پیش‌بینی عمر خستگی تیرهای روشنایی با وجود ترک اولیه صفر درجه تحت اثر وزش باد

محمدجعفر استاد احمد قرابی[1*]، سوگند مسلمی مهنی[2]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی** ، سمنان، ایران
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی** ، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی: ۱۷۹-۳۵۱۴۱، jafarghorabi@gmail.com

چکیده

در این مقاله به بررسی عمر و نیز رشد ترک خستگی در تیرهای چراغ برق شکسته شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان تحت بار اعمالی وزش باد پرداخته شده است. در ابتدا سعی شده تا مدل المان محدودی از سازه با در نظر گرفتن کلیه شرایط بارگذاری در نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شود. بدین صورت که سازه متشکل از دو قسمت پایه و بازویی فرض شده که در بازویی یک فاق با ترک اولیه در گوشه بالا سمت راست آن با طول اولیه ۲ میلی‌متر و زاویه صفر درجه وجود داشته باشد. با اعمال تنش‌های وارده بر سازه بصورت چرخه‌ای با دامنه متغیر و نیز جهات مختلف بر اساس داده‌های اداره هواشناسی شهر سمنان و در نظر گرفتن ۳ روز طوفانی به عنوان بدترین شرایط بارگذاری، به تحلیل عمر خستگی سازه پرداخته شده است. در نهایت عمر خستگی سازه در حدود ۹ سال بدست آمده است.

کلیدواژگان

خستگی در تیرهای برق، وزش باد، بارگذاری تصادفی، رشد ترک

۱- مقدمه

تأثیر یک سیستم روشنایی در خیابان‌های شهر جهت آسایش و راحتی در رانندگی امری بدیهی است ولی میزان اثر آن در جاده‌های بین شهری و اتوبان‌ها بیشتر دیده می‌شود که ارتباط مستقیم با میزان تصادفات رانندگی در شب را داشته و اغلب خسارات زیان‌بار و جبران ناپذیر را به راننده و دیگران وارد می‌سازد.

از جمله مسائلی که در چراغ‌های برق و دیگر سازه‌های مشابه مثل دکل‌های روشنایی، دکل‌های آنتن و .... باید مورد بررسی و توجه قرار گیرد، علاوه بر میزان روشنایی و در پی آن اندازه پایه و بازویی و زاویه تابش نور، ارتعاشات وارده بر سازه در اثر سرعت و نیز جهت وزش باد است. بدین منظور لازم است تا رفتار دینامیکی سازه تحت اعمال ترکیبی از بارگذاری‌ها شامل سرعت و جهت وزش باد مورد بررسی قرار گیرد.

در هنگام ساخت سازه چراغ‌های روشنایی، در قسمت پائینی پایه یک فاق مستطیل شکل به منظور عبور کابل‌های برق ایجاد می‌شود که اغلب دارای لبه‌هایی تیز بوده و در برخی از موارد که افراد با تجربه برای نصب بکار گرفته می‌شوند، گوشه‌های تیز را پخ می‌زنند و به شکل انحنا دار برش می-دهند.

اینگونه سازه‌ها تحت بارهای نوسانی ناشی از وزش باد که دو عامل سرعت و جهت بر آن تأثیرگذار هستند، قرار گرفته و پس از مدتی دچار پدیده خستگی شده و پس از رشد ترک خستگی تا حد بحرانی خود، سازه می‌شکند. از آنجا که شکست خستگی بدون هیچ‌گونه اخطار قبلی و بصورت ناگهانی رخ می‌دهد، بسیار خطرناک بوده و باید مطالعات عمیق و دقیقی بر روی این پدیده و نیز پیش‌بینی عمر سازه تا شکست در اثر آن صورت پذیرد.

با توجه به شکل هندسی و نیز مشخصات سازه، ترک خستگی ممکن است از دو ناحیه رشد کند و باعث شکست شود:

۱- گوشه‌های نوک تیز فاق ایجاد شده در پایه و

۲- اتصالات پایه به بستر زمین که می تواند از نوع پیچی و یا در اکثر موارد جوش باشد.

در این تحقیق فرض بر رشد ترک از گوشه بالایی سمت راست فاق بوجود آمده در پایه گذاشته شده است و بر اساس آن رفتار خستگی سازه تحت بار وزش باد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

اندریو استام و همکارانش [۱] به بررسی عمر خستگی صفحات فولادی مرتبط با تیرهای برق (تیرهای چراغ راهنما و رانندگی) برای ساختارهای ترافیکی پرداختند. در این راستا تحلیل المان محدود از عملکرد خستگی سازه مورد نظر مشتمل بر اتصالات صفحه‌ای، قسمت بالای بازویی دکل روشنایی، پایه لوله‌ای شکل عبور کابل‌ها و .... را مورد بررسی قرار دادند.

روبرت کونور و همکارانش [۲] به بررسی رشد ترک خستگی و نیز بازرسی از قسمت بالای دکل‌های روشنایی برج‌ها پرداختند. در این مسیر به مطالعات عمیق آزمایشگاهی روی رفتار و پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند دکل‌های روشنایی در ارتباط با شکست‌های خستگی پرداخته شده ، بطوریکه بیشترین توجه بر روی ضخامت صفحه فولادی پایه و نیز توزیع تنش روی دیواره سازه و در اتصالات جوشی آن بوده است.

ژوزف روود [۳] رساله کارشناسی ارشد خود را با عنوان عملکرد خستگی برنج در تیرهای روشنایی انجام است. در این پایان‌نامه، آزمایش‌های خمشی بر روی نیمی از سازه‌های دانشکده راه و ترابری توسط انجمن توسعه مس انجام شده است. ۳۶۰ نمونه برنجی فاق‌دار با برش فاق مربعی شکل از بیرون به عمق ۰/۱۵ در طراحی اولیه مورد بررسی قرار گرفت. ضریب تمرکز تنش در قسمت فاق توسط اندازه‌گیری کرنش تعیین و برابر ۵/۷ گزارش گردید که خیلی بزرگتر از مقدار بدست آمده آن از روش تنش‌های تئوری یعنی ۴/۷ بوده است. آزمون‌های خستگی بر روی نمونه‌های اولیه فاق‌دار به صورت کشش-فشار توسط روش کنترل نیرو انجام شد، که در نتیجه ضریب تمرکز تنش تحت بار اعمالی کششی برابر با ۷/۲۶ و تحت بار اعمالی فشاری برابر با ۶/۸۰ بدست آمد. در نهایت، یک طرح جدید بر اساس طراحی قبلی و با تغییرات جزئی ارائه گردید که در آن شعاع خارجی فاق را افزایش داده و در ادامه با انجام دوباره آزمون‌ها بر روی نمونه‌های طرح جدید، افزایش عمر خستگی سازه گزارش گردیده است.

پت مانیس و همکارش [۴] به بررسی ارتعاشات ناشی از باد بر روی سازه دکل‌های روشنایی پرداخته است. در این تحقیق تمام چراغ‌های برق بطور نوسانی تحت وزش بادهایی با سرعت‌های بین ۱۷ تا ۲۸ مایل در ساعت و نیز طوفان‌هایی با سرعتی بالای ۴۸ مایل بر ساعت مورد بررسی قرار گرفتند که در طی آن تغییرات جابجایی برای تیر در حدود ۸ تا ۱۲ اینچ گزارش شده است. در پی آن برخی از تیرها دچار شکست از نقطه اتصال جوشی شده‌اند که با بررسی‌های انجام شده علت اصلی آن رشد ترک خستگی در سازه گزارش شده است. لذا تدابیری برای نگه داشتن بقیه سازه‌های در حال کار اندیشیده شد تا آنها با چنین شکستی مواجه نشوند.

۳- توصیف هندسی مدل تیر روشنایی

در این پژوهش، سازه متشکل از دو قسمت در نظر گرفته شده است:

۱- پایه تیر

۲- بازویی بالای تیر که روشنایی در آن قسمت قرار می‌گیرد.

در ابتدا با توجه به مشخصات دریافتی از اداره راه و ترابری شهر سمنان (جدول۱) هر دو قسمت سازه مدل‌سازی شده و سپس در مرحله بعدی در پایه و در فاصله نیم متری از سطح زمین و دقیقاً در راستای زیر بازویی روشنایی یک فاق مستطیل شکل (دریچه‌ای به منظور عبور کابل و سیم درون تیر) ایجاد شده است. در ادامه ترک اولیه با طول ۲ میلی‌متر و زاویه صفر درجه در گوشه بالا سمت راست دریچه ایجاد گردیده تا بتوان شکست سازه را از آن ناحیه مورد بررسی و تحلیل قرار داد. مشخصات هندسی تیر چراغ برق در جدول-۱ آمده است.

جدول۱ مشخصات هندسی تیر چراغ برق

	طول (متر)	قطر (میلی متر)	ضخامت (میلی متر)	زاویه (درجه)
پایه تیر	۷	۸۹	3.6	۹۰
بازویی روشنایی	1	28	2.1	30

۴- شبیه‌سازی المان محدود

۴-۱ شبکه‌بندی مدل هندسی

در مدل ارائه شده از المان مربعی شکل استاندارد خطی با ویژگی تنش-های سه بعدی به منظور شبیه‌سازی المان محدود قسمت‌های پایه و بازوی روشنایی تیر چراغ برق و نیز المان یک بعدی سینگولار به منظور شبیه‌سازی ترک و رشد آن استفاده شده است و می‌توان نمایی از فاق تیر که شبکه بندی نیز شده است را در شکل۱ مشاهده نمود.

المان انتخابی برای ترک از نوع سینگولار است، زیرا که هدف از این پژوهش، تحلیل رشد ترک خستگی در سازه و نیز بررسی و مطالعه خستگی پرچرخه مدنظر بوده است. به همین علت تئوری‌های الاستیسته جوابگو می-باشد و می‌توان با دقت خوبی از پلاستیسیته مسئله صرف نظر کرد. لذا المان سینگولار مناسب دیده شده و هر چقدر که به نوک ترک نزدیک شویم بر مقدار تنش افزوده می‌شود تا جایی که به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد. از طرفی نیز به دلیل بررسی عمر خستگی سیستم در منطقه پر چرخه، نیازی به وارد کردن معادلات در ارتباط با تغییر شکل پلاستیک نبوده و روابط الاستیک به خوبی قابل استفاده است.

شکل۱ مدل المان محدود سازه با وجود دریچه مربعی شکل در ارتفاع نیم متری از سطح زمین به همراه ترک اولیه |

۴-۲ جنس مواد

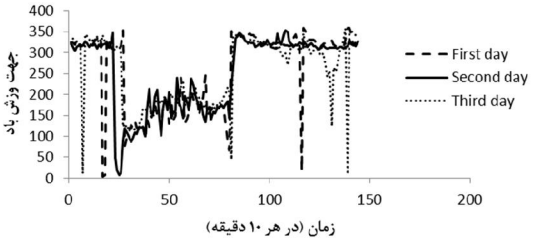
جنس سازه از فولاد ساختمانی S235JR (EN10025) با مشخصات مکانیکی مطابق با جدول۲ در نظر گرفته شده است.

جدول۲ مشخصات مکانیکی فولاد ساختمانی [۵]

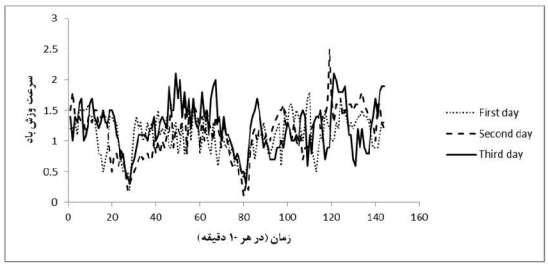
استحکام کششی	تنش تسلیم	درصد افزایش طول
310 MPa	230 MPa	25%

۴-۳ اطلاعات بارگذاری

اطلاعات مربوط به تاریخچه وضعیت آب و هوایی شامل زمان، جهت و سرعت وزش باد مربوط به شهر سمنان از مرکز اداره هواشناسی تهیه شده است. بر اساس این داده‌ها، اطلاعات مربوط به ۳ روز که دارای بدترین شرایط (تقریباً آب و هوای طوفانی) را در نظر گرفته و تغییرات جهت و سرعت وزش باد در هر ۱۰ دقیقه اعمال شده، انتخاب شده است. می‌توان جهت و نیز سرعت وزش باد را بر حسب زمان بصورت تاریخچه بارگذاری به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲ تغییرات جهت وزش باد در روزهای (مراحل) مختلف از تاریخچه بارگذاری [۶]



شکل ۳ تغییرات سرعت وزش باد در روزهای (مراحل) مختلف از تاریخچه بارگذاری [۶]

۴-۳-۱ تخمین تنش وارده بر سازه بر اثر سرعت وزش باد

اکثر روش‌های منتشر شده از نقشه‌های توزیع باد جغرافی‌دان‌ها و یا از جداولی که باید آنها در این رابطه استفاده نمایند، استخراج گردیده. لذا استانداردهای مختلف به همراه نظریه و فرمول‌های مختلفی برای محاسبه فشار بوجود آمده در اثر سرعت باد ارائه گردیده است که با استفاده از این نظریه‌ها می‌توان فشار وارد بر سازه‌ای را که تحت بار اعمالی وزش باد با سرعت مشخص است را بدست آورد. برخی از روش‌های منتشر شده کاربردی عبارتند از [۷]:

- ✓ روش کلی (***Generic Form***)
- ✓ روش کلی تصحیح یافته (***Modifications to the Generic Form***)
- ✓ روش صنایع الکترونیک (***EIA-222-F***)
- ✓ کد ساختمان‌های یکنواخت (***UBC '97***)
- ✓ ***EIA-RS-409***

در این پژوهش از روش اول استفاده شده است. بدین ترتیب که *[۷]*:

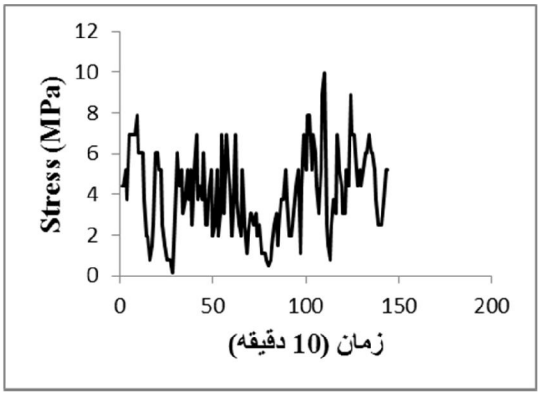
$$F = A \times P \times Cd \rightarrow \frac{F}{A} = P \times Cd \rightarrow \sigma = P \times Cd \qquad (۱)$$

$$P = .00256 \times V^2 \qquad (۲)$$

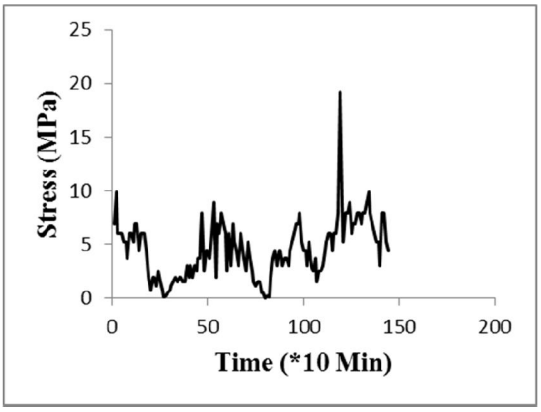
در روابط بالا، F نیروی بوجود آمده در اثر وزش باد، P فشار باد و Cd ضریب دراگ باد است.

برای بدست آوردن فشار باد بر حسب سرعت وزش باد، رابطه‌ی (۲) ارائه گردیده و نیز برای اشکال طویل سیلندری شکل مانند لوله‌های آنتن و تیر روشنایی و .... مقدار ضریب دراگ باد برابر *1.2* گزارش گردیده است *[۷]*.

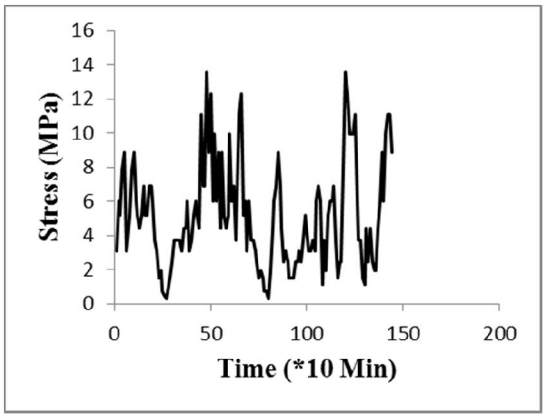
با توجه به روابط بیان شده در بالا و مشخص بودن سرعت وزش باد بر حسب زمان، نمودارهای تنش بوجود آمده برای سه روز بارگذاری در شکل-های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴ تنش وارده بر سازه در اثرتغییرات سرعت وزش باد در روز اول به عنوان مرحله اول از تاریخچه بارگذاری



شکل ۵ تنش وارده بر سازه در اثرتغییرات سرعت وزش باد در روز دوم به عنوان مرحله دوم از تاریخچه بارگذاری



شکل ۶ تنش وارده بر سازه در اثرتغییرات سرعت وزش باد در روز سوم به عنوان مرحله سوم از تاریخچه بارگذاری

۵- پیش‌بینی عمر خستگی سازه

در ابتدا به تحلیل تنش مدل المان محدود سازه پرداخته شده و گزارشی از نتایج استخراج شده حاصل از این تحلیل در جدول۴ آورده شده است، به طوری که ماکزیمم تنش‌های ایجاد شده در تمام راستاها در نوک ترک بوجود آمده است، که این مطلب نشان‌دهنده صحت انجام مدلسازی و در پی آن تحلیل تنش می‌باشد. چرا که بیشترین ضریب تمرکز تنش در سازه، مربوط به نوک تیز ترک است. البته قابل پیش‌بینی بود که بیشترین تنش را در آن نقطه خواهیم داشت.

جدول۴ نتایج استخراج شده از تحلیل تنش مدل ارائه شده برای تیر چراغ برق با وجود ترک اولیه در گوشه بالا سمت راست فلق در نرم افزار

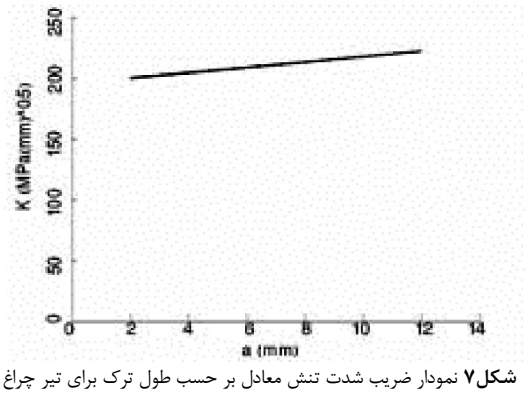
مولفه‌های تنش	تنش مینیمم (مگاپاسکال)	تنش ماکزیمم (مگاپاسکال)
S11	*-53.4*	*70.13*
S22	*-43.56*	*28.4*
S33	*-147.9*	*107.1*

در ادامه به بررسی رشد ترک خستگی در مدل ارائه شده پرداخته شده است و بر اساس آن عمر خستگی سازه تحت بار اعمالی بدست آمده است.

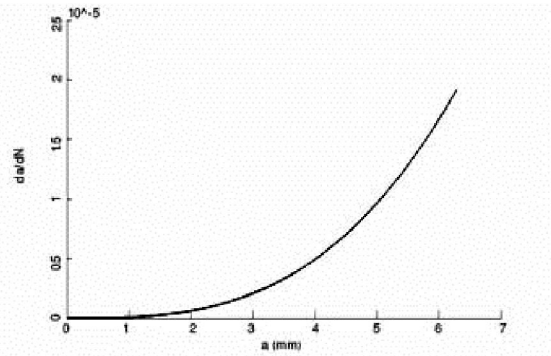
در ابتدا با رشد مرحله به مرحله ترک با طول اولیه، ضرایب شدت تنش در شکل مودهای مختلف شکست بدست آمده است و سپس با استفاده از رابطه بیشینه ضریب شدت تنش معادل بر اساس معیار بیشینه تنش محیطی جهت رشد ترک، منحنی ضریب شدت تنش معادل بر حسب طول ترک برای مدل ارئه شده مطابق با شکل۷ بدست آمده است. در ادامه بر اساس رابطه فورمن (که تنها تفاوت آن با رابطه پاریس در مقدار نسبت تنش است چرا که زمانی می‌توان از رابطه پاریس استفاده کرد که بارگذاری با نسبت تنش صفر باشد ولی در رابطه فورمن برای بار خستگی، نسبت تنش R مخالف صفر است) منحنی سرعت رشد ترک بر حسب طول ترک برای مدل ارائه شده در شکل۸ نشان داده شده است.

با ساده‌سازی معادلات فورمن (رابطه-۳) و نیز جایگذاری پارامترهای بدست آمده بالا در روابط، به کمک کد نویسی در نرم افزار متلب به محاسبه عمر خستگی مدل پرداخته شده است.

$$\frac{da}{dN}=\frac{C\Delta K^m}{(1-R)(K_c-K_{max})} \qquad (۳)$$



شکل۷ نمودار ضریب شدت تنش معادل بر حسب طول ترک برای تیر چراغ برق با ترک اولیه



شکل۸ نمودار سرعت رشد ترک بر حسب طول ترک برای تیر چراغ برق با ترک اولیه

بدین ترتیب که عمر قطعه تا شکست نهایی بر اساس تعداد سیکل بدست آمده و با استفاده از روابط موجود بین زمان بارگذاری در هر مرحله و سیکل و تعداد سیکل های لازم تا شکست، عمر خستگی سازه را بر حسب روز و سال نیز در جدول ۵ گزارش شده است.

در رابطه فوق به منظور بدست آوردن عمر خستگی سازه، ثوابت مواد از $[\lambda]$ استخراج شده و برای فولاد سازه تیر ($m=3$ و $C=6.9e^{-12}$) در نظر گرفته شده است.

جدول۴ گزارش عددی از عمر خستگی تیر چراغ برق با ترک اولیه صفر درجه

مدل	تعداد سیکل خستگی	عمر خستگی سازه بر حسب روز	عمر خستگی سازه بر حسب سال
تیر چراغ برق با وجود ترک اولیه	*46130* *4*	*3204*	*8.77*

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سعی شده است که بدترین شرایط آب و هوایی را از نظر سرعت وزش باد در نظر گرفته شود و بر اساس این فرض، عمر خستگی تیر چراغ برق با وجود ترک اولیه با طول اولیه ۲ میلی‌متر و زاویه صفر درجه در حدود ۹ سال بدست آمده است. این عدد بر مبنای بارگذاری بصورت تغییرات سرعت و جهت وزش باد بصورت توابعی ارتعاشاتی اعمال گردیده است و از تغییرات دمایی در طول شبانه روز و تأثیر آن بر روی عمر خستگی سازه صرف نظر شده است. لذا، پیشنهاد می‌گردد که تغییرات دمایی نیز در پژوهش‌های آتی در نظر گرفته شود و بارگذاری بصورت ترکیبی از مولفه های سرعت و جهت وزش باد و دما اعمال گردد. به عبارت دیگر مسئله از دیدگاه ارتباط ساختار و حرارت مورد بررسی قرار گیرد.

این پژوهش به نوبه خود تحقیقی کاربردی است و نتایج بدست آمده در صنعت راه و ترابری کشور و مباحث اطمینان از عملکردهای سازه‌ای آن‌ها بکار می‌آید. راهکار تحلیلی ارائه شده می‌تواند در جهت صرفه‌جویی زمانی و مالی به عنوان جایگزین برای آزمایش‌های پرهزینه، بسیار سودمند باشد.

۷- مراجع

[1] A. Stam, N. Richman, C. Pool, C. Rios, T. Anderson, K. Frank, “Fatigue Life of Steel Base Plate to Pole Connections for Traffic Structures”, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2011
[2] J. Conner, C. Hodgson, “Fatigue Cracking and Inspection of High-mast Lighting Towers”, Iowa DOT, IBC-05-31
[3] J.T. Rudd, “Fatigue Performance of Brass Light Pole Couplings”, Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010
[4] P. Manis, P.E. Wes Jones, “Wind induced vibrations on light standards”, structure magazine, 2008
[5] جی. وی. وگزت، مترجم: ع. ولی نژاد، "جداول و استانداردهای فولاد"، نشر طراح، چاپ دوم، تابستان 1378
[6] داده های مربوط به وضعیت وزش باد، اداره آب و هواشناسی، شهر سمنان، پاییز 1392
[7] D. B. Leeson, Book of Physical Design of Yagi Antennas, American Radio Relay League, 1992
[8] R. Stephens, A. Fatemi, H. O. Fuchs, “Metal Fatigue in Engineering”, Wiley Publisher, Second Edition, 2000