

تخمین مشخصات سیستم های روسازی بتنی با استفاده از روش تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی

حسین رهنما^{۱*}، رضا بهمن بیجاری^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

تخمین خصوصیات مکانیکی لایه های روسازی یکی از چالش های روز مهندسی جهت بررسی سطح عملکرد سیستم روسازی برای طراحی و تدوین یک طرح بهسازی راه می باشد. روش امواج سطحی یکی از آزمایشات غیر مخرب برای تخمین خصوصیات مکانیکی سیستم های لایه بندی روسازی می باشد. روش ضربات چندگانه امواج سطحی یکی از روش های متعارف این زمینه می باشد. در این روش با ثبت داده های امواج سطحی ناشی از اعمال ضربه در فواصل متوالی از گیرنده شروع می شود و با تحلیل در حوزه فرکانس داده های ثبت شده منحنی پراکنشی ترسیم نمود سپس با یک تحلیل برگردان سرعت موج برشی لایه های روسازی نسبت به عمق پیدا می شود که متعاقب آن با استفاده از روابط مشخص خصوصیات مکانیکی سیستم لایه بندی بدست می آید. در این پژوهش انتشار امواج سطحی جهت تعیین مشخصات روسازی ها و بویژه روسازی های آسفالتی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS شبیه سازی شد تا سیگنال های دریافتی از اثر بارگذاری در نقاط مشخص محاسبه شود. در این مقاله از یک روش پیشنهادی جهت تخمین خصوصیات لایه ها استفاده می شود. در این روش به تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی (MASW) استفاده می شود. به این صورت که گیرنده هایی در فواصل مشخص از یکدیگر قرار می گیرند و ضربه ای در فاصله مشخصی از اولین گیرنده اعمال می شود و داده ها توسط شتاب نگار یا سرعت نگار برداشت می شود و بعد از آن مانند روش ضربات چندگانه امواج سطحی با تحلیل در حوزه فرکانس مجموعه سیگنال می توان منحنی پراکنش را ترسیم نمود. نتایج گویای پتانسیل بالای این روش برای تعیین خصوصیات مکانیکی می باشد، چراکه این روش سریع تر و ارزان تر از روش ضربات چندگانه امواج سطحی (MISW) می باشد.

واژه های کلیدی: روسازی بتنی، شبیه سازی عددی، امواج سطحی، مدول یانگ، MASW.

۱- مقدمه

راه ها نقش مهمی در ایجاد ارتباط بین مراکز مهم جوامع ایفا می کند. شبکه راه های یک کشور جزء شریان های حیاتی حمل و نقل و توسعه اقتصادی آن می باشد. از طرفی کیفیت و مساحت نقشه راه ها یکی از شاخص های اصلی برای ارزیابی توسعه یک کشور می باشد چراکه نقش مهمی در امکان دسترسی دارد.

روسازی های انعطاف پذیر به علت وجود منابع نفتی، مصالح دانه ای مناسب و همچنین امکانات و تجهیزات کافی برای دستیابی به تکنولوژی های جدید به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. مقرون به صرفه بودن هزینه تعمیر و نگهداری، طول عمر بالا و در دسترس بودن مصالح از برتری این نوع روسازی در بین دیگر روش ها می باشد.

با توجه به بالا بودن هزینه تعمیر و نگهداری و همچنین ساخت یک روسازی استفاده بهینه و خدمت رسانی بی وقفه راه یکی از پیشبرد های مهم مدیران این حوزه می باشد. با پیشرفت علم، امکانات و دستیابی به تکنولوژی های جدید بهسازی نواحی آسیب دیده استفاده بهینه از منابع در اختیار مورد توجه مسئولین این حوزه قرار گرفته است. در همین راستا جهت ارائه یک طرح بهسازی مطلوب شناخت مصالح در حال خدمت یکی از چالش های مهم محققین می باشد. از سوی دیگر شناسایی خرابی های متداول امکان تخمین مشخصات سازه راه تعمیر و نگهداری را از لحاظ هزینه و زمان در حالت بهینه قرار می دهد. مدول الاستیسیته یکی از پارامتر های مهم در طراحی سیستم های روسازی با استفاده از نظریه الاستیسیته می باشد. از آنجا که لایه رویه روسازی در تماس مستقیم با ترافیک است لذا تمرکز تنش در این لایه رخ می دهد. این عامل باعث خرابی مصالح لایه روسازی شود که متعاقب آن سیستم روسازی دچار تخریب می شود. اصولاً وضعیت لایه سطحی روسازی یک شاخص مهم در تعیین عملکرد سازه ای روسازی می باشد (اخلاقی و همکاران، ۱۳۸۶).

روش های مختلف برای تخمین پارامتر های سازه ای روسازی در پروژه های گوناگون راهسازی به کار می رود که در دو رده کلی آزمایشات مخرب و آزمایشات غیر مخرب قرار می گیرند. در روش های مخرب قسمت هایی از روسازی نمونه گیری می شود تا به طور میانگین مشخصات اصلی سازه روسازی یا همان ضخامت، خواص مصالح لایه ها و برخی خرابی ها تشخیص داده می شود. در حالی که در روش های غیر مخرب نمونه گیری انجام نمی شود و بدون ایجاد خسارت مشخصات متعارف بدست می آید که امروزه از مورد توجه مهندسين مشاور قرار گرفته است چراکه هزینه پایین، سرعت انجام آزمایشات و تولید مشکلات ترافیکی محدود تر از روش های مخرب از مزایای این نوع از روش های ارزیابی علاوه بر عدم وارد کردن خسارت به سازه می باشد. در سال های اخیر روش های امواج لرزه ای در این بخش متداول گشته است. اساس این روش ها بر پایه انتشار امواج لرزه ای در محیط و دریافت امواج منتشر یافته می باشد که با تحلیل و پردازش اطلاعات دریافتی می توان به اهداف آزمایش رسید. از روش های متداول این نوع از آزمایش می توان به آزمایش اثرات انعکاس صدا می باشد. در این آزمایش از انتشار امواج طولی در محیط و دریافت سیگنال توسط گیرنده و تحلیل داده ها مشخصات مکانیکی بتن قابل تخمین می باشد (موری و همکاران، ۲۰۰۲). از معدود روش هایی که تاکنون از آن در این زمینه استفاده می شود، روش های امواج سطحی می باشد. سرعت بالا و هزینه پایین این نوع از روش های غیر مخرب مورد توجه محققین قرار گرفته است. اساس روش های امواج لرزه ای در پراکنش انرژی در طیف سرعت فازی نسبت به فرکانس می باشد. امواج رایلی با فرکانس های بالا در لایه فوقانی منتشر می شوند در حالی که فرکانس های پایین در عمق مواد نفوذ می کنند. امواج با طول موج های مختلف با سرعت های فازی مختلف توسط خصوصیات مکانیکی مصالح تحت تأثیر قرار می گیرند. تغییرات سرعت فازی نسبت به فرکانس یا طول موج در منحنی های پراکنش برای تعیین پروفیل سختی نسبت به عمق مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج حاصل از این آزمایش در تعیین مدول الاستیسیته سازه لایه بندی مؤثر واقع شده است. استفاده از امواج سطحی برای اندازه گیری خصوصیات کشسانی و ضخامت جاده اولین بار در روش دو گیرنده به نام SASW در دانشگاه آستین تکزاس (۱۹۸۰) توسعه یافت (استوکی و همکاران، ۱۹۹۴، جونز، ۱۹۵۸، جونز، ۱۹۶۲). روش تست غیر مخرب SASW برای تعیین پروفیل سختی و ضخامت یک

سیستم لایه بندی مانند خاک و آسفالت استفاده می شود. روش SASW براساس تحلیل طیفی سیگنال های ثبت شده در دو گیرنده که توسط چشمه لرزه زا ایجاد می شود، برای تخمین خصوصیات کشسانی سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش از مود اصلی استفاده شده، از مود های بالاتر صرفه نظر می گردد. استفاده از روش تحلیل چند ایستگاهی امواج سطحی توسط الوردانی و همکاران (۲۰۰۷) توسعه یافت. در این روش می توان خصوصیات محیط در طول آرایه آزمایش را نسبت به عمق بدست آورد. دقت اندازه گیری شده برای مدول الاستیسیته بدست آمده از این روش و تست های مخرب انجام گرفته خوب می باشد (الوردانی و همکاران، ۲۰۰۷). در این شیوه از آزمایش که براساس پردازش داده های خروجی لرزه نگار در آرایه با طول مشخص می باشد، با استفاده از تحلیل در حوزه فرکانس می توان به نتایج دست یافت تا مشخصات داخلی محیط کشتان را بدست آورد.

۲- روش های تحلیل امواج سطحی

روش های امواج سطحی برای تخمین مدول الاستیسیته و ضخامت لایه ها در سیستم های چند لایه ای به کار می رود. در این آزمایش بدون وارد آمدن خسارت به سازه می توان با تحلیل سیگنال های دریافتی از گیرنده هایی با فواصل مشخص و فاصله تا چشمه لرزه زا در سطح زمین خصوصیات الاستیک لایه های روسازی را تخمین زد. در آزمایش میدانی امواج سطحی توسط ضربه یک چکش یا روش های دیگر تولید می شود. در گیرنده های سطح زمین که می توانند شتابنگار یا سرعت نگار باشند، مؤلفه قائم امواج تولید شده ثبت می شوند. پس از برداشت داده ها سیگنال های دریافتی در یک نمودار با توجه به فواصل گیرنده ها در سطح زمین قرار می گیرند و بعد به وسیله تبدیل سریع فوریه از حوزه زمان به حوزه فرکانس برده می شوند. با استفاده از پردازش سیگنال نواحی با انرژی بالا را تحلیل کرده و منحنی پراکنش مربوط به آن محیط را رسم می شود. این منحنی ها بیان گر تغییرات سرعت امواج سطحی بر حسب فرکانس می باشد. سپس با بهره گیری از روش های برگردان خواص لایه های سیستم تخمین زده می شود (اخلاقی و همکاران، ۱۹۹۵).

با توجه به اینکه در این مقاله از روش های اجزاء محدود برای انتشار امواج در محیط های ریاضی استفاده شده برخی از گام های توضیح داده شده در بالا دچار تغییر می شوند. برای این منظور از نرم افزار ABAQUS/EXPLICIT برای تحلیل دینامیکی انتشار امواج سطحی در محیط های مشخص استفاده گردیده است. برداشت داده نیز به این صورت است که در سطح مدل نقاطی انتخاب شده که در این نقاط تغییرات سرعت بر حسب گام زمانی تحلیل دینامیکی را برداشت می نماید. پس از برداشت داده ها در نقاط تعیین شده در فواصل مشخص ادامه تحلیل همانند آزمایش میدانی ادامه داده می شود.

مدل شامل هندسه و شرایط مرزی و ویژگی های بارگذاری می باشد. در مدلسازی قسمتی از روسازی راه که دارای خصوصیتی شبیه به شرایط واقعی مسئله دارند، شبیه سازی می شود. برای این مهم از المان های صلب استفاده گردیده است و نوع تحلیل دینامیکی Explicit بوده و زمان تحلیل ۰.۰۵ ثانیه و نرخ داده برداری ۰.۰۰۰۰۱۶۶۷ ثانیه در نظر گرفته شده است. المانی که برای تحلیل استفاده شده است، از نوع هشت نقطه ای ایزوپارامتریک از خانواده المان های تنش- کرنشی بوده و دارای خاصیت انتگرالگیری کاهشی است (C3D8R). به منظور کاهش ورود نوفه های ناشی از مدلسازی به داده ها از روش هایی برای میرایی امواج استفاده شد تا از نوفه های ناشی از برخورد امواج به لبه ها جلوگیری شود.

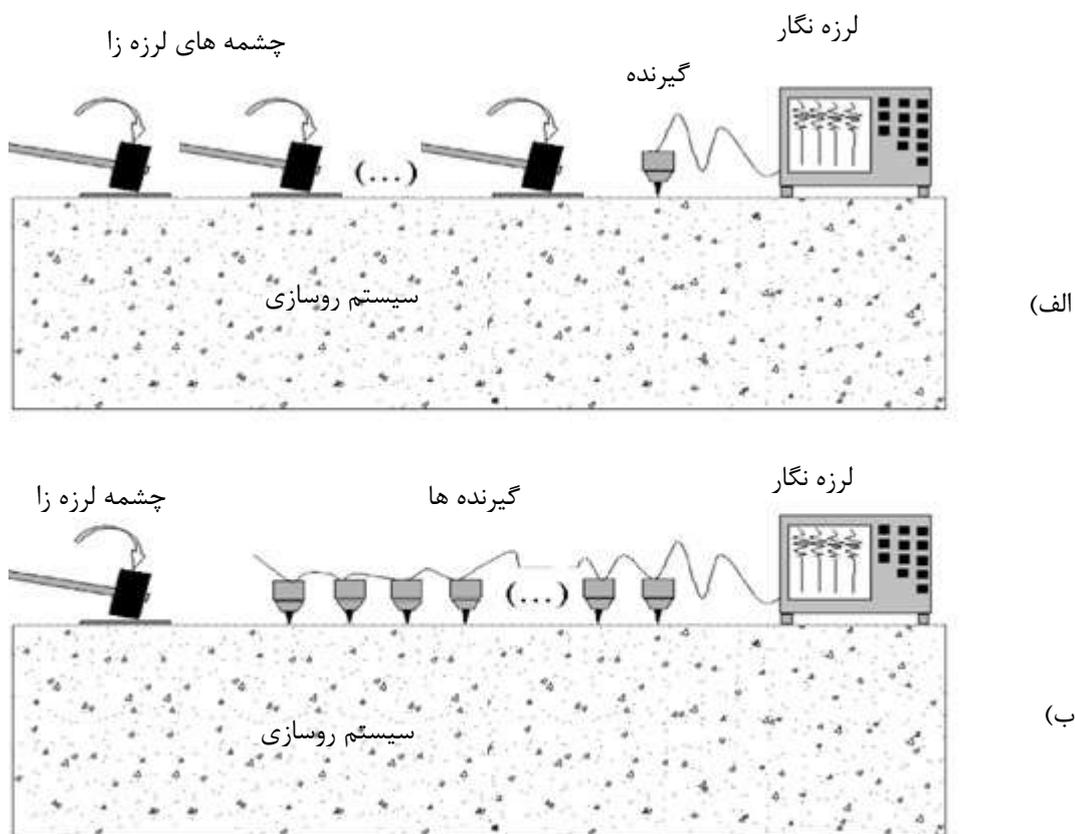
تحلیل برگردان منحنی های بدست آمده ناشی از انتشار امواج سطحی به محیط و برداشت داده ها از نقاط مشخص روندی است که طی آن منحنی پراکنش ناشی از تحلیل نظری و منحنی پراکنش ناشی از تحلیل آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه می شود و خطاهای ناشی از عدم همسانی حساب می شود و مرحله بعد با تغییر منحنی پراکنش نظری این مقایسه صورت می پذیرد و خطاهای ناشی از عدم همسانی منحنی ها محاسبه می شوند آنقدر این مرحله انجام می شود تا این اختلاف بین منحنی پراکنش نظری و منحنی پراکنش آزمایشگاهی کمینه شود. در طول این تحلیل منحنی پراکنش آزمایشگاهی که ناشی از انتشار امواج واقعی و دریافت اثر امواج توسط گیرنده ها و تحلیل سیگنال ها و ترسیم منحنی پراکنش و یا شبیه سازی برداشت داده و ترسیم منحنی پراکنش می باشد، هیچ گونه تغییری نخواهد کرد. از طرفی منحنی پراکنش نظری که از حل

معادلات ریاضی انتشار امواج بدست می آید. در حل این معادلات خصوصیات محیط باید کاملاً وارد شود لذا برای انجام تحلیل برگردان منحنی نظری قابل تغییر است چراکه با تغییر مشخصات محیط این منحنی نیز دستخوش تغییر است (برنولی، ۱۹۶۰). پس از بدست آوردن پروفیل سرعت موج برشی نسبت به عمق به راحتی می توان مدول ارتجاعی محیط رامحاسبه نمود. با بکار گیری روابط نظریه الاستیسیته، مدول یانگ را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$E = 2G(1+\nu)$$

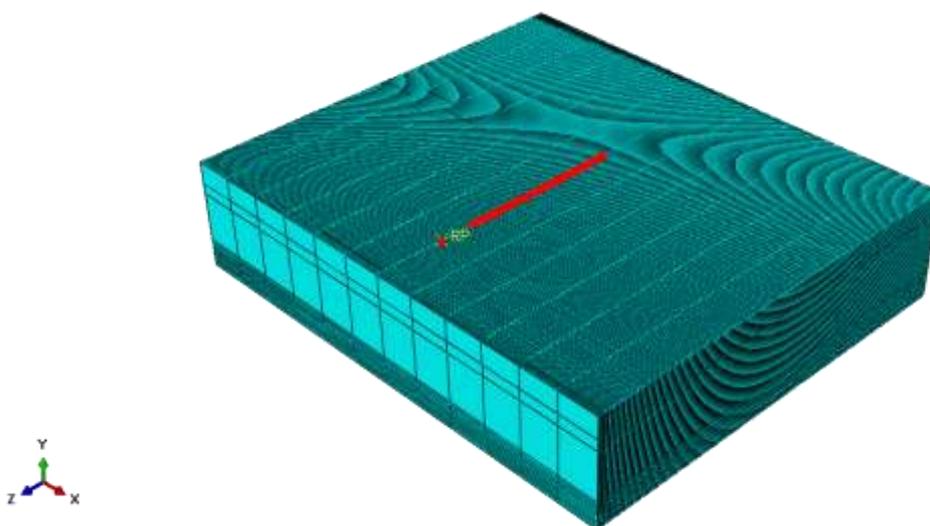
که در روابط فوق E مدول یانگ، G مدول برشی، ρ چگالی مصالح و V_s ضریب پواسون مصالح می باشند. برای انجام تحلیل برگردان از نرم افزار Geopsy استفاده گردید. در این مرحله تحلیل با وارد کردن منحنی پراکنش به نرم افزار شروع می شود. در گام تحلیل نرم افزار منحنی پراکنش نظری را آنقدر تغییر می دهد تا خطای برهم نهی منحنی پراکنش آزمایشگاهی و منحنی پراکنش نظری کمینه شود. با توجه به اینکه بکارگیری روش های امواج سطحی متنوع است، این مقاله روشی را برای داده برداری پیشنهاد می دهد که نتایج این روش با روشی که در تعیین لایه بندی و تعیین خصوصیات مصالح بکار می رود هم پوشانی خوبی دارد. علاوه بر همسان بودن روش انجام تحلیل ولی روش پیشنهادی دارای سرعت بیشتری در ارزیابی کل منطقه می باشد. روشی که قبلاً از آن به عنوان روشی برای تعیین لایه بندی و خصوصیات مصالح کاربرد داشت، روش ضربات چندگانه امواج سطحی (MISW) می باشد. در این روش با نصب یک یا چند گیرنده در محل مشخص و اعمال ضربه در چند نقطه و ثبت داده های امواج منتشر شده و در نهایت با چسباندن سیگنال ها در کنار هم مجموعه داده ها برداشت می شوند. روش پیشنهادی برای انجام تحلیل این گونه است که با انتخاب تعداد کل سیگنال ها در فواصل مشخص و فاصله از چشمه لرزه زا با انجام یک ضربه کل داده ها را برداشت نماییم و تحلیل سیگنال را ادامه دهیم. نتایج این روش گویای این مسئله است که با این روش می توان سرعت کار را افزایش داد در حالی که دقت نیز کاهش نخواهد یافت. شکل ۱ نشان دهنده شمای آزمایش در دو روش MASW و MISW می باشد.



شکل ۱- شمای از آزمایش امواج سطحی بر روی یک سیستم روسازی (الف) روش ضربات چند گانه امواج سطحی. (ب) روش چند ایستگاهی امواج لرزه ای.

۳- مدلسازی نمونه های آزمایش

یک نمونه از روسازی با ابعاد و خصوصیات مشخص برای اثبات فرض مسئله انتخاب گردید. شکل کلی مدل ساخته شده در نرم افزار به صورت شکل ۲ بیان می شود. جزئیات مشخصات نمونه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- شکل کلی مدل نمونه سیستم روسازی به همراه نقاط مشخص شده جهت ثبت داده و نقطه اعمال ضربه.

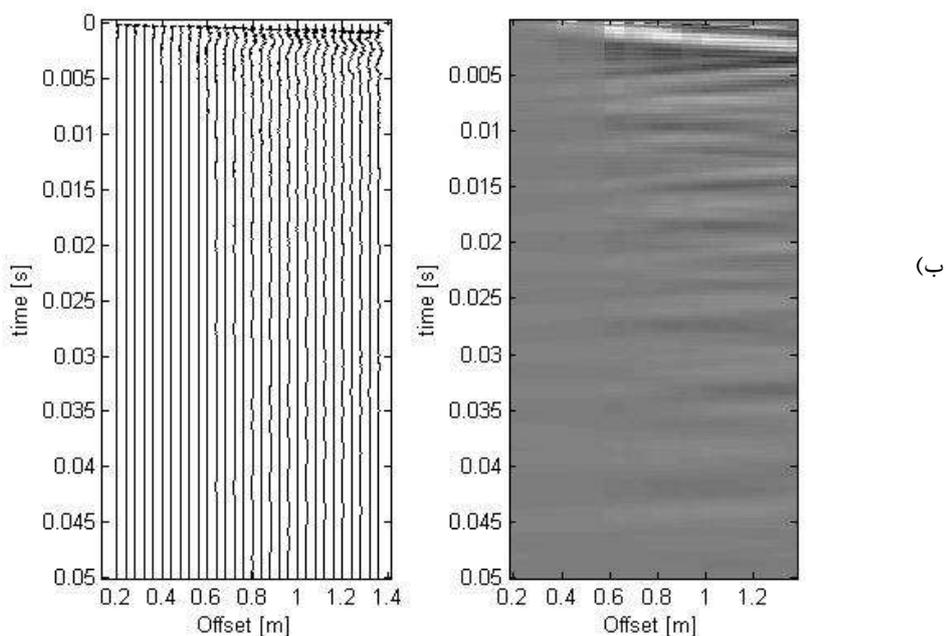
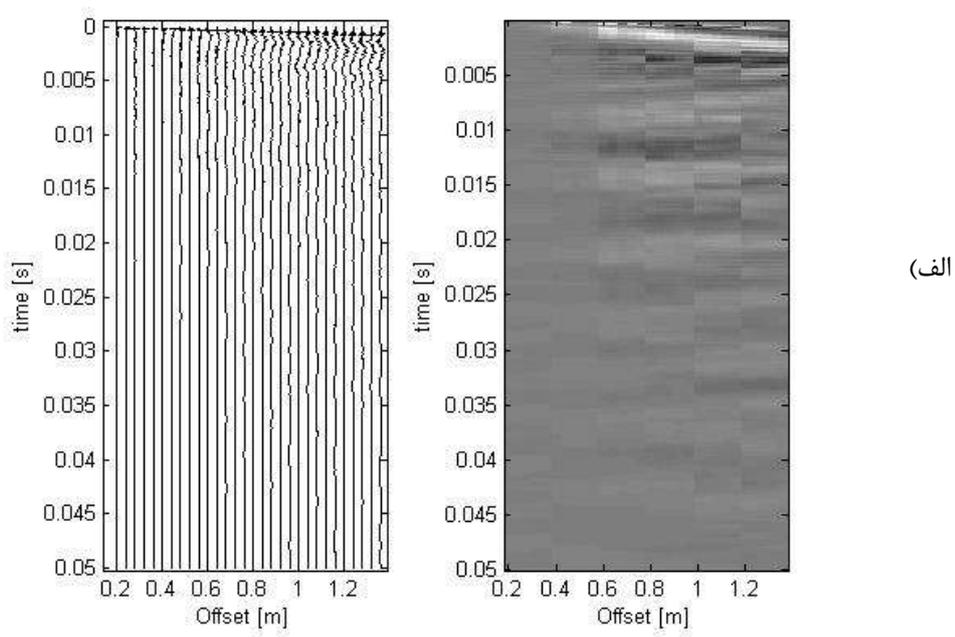
جدول ۱- مشخصات لایه آسفالتی مورد استفاده در تحلیل نرم افزار

مصلح	رویه بتنی	اساس	زیر اساس	خاک طبیعی
ضخامت (cm)	16	8	36	20
مدول یانگ (Mpa)	30000	3000	400	187.2
ضریب پواسون	0.2	0.3	0.3	0.4
چگالی (kg/m^2)	2490	1930	1800	1800
ابعاد نمونه (m)	3.5*3*0.8			

برای انجام این آزمایش یک تحلیل برای روش MASW و شش تحلیل برای روش MISW صورت پذیرفت. در روش MASW از ۳۰ نقطه با فاصله ۴ سانتی متر از هم و فاصله اولین نقطه گیرنده تا نقطه اعمال بارگذاری ۲۰ سانتی متر جهت برداشت داده بکار گرفته شد. نرخ داده برداری و زمان تحلیل مطابق آنچه گفته شد، می باشد. در روش MISW از ۵ نقطه با فاصله ۴ سانتی متر از هم و فاصله اولین نقطه گیرنده تا نقطه اعمال بارگذاری ۲۰ سانتی متر جهت برداشت داده در تحلیل اول استفاده شد. در تحلیل های بعدی چشمه لرزه زا در فاصله ۲۰ سانتی متری از محل قبلی اعمال بارگذاری بطوری که از اولین نقطه گیرنده دورتر می شود، قرار می گرفت. پس از انجام شش تحلیل داده ها در کنار هم چسبیده شدند ۳۰ سیگنال تشکیل می دهند و تعداد سیگنال ها برابر روش MASW می شود. سپس نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی داده ها را با هم مقایسه شدند که گویای هم پوشانی نتایج ناشی از دو روش است.

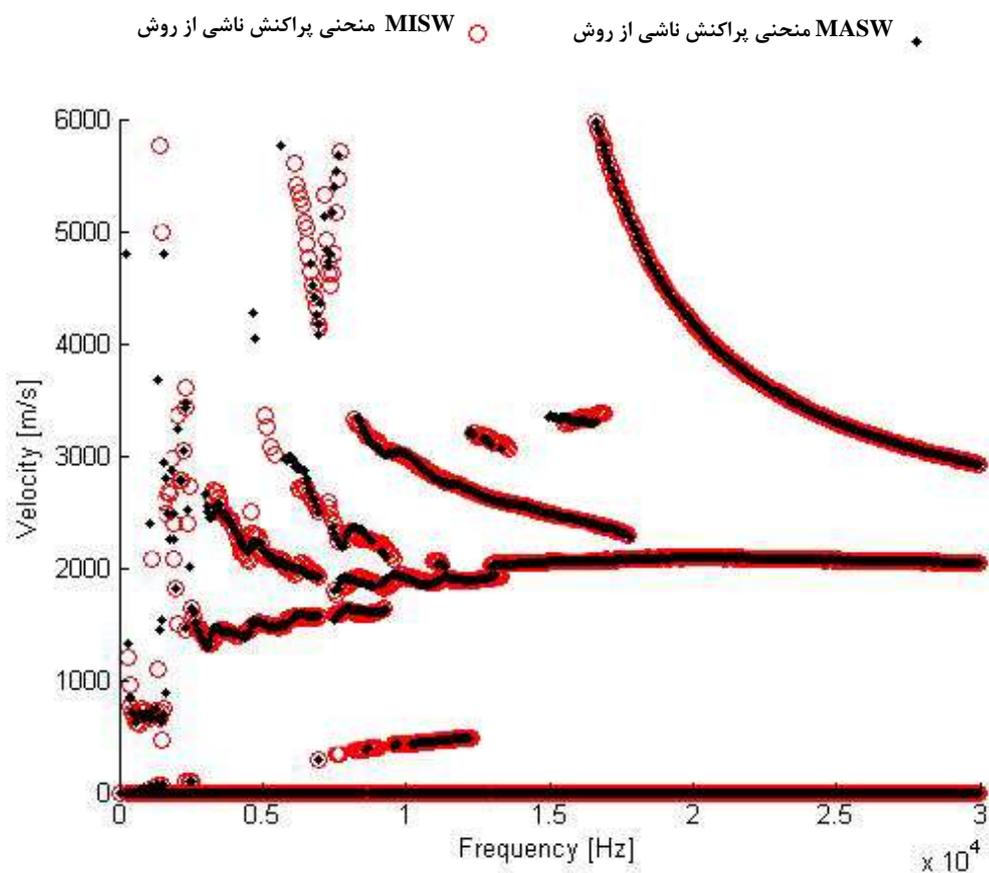
۴- نتایج آزمایش

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از تحلیل داده های ثبت شده ناشی از انتشار امواج در سیستم روسازی راه با استفاده از تحلیل دینامیکی اجزاء محدود توسط نرم افزار ABAQUS/EXPLICIT پرداخته خواهد شد. در شکل ۳ مجموعه سیگنال های دو روش MASW و MISW قابل ملاحظه است. همانطور که مشخص است در روش MASW نمودار طیفی مجموعه سیگنال دارای وضوح بیشتری نسبت به روش MISW می باشد.

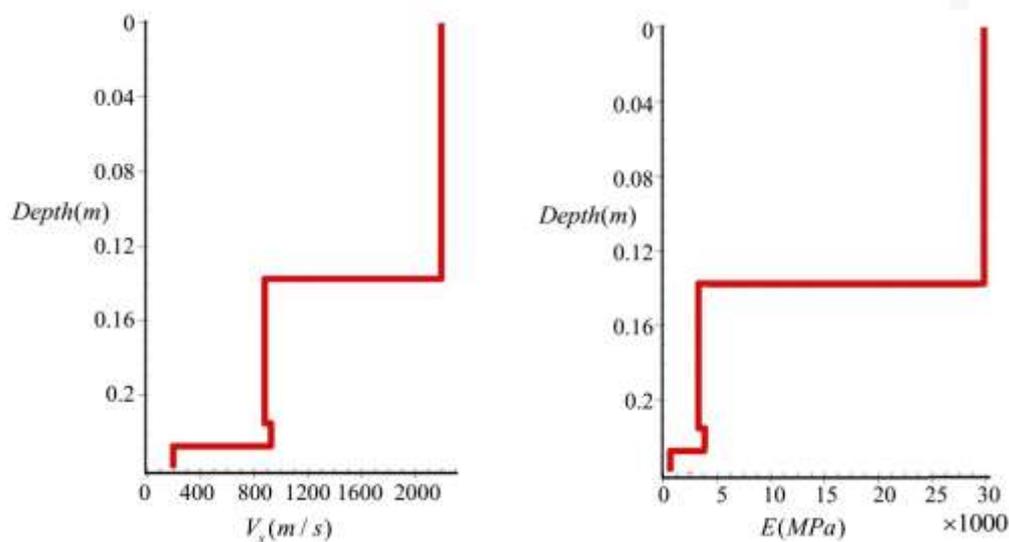


شکل ۳- مجموعه سیگنال بر حسب زمان به صورت منحنی (سمت چپ) و طیفی (سمت راست). الف) روش ضربات چند گانه امواج سطحی. ب) روش چند

با تحلیل در حوزه فرکانس مجموعه سیگنال در دو روش منحنی های پراکنش ناشی از دو روش به صورت شکل ۴ است.



شکل ۴- منحنی پراکنش ناشی از سیگنال های برداشت شده در دو روش می باشد. دایره های توپر قرمز معرف روش ضربات چند گانه امواج سطحی. نقاط مشکی معرف روش چند ایستگاهی امواج لرزه ای.



شکل ۵- پروفیل تحلیل برگردان منحنی پراکنش مربوط به روش MISW. پروفیل سرعت موج برشی (نمودار سمت چپ). پروفیل مدول یانگ (نمودار سمت راست).

با

توجه به شکل ۴ منحنی های پراکنش روش MASW و MISW مطابقت خوبی دارند و می توان از روش MASW در ارزیابی ها استفاده نمود. از روش MASW به دلیل سرعت و دقت بالا در پروژه های عظیم بهسازی راه توصیه می شود. در انتها از مود اصلی منحنی پراکنش مربوط به روش MASW برای تحلیل برگردان استفاده شد. شکل ۵ بیان گر نتایج ناشی از تحلیل برگردان و محاسبه مدول یانگ نسبت به عمق می باشد. نتایج گویای این است که تشخیص سرعت موج برشی لایه های فوقانی با تقریب قابل قبولی صورت پذیرفته است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از روش MASW برای تعیین مدول الاستیسیته سیستم روسازی مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار از شبیه سازی امواج سطحی در یک نمونه سیستم روسازی در نرم افزار ABAQUS/EXPLICIT استفاده شد تا داده های لازم برای تحلیل امواج سطحی برداشت شود. در این روش با اعمال یک بارگذاری و برداشت چند ایستگاهی سیگنال از سطح نمونه در تعیین مدول یانگ لایه روسازی روندی را پیشنهاد می دهد تا بتوان زمان انجام آزمایش را کاهش داد. در روش متعارف MISW یک طول چند بار مورد تست قرار می گیرد و برای تحلیل امواج سطحی از چسباندن سیگنال ها کنار هم بدست می آید درحالی که در این مطالعه نتایج حاصل از یک آزمایش متعارف با روش MISW همراه با شش بار تکرار آزمایش در فواصل مختلف را با روش MASW با یک بار آزمایش و طول مجموعه سیگنال روش MISW انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که منحنی های پراکنش حاصل از دو روش یکسان هستند. با توجه به نتایج حاصله روش MASW را به روشی سریع تر و ارزان تر از روش MISW قرار داده است تا به توان ارزیابی لایه های روسازی با سرعت و دقت بالا انجام داد.

منابع

۱. اخلاقی، توحید؛ گلابی، سید ابراهیم. (۱۳۸۶). تعیین مدول الاستیسیته لایه رویه روسازی با استفاده از امواج سطحی با فرکانس بالا و مدل صفحه آزاد. سومین کنگره ملی مهندسين عمران.
2. Akhlaghi, B. T., Cogill, W. H., and Yandell, W. O., (1995), Analysis of pavements using an acoustic wave method, Part II: Inverse process. Insight, The Journal of the British Institute of NonDestructive Testing, 37(11), 897-883.
3. Al-Wardany, R., Gallias, J.L., Rhazi, J., Saleh, K & Ballivy, G. (2007). Assessment of concrete slab quality and layering by guide and surface wave testing. ACI Materials Journal, 104(3), 268-275.
4. Bernoulli, L., (1960). Wave propagation and group velocity. Academic Press, New York.
5. Jones, R. (1958). In situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods. Geotechnique, 18(1), 1-21.
6. Jones, R. (1962). "Surface wave technique for measuring the elastic properties and thickness of roads: theoretical development". British Journal of Applied Physics, 13(1), 21-29.
7. Mori, K., A. Spagnoli, Y., Murakami, G., Kondo, I. Torigoe (2002). A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. NDT E International, 35(6), 399-406.
8. Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. & Roesset, J.M. (1994). Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. In: R.D. woods (Editor), Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, Oxford Publishers, New Delhi.

Evaluation of layered concrete pavement mechanical properties by using multi-channel analysis of surface waves

Hossein Rahnema^{1*}, Reza Bahman Bijari¹

¹ *Department of Civil Engineering and Environmental, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.*

**Corresponding author*

Abstract

Determination of a layered concrete pavement's mechanical properties is one of the challengeable issues in civil engineering. Involving surface wave approach in nondestructive tests for mechanical properties of concrete pavements is an attractive way to do so. Multi impact analysis of surface waves is the ordinary approach from Geophysics methods. In this way, acquiring data from sources was processed in F-K domain to achieved dispersion curves. Afterwards an inversion analysis was implemented to determine the elastic modulus profile of the acquired array. In this study, Abaqus software was chosen to 3D simulate the seismic wave's responses recorded on the surface of the sample. Actually, multi-channel analysis of surface waves was implemented to achieve the mechanical properties profile of the concrete pavement in cheap price and time saving way.

Keywords: layered concrete pavement mechanical properties, multi-channel analysis of surface waves.
