بررسی و تعیین آثار مودال بر عمرِ خستگی

سیّدعلیرضاسیّدرکنی‌زاده
کارشناسی ارشد
مهندسی هوافضا، سازه‌های هوایی

علی صالح‌زاده‌نوبری
دانشیار
دانشکده‌ی هوافضا، دانشگاه‌صنعتی‌امیرکبیر

چکیده

در مقاله حاضر روش‌های گوناگون حوزه‌ی زمانی و فرکانسی در تعیین عمر «خستگی» بررسی می‌شوند. همچنین مناسب‌ترین روش محاسبه‌ی تنش، برای قطعاتی که امکان است تقابل بین فرکانس‌های طبیعی آنها و محدوده‌ی فرکانس توابع نیرویی اعمال شده بر آنها وجود دارد، بررسی و درباره‌ی آثار «مودال» بر نتایج حاصل بحث می‌شود و در عمل، اعتبار روش آنالیز خستگی ایستا که در بیشتر نرم‌افزارهای مهندسی بکار می‌رود، بررسی شده است.

کلمه‌های کلیدی

خستگی، مودال، حوزه‌ی زمان، حوزه‌ی فرکانس، بارگذاری تصادفی.

Investigation of Model Effects on Fatigue Life

S.A. Seyed Roknizadeh
MSc.
Aerospace Engineering

A. Salehzadeh Nobari
Associate Professor
Faculty of Aerospace Engineering,
Amir Kabir University of Technology

Abstract

This paper investigates different methods of time domain and frequency domain on assessment of fatigue life. The most suitable method of calculating stress for components that their natural frequencies have some degrees of interaction with the frequency range of the applied forcing functions are considered and modal effects are discussed. In practice, the validation of static analysis in evaluating of fatigue life used in the most engineering softwares is studied.

Keywords

Fatigue, modal, time domain, frequency domain, random loading.

مقدمه

با وجود سال‌ها تحقیق پیش‌بینیِ عمر خستگیِ اجزا به علّت تنش‌های نوسانیِ تصادفی، هنوز از دقّت لازم برخوردار نیست. میزان آسیبِ خستگی به عواملی از جمله خصوصیات مادّه، پروسه‌های ساخت، عیوب مادّه‌ای، فاکتورهای محیطی بستگی دارد. ناگزیر پیش‌بینی‌های عمر و یا آسیب خستگی بر پایه‌ی نظریه عمومیِ خستگی، در شرایط مختلف کارکرد متفاوت است. در مراحل نخستین طرّاحی هنگامی که داده‌های آزمایشگاهی و تجربی موجود نیست، لازم است که بر مدل‌های ریاضی بر پیش‌بینیِ عمر خستگی و تعیین آسیب‌های آن تکیه کرد. در روش‌های متداولِ بررسی آسیب خستگی از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده یا شبیه‌سازی شده‌ی زمانیِ تنش یا کرنش استفاده می‌کنند. این شیوه برای بارهای تناوبی، مناسب است، لیک برای توصیف فرایند بارگذاریِ تصادفی با دقّت خوب به داده‌هایی در زمان‌های طولانی نیاز است و این ممکن است مانعی در تحلیل‌های المانِ محدود به ویژه درباره‌ی مدل‌های پیچیده باشد. بنابراین، ستفاده از حوزه‌ی فرکانسی در تحلیل خستگی، جایگزین مناسبی برای حوزه زمانی است. هنگامی که چگالیِ طیف توانِ یک بارگذاریِ تصادفی، شناخته شده نظریه تحلیل آماری اطلاعات بسیاری درباره‌ی تابع خود همبستگیِ[1] بارگذاری ارائه می‌کند. بنابراین، فرایند بارگذاری، از نظرگاه آماری تقریباً بطور کامل شناخته شده است. با فرضِ نرمال بودن فرایند بارگذاری، تابع چگالی احتمال حدّاکثرها و حدّاقل‌ها نیز مشخص خواهد بود. لذا محاسبه‌ی آسیب خستگی با در نظر داشتن قانون جمع آسیب(برای مثال: قانون خطی ماینر) و با به کارگیری اطّلاعات مقاومت خستگی با دامنه‌ی ثابت قابل اجراست[1,2]. حجم عملیات پایین‌تر و دستیابی به اطلاعات بیشتر برای رفع مشکل خستگی سازه نیز از دیگر مزایای روش حوزه‌ی فرکانسی می‌باشد.

در بخش نخست این مقاله، ابتدا مروری بر روی مدل‌های آسیب خستگی در حالت بارگذاری تصادفی بعمل آمده و مدل‌های حوزه زمانی و فرکانسی در تحلیل آسیب خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم مقاله، روش جریان باران[2] تشریح می‌گردد. در بخش سوم روش‌های تحلیل تنش در ارزیابی عمر خستگی بررسی شده است. در بخش چهارم یک خودرو به عنوان نمونه با استفاده از روش‌های مختلف حوزه زمانی و فرکانسی در ارزیابی عمر خستگی و روش‌های مختلف تحلیل تنش مورد بررسی قرار گرفته و ضمن مقایسه نتایج روش‌های مختلف، اثرات مودال بر روی عمر خستگی مورد مطالعه واقع شده است.

۱ـ مروری بر مدل‌های آسیب خستگی در حالت بارگذاری تصادفی

خصوصیات و ویژگی‌های ماده دارای تاثیر زیادی بر روی رفتار خستگی یک قطعه می‌باشند. رابطه بین دامنه تنش(S) و تعداد سیکل‌های بارگذاری منجر به شکست (N) برای بسیاری از مواد از معادله S-N پیروی می‌کند:

$$N = cS^{\frac{1}{b}} \qquad (1)$$

داده‌های S وN معمولاً از آزمایش‌های خمشی تناوبی با دامنه ثابت در آزمایشگاه بدست می‌آیند. شرایط آزمایش بطور قابل توجهی متفاوت از شرایط کارکرد تحت بارگذاری تصادفی می‌باشد، چرا که در حالت تصادفی، دامنه و فرکانس سیکل‌های تنش تغییر می‌کند. با این وجود به منظور برخورد با دامنه‌های متغیر بارگذاری هنوز از اطلاعات S-N دامنه ثابت استفاده می‌شود. ماینر[3] فرض کرد که میزان آسیب خستگی ناشی از دامنه‌های تنش متفاوت را می‌توان بصورت خطی با توجه به تعداد سیکل‌های هر سطح تنش جمع کرد. این مطلب را معمولاً تحت عنوان قضیه ماینر- پالمگرین یا قانون ماینر می‌شناسند. اگر n_i تعداد سیکل‌های تنش در یک دامنه مشخص باشد و N_i تعداد سیکل‌های منجر به شکست در همان سطح تنش داده شده در نمودار S-N باشد، درصد آسیب خستگی D_i ایجاد شده توسط سیکل‌های تنش از رابطه $D_i = \frac{n_i}{N_i}$ بدست می‌آید. هنگامی که مجموع آسیب‌های تمام سطوح تنش برابر یک شود قطعه دچار شکست می‌شود یا

$$\sum_i D_i = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_i}\right) = 1 \qquad (2)$$

هر چند این روش در به حساب آوردن ترتیب تنش‌های اعمالی دارای ضعف می‌باشد با این وجود عمر خستگی اجزاء را بطور معقولی تخمین می‌زند[3,4].

قانون ماینر را می‌توان در تحلیل‌های حوزه زمانی و فرکانسی برای تخمین عمرهای خستگی جهت اهداف طراحی بکار برد.

۱-۱ـ تحلیل در حوزه زمان

در محاسبات حوزه زمانی، تعداد سیکل‌ها در سطوح تنش مختلف(n)مستقیماً با استفاده از تاریخچه تنش شمارش شده و بوسیله تعداد سیکل دامنه ثابت متناظر با شکست N_i منحنی S-N تقسیم می‌شوند. روش‌های شمارش تاریخچه‌های تنش باید سیکل‌ها را به گونه‌ای بشمارند که دامنه‌های شمارش شده ماکزیمم شوند[4]. چراکه نوسانات در آسیب خستگی، کم اهمیت‌تر از اختلاف کلی بین نقاط بالایی و پایینی در تاریخچه تنش هستند. لذا روش شمارش باران به عنوان یک روش مناسب برای تخمین آسیب خستگی به حساب می‌آید. این روش تا کنون بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن تأیید شده است[5,6]. روش جریان باران، تغییرات تنش را در حوزه زمان بر اساس حلقه‌های پس‌ماند تنش ـ کرنش که مسئول آسیب خستگی هستند می‌شمارد. روش تحلیل حوزه زمانی تاریخچه تنش تصادفی از نظر محاسباتی گران می‌باشد. برای بکارگیری روش‌های حوزه زمانی، لازم است تاریخچه تنش بسیار بزرگی با خصوصیات آماری مناسب تولید و یا شبیه‌سازی شده و سپس بطور جداگانه هر یک از تغییرات تنش مورد پردازش قرار گیرد.

۱-۲ـ تحلیل در حوزه فرکانس

در تحلیل حوزه فرکانسی، تابع چگالی طیف توان تنش‌ها برای محاسبه توزیع احتمال قله‌های تنش مورد استفاده قرار گرفته و سپس عمر خستگی با استفاده از این توزیع بدست می‌آید. بدین صورت که اگر $P_p(S)$ تابع توزیع احتمال قله‌های تنش قطعه باشد، تعداد سیکل‌های مربوط به یک دامنه مشخص تنش(S) در طول بازه زمانی T از رابطه زیر بدست می‌آید[1,2]:

$$n_i = n(S) = \nu_p T P_p(S) \qquad (۳)$$

که ν_p تعداد قله‌های تنش مورد انتظار در تاریخچه تنش در هر ثانیه می‌باشد. ν_p را می‌توان بوسیله ممان‌های طیف توان تنش(PSD) محاسبه کرد[7]:

$$\nu_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \qquad (۴)$$

که:

$$m_k = \int_0^\infty \omega^k S_s(\omega)\,d\omega \qquad (۵)$$

$S_s(\omega)$ چگالی طیف تنش در فرکانس زاویه‌ای ω می‌باشد. در یک پروسه تنش تصادفی واقعی، دامنه تنش بطور پیوسته تغییر می‌کند.(به عنوان مثال یک پروسه تصادفی باند باریک). لذا رابطه مجموع در معادله(۲) را می‌توان با یک انتگرال روی تغییرات تنش از صفر تا بینهایت جایگزین نمود[1,2]:

$$\sum_i D_i = \int_0^\infty \frac{n(S)}{N(S)}\,dS = \nu_p T \int_0^\infty \frac{P_p(S)}{N(S)}\,dS = 1 \qquad (۶)$$

و زمان شکست قطعه را از رابطه زیر می‌توان بدست آورد:

$$T = \frac{1}{\nu_p \int_0^\infty \frac{P_p(S)}{N(S)}\,dS} \qquad (۷)$$

عمر خستگی صحیح ممکن است به علت فاکتورهای مختلفی مانند افزایش بارهای ناگهانی به میزان قابل توجهی متفاوت از مقدار بدست آمده از رابطه ماینر باشد[8].

به منظور بکارگیری رابطه (۶) تاکنون تلاش‌های زیادی برای تعیین تابع توزیع احتمال قله‌های تنش $P_p(S)$ انجام شده که بعضی از این روابط در بخش‌های دیگر این مقاله توضیح داده شده است.

یک روش عمومی این است که فرض می‌کنند تنش‌ها مربوط به یک پروسه باند باریک بوده و $P_p(S)$ از توزیع ریلی پیروی

می‌کند. به این روش در زیر اشاره شده است.

۱-۲-۱ـ فرایندهای باند باریک ایستا[۳]

در یک فرایند تنش باند باریک ایده‌آل، فرکانس پیک‌ها (ν_p) مساوی فرکانس عبوری از صفر باشیب مثبت می‌باشد[1,2]. به شرط برقراری فرایند گاوسین ،(ν^+_0) توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\nu_0^+ = \frac{1}{2\pi}\frac{m_2}{m_0} \qquad (۸)$$

تابع چگالی احتمال با توجه به مرجع [1,2] از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_p(S) = \frac{S}{m_0}\exp[\frac{-S^2}{2m_0}] \qquad (۹)$$

معادله فوق به توزیع ریلی معروف می‌باشد. عمر خستگی یک قطعه را می‌توان با استفاده از معادله (۷) و با مشارکت معادله‌های(۸) و (۹) و فرمولS-N (رابطه (۱)) به دست آورد. نتیجه در ذیل آورده شده است:

$$T = \frac{2^{(1+1/2b)}.\pi.c.m_0^{(1+1/b)}}{m_2.\Gamma(1-1/2b)} \qquad (۱۰)$$

بطوریکه $\Gamma(\bullet)$، تابع گاما و b و c ثابت‌های ماده می‌باشند.

با توجه به مرجع [1]، عمر واقعی بطور نرمال بین 3T و 0.3T می‌باشد. روش فوق ساده‌ترین روش در حوزه فرکانسی برای پیش‌بینی عمر خستگی فرایندهای تصادفی باند باریک است.که فقط نیازمند محاسبه m_0 و m_2 از چگالی طیفی باند باریک می‌باشد.

با توجه به مرجع [9]، پیش‌بینی عمر خستگی با در نظرگرفتن توزیع ریلی برای قله‌های تنش در مواردی که α[۴] کوچکتر از ۰/۲ می‌باشد، محافظه‌کارانه است. پارامتر α بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{m_2}{m_0 m_4} \qquad (۱۱)$$

در یک پروسه باند باریک ایده آل مقدار α مساوی یک می‌باشد. پیش‌بینی‌های دقیق‌تر برای موارد طیفی مختلف را می‌توان با اصلاح مدل $P_p(S)$ بدست آورد.

۲ـ روش شمارش جریان باران[۵]

بطور وسیع پذیرفته شده است که موثرترین روش شمارش،در این مقاله، از روش شمارش جریان باران می‌باشد. در این مقاله، از روش شمارش جریان باران تاریخچه‌های زمانی تنش، به عنوان مرجعی جهت مقایسه روش‌های حوزه فرکانسی محاسبه آسیب خستگی استفاده شده است.

عمر خستگی پیش‌بینی شده با بکارگیری روش شمارش جریان باران، به تعداد تغییرات تنشِ بدست آمده از فرایند و در نتیجه به زمان شبیه‌سازی کل حساس می‌باشد. در مقاله حاضر ۱۸۰۰۰ داده بدست آمده از آزمایش جاده از نوع جابجایی در مدت۴۵ ثانیه به عنوان بار ورودی به خودرو شبیه‌سازی شده، اعمال شده و پس از خواندن نتایج تنش، از روش شمارش جریان باران استفاده شده است.

از مزایای روش شمارش جریان باران، محاسبه تاثیر تنش متوسط بصورت جداگانه در حوزه زمان می باشد. تنش متوسط را می‌توان برای هر یک از تغییرات تنش جداگانه محاسبه و آسیب متناظر با آن را با بکارگیری روش‌هایی مانند گودمن ، بطور مستقل ارزیابی نمود [4]. برای مدل‌های حوزه فرکانسی، فقط یک تنش متوسط ثابت را می‌توان درنظر گرفت.

۳ـ تحلیل تنش در ارزیابی عمر خستگی

دقت عمر خستگی محاسبه شده، بستگی به دقت تاریخچه تنش یا کرنش محاسبه شده با استفاده از روش المان محدود

دارد. تاریخچه تنش لازم برای محاسبه عمر خستگی را می‌توان با بکارگیری یکی از روش‌های تحلیل زیر محاسبه نمود[10]:

استراتژی حوزه زمانی استاندارد که شامل بکارگیری روش تحلیل تنش استاتیکی است.

استراتژی حوزه زمانی پیشرفته‌تر که شامل بکارگیری روش تحلیل تنش دینامیکی گذرای کامل است.

استراتژی حوزه فرکانسی که شامل بکارگیری روش تحلیل تنش هارمونیک است.

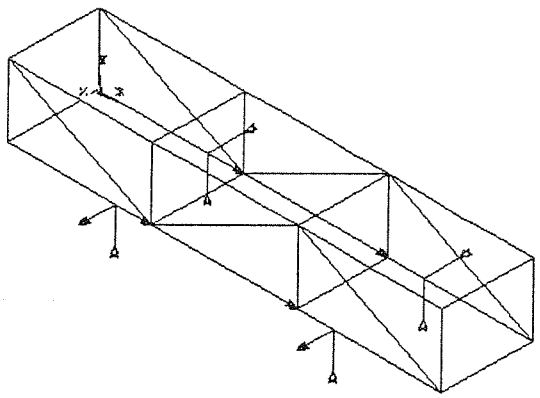
استراتژی حوزه فرکانسی که شامل بکارگیری روش تحلیل ارتعاشات اتفاقی است.

تاریخچه تنش محاسبه شده با استفاده از روش تحلیل تنش گذرای کامل، معمولاً بیشترین دقت را داشته و معمولاً به عنوان مرجعی برای ارزیابی دقت تنش‌های بدست آمده از روش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد[11,12]. ولی استفاده از روش تحلیل تنش گذرا در مدل‌های المان محدود بزرگ و تاریخچه بار طولانی، محاسبات زیادی را به دنبال دارد[11]. بنابراین یک چنین روش تحلیلی گرانی را نمی‌توان بطور عمومی بکار برد. در نتیجه در مقاله حاضر، روش تحلیل تنش گذرا در پیش‌بینی عمر خستگی به عنوان مرجعی برای مقایسه با نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی و تحلیل حوزه فرکانسی مورد استفاده قرار گرفته است.

٤ـ مسأله نمونه

در این مقاله یک اتوبوس به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. شکل(۱) مدل المان محدود این خودرو را نشان می‌دهد. به منظور پیش‌بینی تاریخچه تنش، خودرو در کمتر از یک دقیقه (۴۵ ثانیه)، تحت آزمایش جاده قرار گرفته و ۱۸۰۰۰ بار وارده در محل هر یک از چرخ‌ها(از نوع جابجایی) ثبت گردیده است. درآزمایش صورت گرفته، تاریخچه بار، در فرکانس ۴۰۰ هرتز جمع‌آوری شده است.

از آنجا که هدف این مقاله بررسی و مشاهده اثرات مودال بر روی عمر خستگی بوده نه بهبود طراحی آن، لذا سعی شده است که مدل حتی‌الامکان ساده بوده تا آسیب‌های خستگی در تمام المان‌ها بدون صرف زمان زیادی قابل حصول باشد. با این وجود هر یک از تحلیل‌های تنش گذرای کامل با استفاده از یک کامپیوتر دارای پردازنده پنتیوم IIII، بالغ بر دو شبانه روز به طول انجامیده است.



شکل (۱) مدل المان محدود خودرو.

٥ـ تخمین آسیب خستگی خودرو تغییرداده شده

جهت بررسی امکان بکارگیری استراتژی تخمین عمر بر اساس تحلیل تنش استاتیکی و روش‌های حوزه فرکانسی برای شکل‌های مختلف ارتباط بین فرکانس‌های طبیعی قطعات و محدوده فرکانس توابع نیرویی ورودی، خصوصیات ماده خودرو بطور مصنوعی تغییر داده شده است. چهار ترکیب مختلف چگالی و مدول یانگ ماده مطابق جدول(۱) در نظر گرفته شده است.

موقعیت اولین و دومین فرکانس طبیعی خودرو نسبت به محدوده فرکانسی توابع نیرویی ورودی، درشکل(۲) نشان داده‌شده است. عمر خودرو برای هر یک از این ترکیب‌ها با استفاده از روش‌های زیر تخمین زده شده است:

۱ـ روش تحلیل تنش استاتیکی به همراه روش ارزیابی عمر خستگی حوزه زمانی
۲ـ روش تحلیل تنش گذرا به همراه روش ارزیابی عمر خستگی حوزه زمانی.
۳ـ روش تحلیل تنش هارمونیک به همراه روش ارزیابی عمر خستگی حوزه فرکانسی.

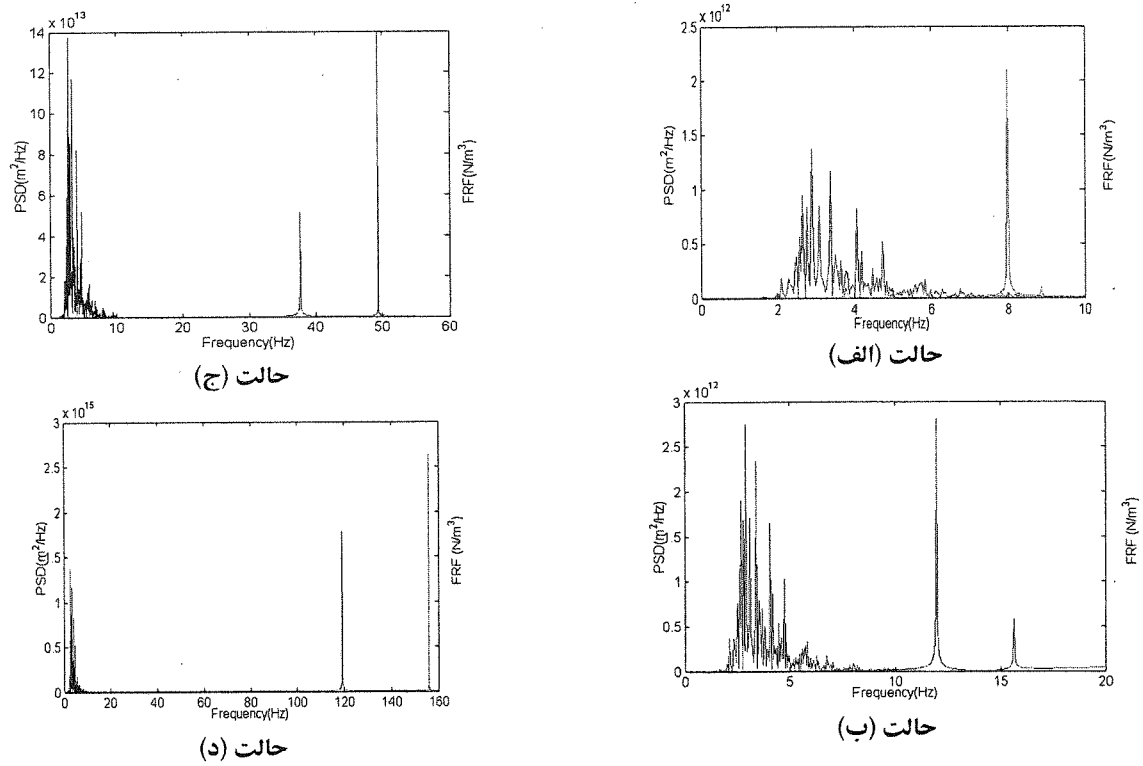
جدول (۱) ترکیبات مختلف چگالی و مدول یانگ خودرو و فرکانس‌های طبیعی اول و دوم مربوط به آنها.

حالت	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	فرکانس‌های طبیعی (Hz)	
			دوم	اول
الف	۱۵۰۰۰	۲۰	۴/۹۵۲۳	۴/۲۵۹۷
ب	۱۵۰۰۰	۲۰۰	۱۵/۶۶۰	۱۳/۴۶۶
ج	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰	۴۹/۵۲۱	۴۲/۵۸۲
د	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۵۶/۶۰	۱۳۴/۶۵۰

در روش اول هـر یـک از ۱۸۰۰۰ بـار درنظـر گرفته شده برای هر یک از چرخ‌ها، در هر مرحله جداگانه به آنها اعمال شده و تحلـیل تـنش بصـورت اسـتاتیکی انجـام می‌پذیرد. سپس تاریخچه تنش بدست آمده با استفاده از روش شمارش جریان باران اصلاح شده، شمارش شده و عمر خودرو نهایتاً با استفاده از قانون ماینر محاسبه می‌شود.

در روش دوم هـر یـک از بارهـا بصـورت دینامیکـی در فاصله‌های زمانی ۲/۵میلی ثانیه به خودرو اعمال شده و تحلیل تنش بـرای هـر یک از بارها جداگانه صورت گرفته، سپس تاریخچه تنش بدست آمده با استفاده از روش شمارش جریان باران اصلاح شده، شمارش شده و نهایتاً آسیب خستگی با استفاده از روش ماینر محاسبه می‌شود.

در روش سـوم ابـتدا یـک تابـع بارگـذاری هارمونیک با دامنه واحد از نوع جابجایی، در محدوده فرکانسی صفر تا دویست را بـرروی هـر یـک از چهـار چـرخ اعمال کرده، سپس تابع انتقال، که بصورت نسبت تنش ون‌مایزز بر واحد بار در حوزه فرکانسی مـورد نظرتعـریف می‌شود، برای المان‌های مختلف بدست می آید. پس از آن چگالی‌های طیفی[5] و دیگر طیفی توان[6] ورودی‌ها محاسبه شده، نهایتاً با توجه به مقادیر بدست آمده برای تابع انتقال و چگالی طیفی و دیگر طیفی توان، تاریخچه تنش در حوزه فرکانس محاسبه می‌شود. سپس آسیب خستگی با استفاده از روابط ارتعاشات اتفاقی بدست می آید.



شکل (۲) سطوح مختلف ارتباط بین فرکانس طبیعی خودرو و محدوده فرکانس بارگذاری،حالت‌های (الف)، (ب)، (ج) و (د).

جمع‌بندی و نتایج

شکل(۳) آسیب‌های خستگی را برای خودرو اصلاح شده در حالت‌های (الف)، (ب)،(ج) و (د) در یک مجموعه المان مشخص با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل نشان می‌دهد. در این گرافها، آسیب‌های بدست آمده از تحلیل گذارا بصورت نزولی مرتب شده و نتایج تحلیل‌های هارمونیک و استاتیک نیز بر اساس شماره المان‌های مرتب شده تحلیل گذرا، نشان داده شده است. همانطورکه در شکل (۳ـ الف)، مشاهده می شود، هر دو روش تحلیل تنش استاتیکی تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه زمانی و روش تحلیل تنش هارمونیک تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه فرکانسی، میزان آسیب خستگی را کمتر از مقادیر تخمین زده شده در تحلیل تنش گذرای تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه زمانی تخمین می‌زنند. می‌توان نتیجه گرفت که روش تحلیل تنش هارمونیک تلفیقی با تکنیک تخمین عمر حوزه فرکانسی و همچنین روش تحلیل تنش استاتیکی را نمی‌توان با دقت خوبی برای پیش‌بینی آسیب ناشی از خستگی یک جزء که یک یا چند فرکانس طبیعی آن با محدوده فرکانس توابع نیرویی تداخل داشته است، بکار برد. با این وجود دقت روش تحلیل تنش هارمونیک در حوزه فرکانس بیشتر از روش تحلیل تنش استاتیکی تلفیقی با حوزه زمان است. در حالت (ب)(شکل(۳ـ ب)) همچنان روش تحلیل تنش استاتیکی، آسیب را به میزان قابل توجهی کمتر از روش تحلیل تنش گذرا تخمین می‌زند، اما روش تحلیل تنش هارمونیک حوزه فرکانسی با خطای کمی، آسیب خستگی را بیشتر تخمین می‌زند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که روش تحلیل تنش هارمونیک تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه فرکانسی را می توان به عنوان جایگزین خوبی برای پیش‌بینی آسیب خستگی یک جزء که اولین فرکانس طبیعی آن بین حد بالایی فرکانس توابع نیرویی و حدود پنج برابر بیشترین فرکانس تابع انتقال باشد، بکار برد.

در حالت‌های (ج) و (د) مشاهده می‌شود که هر چه اختلاف اولین فرکانس طبیعی سازه و بیشترین فرکانس مهم تابع انتقال افزایش می‌یابد، روش تحلیل تنش استاتیکی تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر خستگی حوزه زمانی، جواب‌های منطبق‌تری با روش تحلیل تنش گذرای حوزه زمانی می‌دهد بطوریکه در حالت(د)، نتایج هر دو روش بر هم منطبق شده‌اند. لذا می‌توان گفت که روش تحلیل تنش استاتیکی تلفیقی با استراتژی ارزیابی حوزه زمانی را برای حالت‌هایی که اولین فرکانس طبیعی جزء حداقل پنج برابر بیشتر از بیشترین فرکانس تابع انتقال باشد، می‌توان بکار برد.

بطور خلاصه مطالب فوق را می‌توان بصورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱ـ عمر خستگی محاسبه شده، تابعی از فرکانس می‌باشد.

۲ـ بکارگیری روش تحلیل تنش استاتیکی، برای ارزیابی عمر خستگی یک جزء تحت بارگذاری دینامیکی، با خطا همراه بوده و این خطا هنگامی که اولین فرکانس طبیعی قطعه و آخرین فرکانس تابع نیرو کم می‌شود، افزایش می‌یابد.

۳ـ روش تحلیل تنش استاتیکی تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه زمانی را می‌توان با دقت خوبی برای تخمین عمر وآسیب خستگی قطعاتی که اولین فرکانس طبیعی آنها حداقل پنج برابر آخرین فرکانس تابع نیرو است بکار برد.

۴ـ روش تحلیل تنش هارمونیک تلفیقی با استراتژی ارزیابی عمر حوزه فرکانسی را می‌توان برای پیش‌بینی آسیب ناشی از خستگی یک جزء که اولین فرکانس طبیعی آن بین حد بالایی فرکانس تابع انتقال و حدود پنج برابر آن می‌باشد باشد، با اطمینان و ایمنی بکار برد.

۵ـ در مواردی که تداخل بین فرکانس‌های طبیعی سازه و حوزه فرکانسی توابع نیرویی ورودی وجود دارد، نتایج تحلیل استاتیکی و هارمونیک، از دقت لازم برخوردار نمی باشد.

فهرست علائم انگلیسی

B	ثابت ماده
C	ثابت ماده
D	آسیب خستگی کل
D_i	آسیب خستگی در سطح تنش i
m_k	ممان kام طیف توان تنش
N	تعداد سیکل بارگذاری منجر به شکست

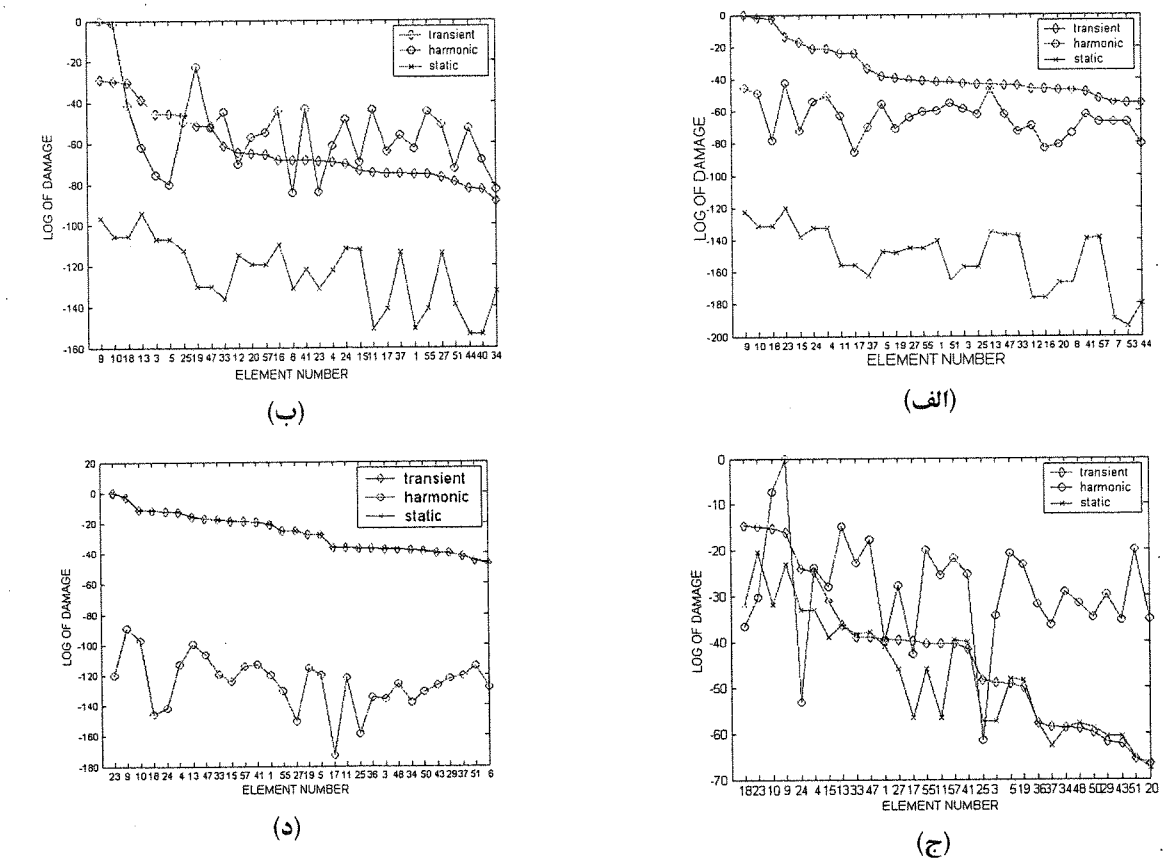
n_i	تعداد سیکل در iامین سطح تنش
N_i	تعداد سیکل منجر به شکست برای iامین سطح تنش
$P_p(S)$	تابع توزیع احتمال
S	دامنه تنش
T	زمان

فهرست علائم یونانی

υ_0	فرکانس عبوری از صفر با شیب مثبت
υ_p	فرکانس ماکزیمم‌های تاریخچه تنش
α	فاکتور پراکندگی
$\Gamma(\bullet)$	تابع گاما

زیرنویس‌ها

1- Auto correlation
2- Rain flow method
3- Stationary Narrow Band Process
4- Irregularity Factor
5- Rain Flow Method
6- Power Spectral Density
7- Cross Spectral Density



شکل (۳) توزیع عمر برای یک مجموعه المان از خودرو در حالت‌های (الف)، (ب)، (ج) و (د).

مراجع

[1] SH .Crandall, WD. Mark, Random vibration in mechanical systems, New York: Academic Press, 1963.
[2] DE. Newland, An introduction to random vibration and spectral analysis, New York: Longman, 1984
[3] M A . Miner, Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics 1945; September: A159–164.
[4] H O .Fuchs, RI. Stephens, Metal fatigue in engineering, New York: Wiley, 1980.
[5] NE. Dowling, Fatigue failure predictions for complicated stress–strain histories, Journal of Materials 1972;

1(1):71–87.
[6] R. Zheng, BR. Ellingwood, Stochastic fatigue crack growth in steel structures subject to random loading, Structural Safety 1998;20(4):303–23.
[7] NWM. Bishop, R. Wang, L.A .Lack, frequency domain fatigue predictor for wind turbine blades including deterministic components, In: The 17th British Wind Energy Association Conference, Warwick: British Wind Energy Association, 1995.
[8] N. Ohrlof, A. Gysler, G. Lutjering, Fatigue crack propagation behavior under variable amplitude loading. In: Petit J et al, editors. Proc 3rd Int Conf on Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, Paris, 1987.
[9] NWM. Bishop, Z. Hu, R. Wang, Fast frequency domain fatigue life assessment of wind turbine blades. In: The 14th British Wind Energy Association Conference, Nottingham: British Wind Energy Association, 1992.
[10] M. Haiba, DC .Barton, PC .Brooks, MC. Levesley, Review of life assessment techniques applied to dynamically loaded automotive components, Computers and Structures 2002; 80:481–94.
[11] L .Huang, H .Agrawal, P. Kurudiyara, Dynamic durability analysis of automotive structures, SAE, 1998 Paper No. 980695.
[12] M .Anvari, B.Beigi, Automotive body fatigue analysis: inertia relief or transient dynamics?, SAE, 1999, Paper No. 1999-01-3149.