

تخمین سریع ضریب الاستیسیته بستر با استفاده از افت و خیز دستگاه FWD

* حسن زیاری، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
** احسان مستوفی افشار، کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در اغلب روشهای تحلیل سازه‌ای روسازیهای انعطاف پذیر برای محاسبه مقادیر تنشها، کرنشها و تغییر شکلهایی که در اثر بارگذاری در خاک بستر و همچنین هر یک از لایه‌های روسازی بوجود می‌آیند، لازم است که مشخصات فنی مصالح این لایه‌ها در اختیار باشد. یکی از مشخصات اصلی، ضریب الاستیسیته یا مدول ارتجاعی بستر می‌باشد که معمولاً با انجام آزمایشهای مخرب و زمان بریکه مستلزم در اختیار داشتن تجهیزات پیشرفته و گران قیمت آزمایشگاهی است، بدست می‌آید.

در این مقاله یک روش ساده، لیکن علمی برای تعیین ضریب الاستیسیته بستر با استفاده از نتایج افت و خیز دستگاه FWD ارائه شده است. در این روش بدون تخریب روسازی و در هر نقطه از مسیر راه در کمترین زمان می‌توان ضریب الاستیسیته بستر را تعیین کرد. پاسخها و نتایج حاصل از این روش با تقریب کافی و حداقل خطای ممکن منطبق بر پاسخها و نتایج حاصل از تحلیل روسازی با روشهای پیشرفته محاسبه معکوس می‌باشد.

واژگان کلیدی: روسازی انعطاف پذیر، تحلیل روسازی، مدول ارتجاعی بستر، افت و خیز دستگاه FWD

۱- مقدمه

امروزه ضریب الاستیسیته لایه‌های روسازی، به طور گسترده برای ارزیابی سازه‌ای و تعمیر و نگهداری راهها به کار می‌رود. بطوریکه در روش طراحی آشتو (که در آئین نامه روسازی آسفالتی نیز ارائه شده است) یکی از داده‌هایی که می‌بایست در طراحی مد نظر قرار گیرد، ضریب ارتجاعی بستر یا خاک می‌باشد. روشها و برنامه‌های کامپیوتری مختلف بسیار زیادی در این زمینه موجود است. استفاده از این نرم‌افزارها برای تحلیل روسازی مستلزم در اختیار داشتن یکدستگاه رایانه شخصی با سرعت داده پردازی نسبتاً بالا و ظرفیت کافی است. بعلاوه اجراء و تحلیل توسط اینگونه از نرم افزارها احتیاج به عملیات سعی و خطایی می‌باشد. از اینرو در این مقاله یک روش ساده ارائه گردیده

* تلفن: ۰۲۱-۷۴۵۴۰۵۳، پست الکترونیکی: H.Ziari@iust.ac.ir

** تلفن: ۰۹۱۲۳۳۶۵۶۸، پست الکترونیکی: Emostoufi@civil.iust.ac.ir

است که در این روش با استفاده از افت و خیزهای ثبت شده دستگاه **FWD** براساس ضخامت لایه مورد نظر مدول ارتجائی بستر در مقطع بدست می‌آید. در این تحقیق با برداشت اطلاعات مورد نیاز از مقاطع مختلف توسط دستگاه **FWD** و تعیین ضخامت لایه‌ها در این مسیرها با استفاده از نرم‌افزار تحلیلی **ELMOD** ضریب الاستیسیته بستر تعیین گردید. سپس نتایج بصورت نمودار ضریب ارتجایی بستر نسبت به افت‌وخیز ترسیم گردید. در نهایت با رگرسیون داده‌ها معادله تعیین ضریب ارتجایی براساس افت و خیز بدست آمد.

۲- جمع آوری اطلاعات اولیه

آزمایش افت‌وخیز بر روی سطح روسازی در دو مسیر باند شمالی اتوبان تهران- کرج (حدفاصل عوارضی تا پل ملارد) و باند جنوبی اتوبان بابایی (حد فاصل میدان نوبنیاد تا پل ابعلی)، در سومین خط (خط سبقت) و هر یک بترتیب به طول ۲۳/۵ و ۱۶/۱ کیلومتر توسط دستگاه **FWD** مدل ۸۰۰۰ دایناتست انجام گرفت. تعداد کل مقاطع مورد ارزیابی در این تحقیق، برابر ۴۰۲ مقطع می‌باشد که ۲۴۰ مقطع در اتوبان کرج، به فواصل ۱۰۰ متری و ۱۶۲ مقطع در اتوبان بابایی نیز به فواصل ۱۰۰ متری می‌باشد.

۲-۱- اندازه گیری افت‌وخیزها توسط **FWD**

مشخصات مقاطع آزمایش شامل: شماره ایستگاه، کیلومتراژ، شماره خط، درجه حرارت آسفالت، درجه حرارت سطح آسفالت، درجه حرارت هوا، شماره **drop** مورد آنالیز، تنش در زیر صفحه بارگذاری (**kpa**)، نیروی اعمال شده (**kn**) و افت‌وخیز در سنسور مرکزی و افت‌وخیز در فواصل ۳۰ سانتیمتری از مرکز صفحه بارگذاری تا فاصله ۱۸۰ سانتیمتری از سنسور مرکزی که با **D۰** تا **D۱** نشان داده شده است، می‌باشد.

۲-۲- تعیین ضخامت لایه‌ها

ضخامت و ساختار لایه‌های روسازی در اتوبان تهران-کرج با استفاده از کرگیری و در اتوبان بابایی بوسیله دستگاه **GPR** مشخص گردید. در اتوبان تهران-کرج با توجه به نتایج کرگیری‌ها تقریباً ضخامت لایه آسفالتی در طول پروژه یکنواخت می‌باشد، بنابراین از ضخامت میانگین برای طول کل پروژه در آنالیز توسط نرم‌افزار **ELMOD** استفاده شده است. در اتوبان بابایی نیز با استفاده از داده‌های دستگاه **GPR** ضخامت لایه‌های روسازی تعیین گردید که با تحلیل آن داده‌ها ضخامت متوسط برای فواصل مختلف از طول کل پروژه بدست آمد. جداول (۲-۲-۱) و (۲-۲-۲) ضخامت لایه‌های رویه آسفالتی و اساس و زیر اساس در اتوبان بابایی و اتوبان تهران-کرج نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲-۲) ضخامت لایه‌های رویه آسفالتی و اساس و زیر اساس در اتوبان بابایی

ضخامت (mm)		فاصله (KM)	
لایه اساس و زیر اساس	لایه آسفالتی	به	از
۳۶۰	۳۱۰	۲/۱	۰
۳۶۶	۲۹۰	۵/۱	۲/۱
۳۵۹	۲۹۰	۷/۱	۵/۱
۳۵۰	۳۲۰	۹/۱۵	۷/۱
۳۰۷	۲۵۰	۱۱/۱۵	۹/۱۵
۲۵۰	۲۶۰	۱۳/۱۵	۱۱/۱۵
۳۴۴	۲۲۰	۱۵/۱۵	۱۳/۱۵
۱۷۰	۲۳۰	۱۶/۱۴	۱۵/۱۵

جدول (۲-۲-۲) ضخامت لایه‌های رویه آسفالتی و اساس و زیر اساس در اتوبان کرج-تهران

ضخامت (mm)		فاصله (KM)	
لایه اساس و زیر اساس	لایه آسفالتی	به	از
۶۲۵	۲۴۶/۶۲۵	۲/۵	۰
۶۲۵	۲۴۶/۶۲۵	۷/۵	۳
۳۹۵	۲۴۶/۶۲۵	۱۳/۵	۸
۳۹۵	۲۴۶/۶۲۵	۱۸/۵	۱۴
۳۹۵	۲۴۶/۶۲۵	۲۰/۵	۱۹
۳۹۵	۲۴۶/۶۲۵	۲۲/۵	۲۱
۳۹۵	۲۴۶/۶۲۵	۲۵	۲۳

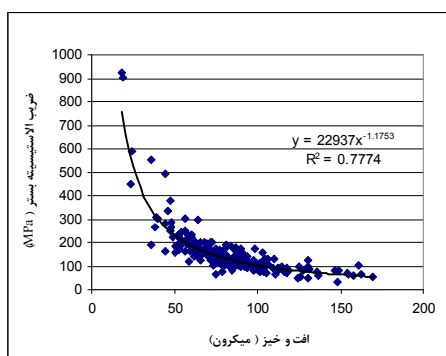
۲-۳- تعیین مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی

در نرم‌افزار **ELMOD** با استفاده از روش "انطباق حوضچه افت‌وخیز"^۱، (به توصیه شرکت سازنده نرم‌افزار (دایناتست)) مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی اتوبان تهران-کرج و اتوبان بابایی براساس افت‌وخیزهای **drop3** بدست آمد. لازم به ذکر است که در بعضی از مقاطع آزمایش به علت ناهمگونی نمودار مدول سطحی و به نوعی رفتار غیرخطی بستر در هنگام انجام محاسبه معکوس، انطباق کامل حوضچه‌های افت‌وخیز صورت نمی‌گیرد که جوابهای نادرستی را نتیجه می‌دهد. این موضوع در نرم‌افزار **ELMOD** با بررسی مقادیر **RMS** خطاها قابل تشخیص می‌باشد، بطوریکه در هنگام انجام محاسبه معکوس، **RMS** را برابر عدد یک در نظر می‌گیریم و تا عدد پنج نیز قابل قبول می‌باشد.

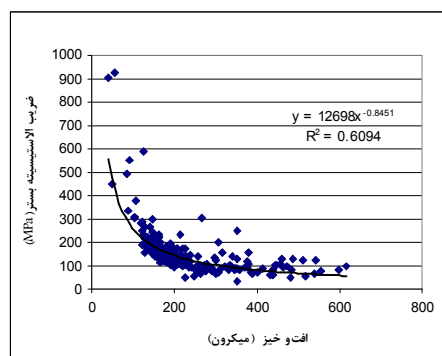
^۱- Deflection Basin Fit(DBF)

۳- تعیین معادله ضریب الاستیسیته بستر با استفاده از افت و خیز دستگاه FWD

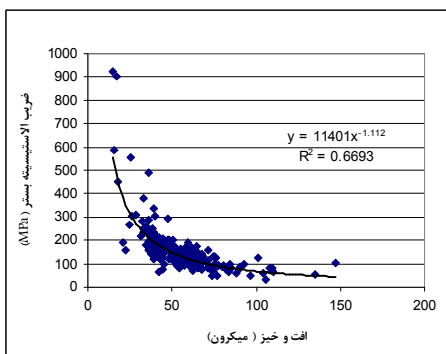
ضریب الاستیسیته بستر یا ضریب عکس العمل بستر، نقش بسیار مهمی در عملکرد روسازی دارد. جهت تعیین این ضریب، نتایج افت و خیز حاصل از دستگاه FWD و مدول الاستیسیته بستر را که در دو مسیر مختلف بدست آمده است را با هم ترکیب و به تفکیک هر سنسور در نمودار مختصاتی رسم گردید (شکل‌های (۱-۳) تا (۷-۳)) و سپس عملیات رگرسیون بر روی آن‌ها انجام شد. هدف از ترکیب این نتایج بدست آوردن معادله‌ای کلی و جامع بوده است.



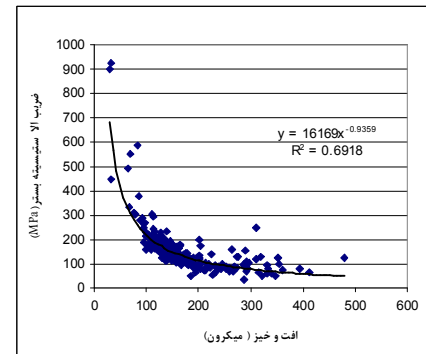
شکل (۴-۳) نمودار افت و خیز سنسور چهارم و مدول الاستیسیته بستر



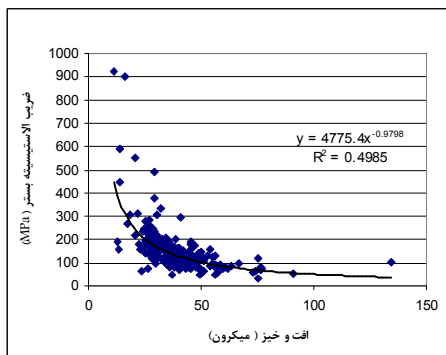
شکل (۱-۳) نمودار افت و خیز سنسور اول و مدول الاستیسیته بستر



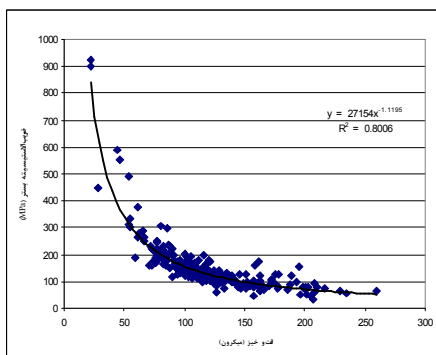
شکل (۵-۳) نمودار افت و خیز سنسور پنجم و مدول الاستیسیته بستر



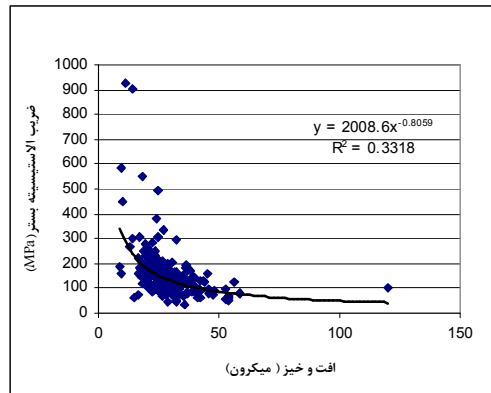
شکل (۲-۳) نمودار افت و خیز سنسور دوم و مدول الاستیسیته بستر



شکل (۶-۳) نمودار افت و خیز سنسور ششم و مدول الاستیسیته بستر



شکل (۳-۳) نمودار افت و خیز سنسور سوم و مدول الاستیسیته بستر



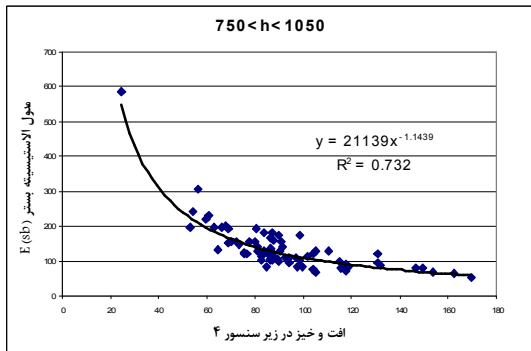
شکل (۷-۳) نمودار افت و خیز سنسور هفتم و مدول الاستیسیته بستر

همانطور که از نمودارها مشخص می‌گردد، بین افت و خیزها در سنسورهای مختلف و مدول الاستیسیته بستر همبستگی وجود دارد. پس از رسم بهترین خط از نمودارها، بررسیها نشان داد که مدول بستر تابعی از فاصله سنسورها از محل بارگذاری و ضخامت لایه‌ها می‌باشد. عبارتی جهت شبیه سازی بهتر ضریب ارتجاعی بستر، سنسوری را که فاصله اش از محل بارگذاری در حدود ضخامت لایه‌های اساس و زیر اساس است وابستگی زیادی با مدول بستر دارد و می‌توان از آن جهت تعیین مدول بستر استفاده کرد. جهت تفکیک ضخامتهای لایه‌ها با توجه به فاصله سنسورها از یکدیگر بازه‌هایی تعیین گردید. جدول (۱-۳) بازه‌های در نظر گرفته شده را براساس فاصله سنسورهای دستگاه FWD نشان می‌دهد.

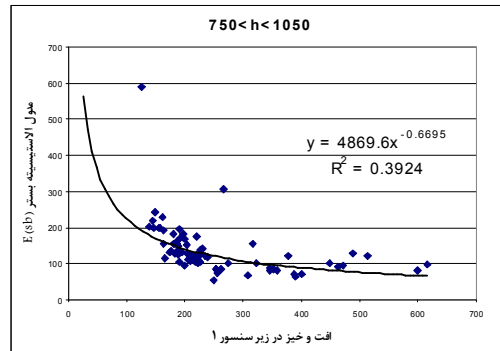
جدول (۱-۳) بازه‌های در نظر گرفته شده براساس فاصله سنسورهای دستگاه FWD

شماره سنسور	ضخامت کل لایه (mm)
۱	$h < 150$
۲	$150 < h < 450$
۳	$450 < h < 750$
۴	$750 < h < 1050$
۵	$1050 < h < 1350$
۶	$1350 < h < 1650$
۷	$1650 > h$

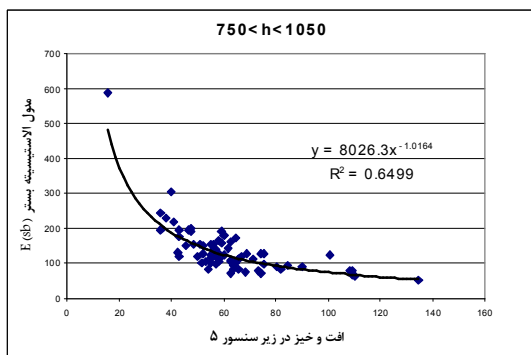
بنابراین جهت صحت این ادعا، مدولهای ارتجایی بستر به تفکیک ضخامت و سنسور، مجدد در نمودار رسم و میزان همبستگی آنها را بررسی گردید. شکل‌های (۳-۸) الی (۳-۱۴) نمودار افت‌وخیز و مدول الاستیسیته بستر به تفکیک ضخامت لایه‌های اتوبان تهران-کرج را نشان می‌دهد.



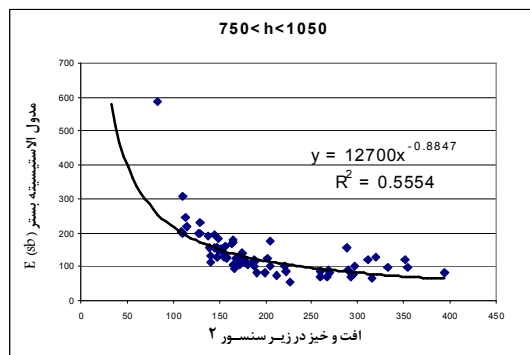
شکل (۳-۱۱) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



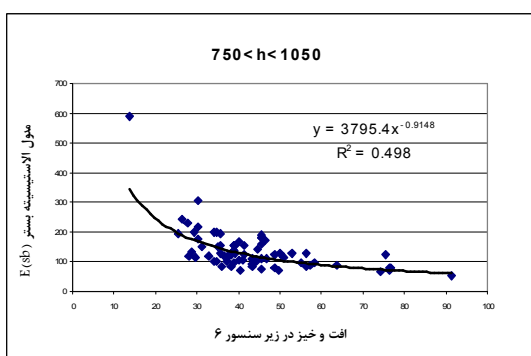
شکل (۳-۸) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



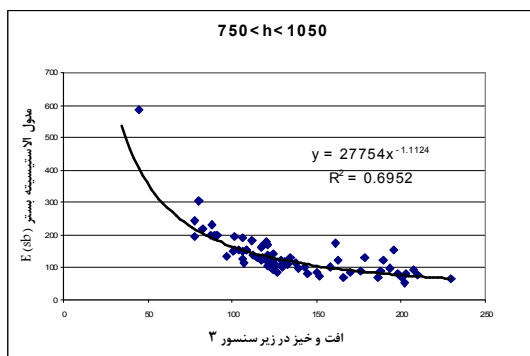
شکل (۳-۱۲) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



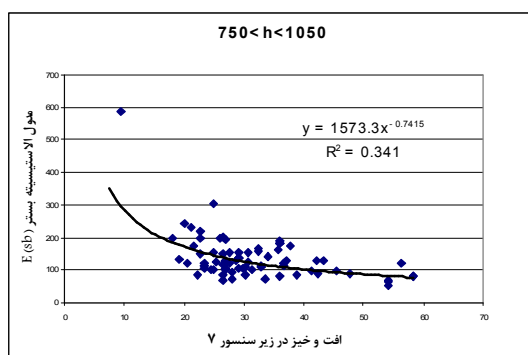
شکل (۳-۹) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



شکل (۳-۱۳) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



شکل (۳-۱۰) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر



شکل (۳-۱۴) نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر

همانطور که در شکل‌های فوق نیز مشخص می‌باشد همبستگی مدول بستر با افت و خیز سنسور ۴ بیشتر از بقیه سنسورها است. بعلاوه همانطور که آورده شد بازه انتخابی نیز سنسور چهارم را بعنوان سنسور مطلوب مشخص می‌نماید. نمودار افت و خیز و مدول الاستیسیته بستر برای مابقی مسیر اتوبان تهران-کرج به تفکیک سنسورها نیز رسم شد. ضخامت لایه‌ها در این محدوده (کیلومتر از ۷/۵ تا ۲۴) برابر با ۶۴۲ میلیمتر می‌باشد که در جدول (۳-۱) در ردیف سنسور شماره ۳ قرار می‌گیرد. پس از رسم و نتیجه گیری، بهترین جواب که از وابستگی مناسبی نسبت به بقیه سنسورها برخوردار می‌باشد، مربوط به سنسور شماره ۳ بدست آمد. در نهایت پس از بررسی نتایج و اطلاعات روابطی جهت تعیین عدد ضریب الاستیسیته بستر از مقادیر افت و خیز سطحی بدست آمد که میزان R^2 هر رابطه نیز نشان داده شده، ارائه گردیده است. روابط (۳-۱) الی (۳-۳) نتایج حاصل از این تحقیق را که بصورت پیشنهادی می‌باشد، نشان می‌دهد.

$$E_{subgared} = 21139 \times d_4^{-1/1439} \quad R^2 = 0.732 \quad 750 < h < 1050 \quad (۱-۳)$$

$$E_{subgared} = 31594 \times d_3^{-1.1578} \quad R^2 = 0.837 \quad 450 < h < 750 \quad (۲-۳)$$

$$E_{subgared} = 26383 \times d_2^{-1.815} \quad R^2 = 0.85 \quad 150 < h < 450 \quad (۳-۳)$$

۴- خلاصه و نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمایشات محدود انجام شده، موارد زیر را می‌توان به صورت جمع‌بندی این پژوهش عنوان نمود:
 (۱) هر چه افت و خیزهای سطح روسازی یکنواخت‌تر باشند، جنس و خصوصیات خاک بستر نیز یکنواخت‌تر خواهد بود.
 (۲) هر چه ضخامت لایه های روسازی کمتر باشد، مدل شبیه سازی مدول ارتجاعی بستر دقیقتر خواهد بود و همچنین از سنسورهای کمتری جهت تعیین این ضریب استفاده می‌شود.

۳) مشخص گردید مدول بستر تابعی از فاصله سنسورها از محل بارگذاری و ضخامت لایه‌ها می‌باشد. عبارتی جهت شبیه سازی بهتر ضریب ارتجاعی بستر، سنسوری را که فاصله‌اش از محل بارگذاری در حدود ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس است وابستگی زیادی با مدول بستر دارد و می‌توان از آن جهت تعیین مدول ارتجاعی بستر استفاده کرد.

۴) می‌توان با انجام آزمایش افتوخیز در فصول مختلف و استفاده از روابط فوق مقدار مدول ارتجاعی بستر را تعیین نمود تا در طراحی‌ها میزان تاثیر مخرب نسبی فصول سال بر بستر لحاظ گردد.

۵- مراجع

[۱] عامری، محمود و افتخارزاده، سیدفرهاد، مدیریت روسازس برای راهها، فرودگاهها و پارکینگها، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۸

[۲] مستوفی افشار، احسان، کالیبراسیون نتایج دستگاه FWD با مطالعه موردی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳

[۳] دامیار، بهروز، معرفی نرم‌افزار ارزیابی روسازی ELMOD، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳

[4] Pavement Evaluation by FWD, Kars, Drenth, 2003

[5] Dynatest 8000 FWD test system, Owner's manual, Version 1.7.0 for windows, 2002