.18575	0.570865	-2.98075
260	270	-0.30913	0.294827	-0.23434	3.077788	-0.19352	-0.53059	-0.46221	0.043478	4.384474	-0.03878
270	280	0.301203	-0.03888	0.288413	-1.60919	1.076507	-0.21796	0.159965	0.149356	-2.88735	1.645041
280	290	-0.20841	-0.15918	-0.30236	-0.73597	5.924093	0.744916	0.206933	-0.49957	-1.28493	9.319961
290	300	0.209956	-0.7972	0.335762	-0.85324	-9.9303	1.037873	1.091143	-0.1186	-0.89768	-14.6883

جدول پ ۲-۱۱- نمونه‌ای ۳۰۰ متری از شاخص‌های هشتم و نهم (مشخصه ارتفاع میانگین مؤلفه جزئیات برای ۸ و ۱۰ واحد طول) - میانگین

Start Station(m)	Stop Station(m)	A_8d_1 (ave)	A_8d_2 (ave)	A_8d_3 (ave)	A_8d_4 (ave)	A_8d_5 (ave)	$A_{10}d_1$ (ave)	$A_{10}d_2$ (ave)	$A_{10}d_3$ (ave)	$A_{10}d_4$ (ave)	$A_{10}d_5$ (ave)
0	10	-0.05853	-0.29788	-0.05381	0.86569	2.887813	0.235112	-1.10113	0.013207	1.186347	3.678856
10	20	-0.42057	0.371413	-0.2517	0.81577	-0.9241	0.438379	-0.72751	0.792112	0.199242	-0.74372
20	30	-0.61223	0.28806	0.216313	-1.34816	1.186223	-0.3084	0.279588	0.565987	-0.54753	0.721138
30	40	0.51441	-0.21613	0.420891	-0.04577	-1.41641	0.380998	-0.29417	-0.81805	-0.42275	-0.20862
40	50	-0.74081	0.040832	0.10694	0.32297	-1.23991	0.171366	-0.17971	-0.33492	0.23445	-1.76879
50	60	-0.64307	-0.1964	0.484737	0.359663	-0.38073	1.062583	0.487083	0.53479	0.140745	-0.79109
60	70	0.644595	-0.1887	0.025687	1.912796	2.437583	0.415155	0.094565	0.672483	1.66203	3.432654
70	80	0.234231	-0.4136	-1.64039	-2.56201	1.560646	-0.75637	2.141192	-1.36578	-2.17634	1.750341
80	90	0.027832	0.715752	-0.39784	0.216612	-6.9137	-0.01613	-0.13431	0.771217	-0.7299	-8.97843
90	100	-0.27747	-0.64769	0.520702	0.122094	8.288114	-0.88398	-0.04067	1.0585	1.567557	10.34691
100	110	-0.59502	-0.60077	-0.0303	3.309362	-2.31263	-0.31173	0.701852	0.677722	2.122851	-2.45213
110	120	1.430761	-0.00071	0.67312	-4.92493	-1.95308	-1.10377	-0.32701	-1.36373	-4.61463	-2.11328
120	130	0.12498	0.365205	0.489932	1.182554	0.109728	-0.28083	0.293182	-0.63251	1.798658	-0.13461
130	140	0.113875	-0.87428	0.14153	-0.42925	-3.05675	0.505069	-0.85774	-0.49188	-0.5839	-2.80508
140	150	-0.61466	-0.69345	0.136704	3.002335	8.898534	-0.73673	0.773697	0.280755	2.963314	10.36015
150	160	1.193196	0.081813	-0.39238	-0.96603	-16.27	0.264444	-0.64248	0.425965	-0.30002	-20.0886
160	170	0.111312	1.191718	-0.98639	-0.54205	8.93031	-1.1442	0.428511	-1.13237	-1.49392	10.88064
170	180	-1.85542	-0.21837	0.546394	-0.3835	3.106287	0.090619	0.920155	-0.14211	-1.58959	4.05243
180	190	-0.05431	1.067548	-0.3774	-1.85948	-1.11732	-1.15394	0.298681	0.448737	-1.47112	-1.40703
190	200	-0.70737	-0.33017	0.112565	1.924171	2.929124	0.300353	-0.16881	-0.11973	2.759705	3.247346
200	210	-0.04055	-0.33244	0.120225	1.186589	-7.69355	-0.9737	0.569371	0.546819	0.416322	-7.81907
210	220	-1.04835	0.092513	-0.30712	-0.06765	1.181126	0.121236	0.293437	0.630644	-0.14799	0.981592
220	230	-0.44511	0.543861	1.087923	-0.52804	4.399378	-0.85859	-0.13141	1.329836	-0.37702	4.696321
230	240	-0.0892	-0.52956	-0.52154	-0.17505	-6.66241	0.232132	-0.95734	-0.69421	-0.6393	-6.14814
240	250	2.067709	1.684111	-2.47102	-0.25805	8.861415	-3.10475	0.499398	-3.5406	-0.89891	9.539164
250	260	-0.07358	0.802041	-0.30102	1.007953	-3.55892	0.423524	0.575608	0.449964	2.927287	-2.70962
260	270	1.024871	-1.00613	0.956795	3.66821	-0.20705	-0.02994	0.432758	1.566859	6.866031	-0.76934
270	280	-0.063	-1.22373	-1.0702	-1.39588	2.592169	-0.09031	1.005753	0.723149	-4.68276	2.206208
280	290	-0.71583	-0.13403	0.807209	-2.00687	10.93657	-0.6529	-0.75785	0.484028	-0.80927	13.31296
290	300	-1.13959	-0.87455	0.604431	-1.46604	-18.3872	1.234066	2.299928	0.463035	-1.86962	-21.6847

Abstract:

Roughness is a major index in order to achieve ride comfort and road safety. For a driver, driving on rough roads means lack of comfort, the slowdown and possible damage to the vehicle. One of the reasons for the creation of roughness are cracks and potholes.

RSP is one of the profilometer which gives the longitudinal profile of roadway. This simple profile can be filtered with the various methods to achieve various goals. The method which is used in this study is wavelet analysis.

This research at the first, studied the principles and concepts of roughness introduced different equipments in order to measure roughness; then introduced filtration methods and how to filter roughness data by one of these methods (wavelet analysis). In conventional methods, noises are removing from the original signal and no analysis has been done on it. Part of these noises are caused by cracks in the road surface; therefore, in this study these noises have been used to detect a variety of cracks. In the following set of new parameters will be presented so that they can make a logical relationship with cracks and potholes in each part of pavement. These parameters are as follows: the original signal, the approximation component and the details component, the slope characteristic of details component, the hight characteristic of details component, the average hight characteristic of details component for 6 different interval length (2, 3, 4, 6, 8 and 10 units of length).

At the end, the resuts showed that the model which is presented in this study can recognize the transverse cracks, block cracks and alligator cracks; but this model dosen't have an ability to detect pothols and longitudinal cracks.

Keywords: Roughness, Wavelet analysis, Filtration, Crack, Pothole, Crack index



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering

**Analysis of RSP roughness noise for detecting pavement cracks and
potholes**

By:

Mahdi Fazeli Nia

Adviser:

Dr. Abbas Mohammadi

Supervisor:

Dr. Hossein Ghasemzadeh Tehrani

January 2016