

مطالعه تطبیقی روش اولین مرتبه قابلیت اطمینان بر مبنای تندترین شیب

جهت تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌ها

حامد مخدومی^۱، بهروز کشته‌گر^{۲*}

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سراوان ۲- دانشیار، دانشگاه زابل

(دریافت: ۹۶/۴/۲۲، پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۰)

چکیده

برآورد احتمال خرابی سازه‌ها به ازای عدم قطعیت بارهای وارده از جمله بار انفجار، بارهای ثقیلی و جانبی و نیز تغییر در خصوصیات مصالح اجزای سازه‌ای در برآورد سطح ایمنی حائز اهمیت است. از این رو، تحلیل قابلیت اعتماد سازه می‌تواند برآورد مناسبی از سطح ایمنی سازه به واسطه تغییر بارهای وارده و نیز کاهش مقاومت ارائه دهد. در این مقاله سه الگوریتم روش اولین مرتبه قابلیت اطمینان (FORM) بر مبنای تندترین شیب، برای ارزیابی احتمال خرابی اجزای فولادی که بر مبنای آیین‌نامه فولاد ایران طراحی شده‌اند، بکار گرفته شده است. روش FORM بر اساس طول گام دینامیکی با نام روش اصلاحی هاسوفر-لیند و راکویتز-فیزلر (MHL-RF) ارائه شده است طول گام دینامیکی بر اساس یک تابع شایسته در هر تکرار عددی بین ۰ و ۱/۵ تنظیم می‌گردد. خصوصیات همگرایی از جمله کارایی و تعداد تکرار روابط اولین مرتبه قابلیت اطمینان FORM مانند روش‌های هاسوفر-لیند، راکویتز-فیزلر HL-RF، گرادیان و روش ارائه‌شده MHL-RF باهم با چهار مثال شامل یک عضو فولادی کششی، یک تیر چند دهانه تحت خمش، یک اتصال فولادی تحت بار کششی و یک ستون تحت بار محوری مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که همه روش‌های قابلیت اطمینان بر مبنای تندترین شیب، همگرایی خوبی دارند، اما روش MHL-RF نسبت به روش‌های HL-RF و گرادیان از کارآمدی بالاتری برخوردار است. اجزاء فولادی طراحی شده بر اساس آیین‌نامه ساختمان ایران یک سطح اطمینان خوبی تحت بار محوری با یک شاخص اطمینان در حدود ۲/۵ تا ۳ را می‌توانند از خود نشان دهند.

کلیدواژه‌ها: تحلیل قابلیت اطمینان، روش اصلاح شده HL-RF، سازه‌های فولادی، تابع حالت حدی

Comparative Study of First Order Reliability Method Based on Steepest Descent Search Directions for Reliability Analysis of Steel Structures

H. Makhdoumi, B. Keshtegar*

University of Zabol

(Received: 13/07/2017; Accepted: 11/03/2018)

Abstract

The reliability assessment of structures under uncertainties in external loads including blast, gravity and lateral loads and also material properties change, is important to determine the reliable levels of structures. Therefore, the reliability analysis can be provided a suitable management from the reliable levels subjected to the increasing the loads and decreasing the resistance of structures. In this paper, three algorithms of first order reliability method (FORM) using steepest descent search direction are applied to evaluate the failure probabilities of structural steel problems which are designed by the Iranian National Building code. The FORM formula is modified based on a dynamic step size which is dynamically adjusted based on the merit functions between 0 and 1.5 named as modified Hasofer-Lind and Rackwitz-Fiessler (MHL-RF) method. The convergence performances for both robustness and efficiency of the gradient method, HL-RF and proposed MHL-RF were compared through four steel examples including a bar structure under tensile capacity, a multi-span beam under bending capacity, a connection under tension load and a column under axial force. The results illustrated that the all structural reliability methods-based steepest descent search direction are robustly converged, but the MHL-RF method is more efficient than the HL-RF and gradient method. The designed steel components by the Iranian National Building code where shown a good confidence levels with the reliability index in the range from 2.5 to 3.0.

Keywords: HL-RF Method, Reliability Analysis, Modified HL-RF, Steel Structures, Limit State Function.

۱. مقدمه

مبتنی بر ممان حاصل نگردد [۶]. روش‌های تحلیلی مانند FORM علاوه بر صحت برآورد، کارایی بالایی جهت تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها دارند. روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد استفاده وسیعی در کالیبراسیون روابط طراحی، استفاده در ترکیب بار و همچنین برآورد وضعیت سازه‌ها از حیث سلامتی و خرابی یا عملکرد مطلوب و نامطلوب به واسطه بارهای ناشناخته با توجه به صحت برآورد و سادگی‌شان دارند [۸ و ۹]. این روش در تحلیل قابلیت اعتماد تیرهای نانو کامپوزیت [۲۳]، مسائل هوافضا [۲۴]، مسائل دینامیکی وابسته به زمان [۲۵]، تیرهای بتنی تحت خوردگی [۲۶ و ۱۷] و نیز لوله‌های انتقال مایعات تحت کاهش مقاومت وابسته به زمان به واسطه خوردگی [۲۷] و [۲۸] می‌توان اشاره کرد.

هاسوفر و لیند [۱۰ و ۱۱]، یک روش تکراری جهت محاسبه احتمال خرابی بر مبنای جستجوی حداقل فاصله یک نقطه روی تابع شرایط حدی تا مبدا در فضای نرمال استاندارد بسط دادند که هدف آن پیدا کردن نقطه حداکثر محتمل بر اساس مدل بهینه‌سازی زیر است:

$$\text{Minimize } \beta = (U^T U)^{1/2} \quad (1)$$

subjected to $g(U) = 0$

که در آن، β شاخص قابلیت اعتماد و $g(U)$ تابع شرایط حدی یا تابع عملکرد در فضای نرمال استاندارد است. مدل مورد استفاده توسط هاسوفر و لیند برای متغیرهای نرمال توسعه داده شده بود که بعدها، این مدل بر اساس اطلاعات مربوط به تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی توسط راکویدز و فیسلر بسط داده شد. این رابطه سازی در تحلیل قابلیت اعتماد استفاده وسیعی دارد و با نام روش هاسوفر-لیند و راکویدز و فیسلر^۱ (HL-RF) نام‌گذاری شده است. روش HL-RF توسط لیو و درکیورخیان^۲ جهت افزایش توانمندی با استفاده از یک تابع شایسته بهبود یافته است. اخیراً، سانتوش و همکاران [۱۳] بر اساس قانده آرمیژو^۳ روش بهبود یافته HL-RF را ارتقاء دادند. روش ارتقاء یافته HL-RF برای توابع با نقاط بهینه محلی تحلیل نادرستی از برآورد احتمال خرابی ارائه داده است. بر اساس روش کنترل انتقال پایدار با استفاده از یک طول گام بسیار کوچک توانمندی روش HL-RF بهبود بخشیده شد [۹]. روش انتقال پایدار نسبت به روش HL-RF برای مسائل غیرخطی بسیار توانمندتر است اما، در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی حل ناپایداری به صورت مغشوش نشان داده است [۸]. اخیراً، روش‌های مبتنی بر امتداد جستجوی گرادیان مزدوج جهت

در سیستم‌های مهندسی غالباً، عدم اطمینان‌های متنوعی در فازهای تحلیل، طراحی، اجرای و بهره‌برداری در سیستم سازه‌ای ایجاد می‌گردد. روش تحلیل یک سیستم سازه‌ای، ساده‌سازی مدل تحلیلی سازه، فرضیات قابل‌فهم جهت تحلیل، انتخاب نادرست برخی از فرضیات، عدم دقت مدل تحلیلی، عوامل انسانی و طبیعی، ماهیت سیستم، تغییر در کاربری به واسطه مسائل امنیتی و میزان اطلاعات قبلی از جنبه‌های ناشناخته سیستم، ماهیت بارگذاری، خصوصیات مصالح و نیز ابعاد هندسی سیستم سازه‌ای می‌توانند از انواع مختلف عدم قطعیت باشند. بار انفجار، از جمله عوامل ناشناخته در بارگذاری است که، علاوه بر ماهیت تصادفی می‌تواند موجب زوال مقاومت سازه نیز گردد. همچنین، تغییر در کاربری سازه موجود به دلیل مسائل امنیتی می‌تواند موجب تغییر در سطح ایمنی آن گردد. تعدادی از این عدم اطمینان‌ها را می‌توان به کمک مدل‌های احتمالاتی مورد بررسی قرار داد. تحلیل قابلیت اعتماد یک ابزار مناسب جهت برآورد سطح ایمنی سازه‌ها در یک عملکرد مناسب است. برآورد سطح ایمنی به ازای بارهای وارده تصادفی مانند انفجار، مقاوم‌سازی و یا تغییر کاربری یک سیستم سازه‌ای با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد امکان‌پذیر است. جهت برآورد میزان خرابی به ازای بارهای ناشناخته و همچنین نحوه طرح ایمن و پایدار بر اساس عدم قطعیت، برآورد سطح ایمنی سازه‌ها موجود در سطح بهره‌برداری آیین‌نامه طراحی، می‌تواند تصمیم‌گیری مناسبی نسبت به نحوه مقاوم‌سازی و یا تغییر کاربری آن به طراحان ارائه دهد. عمدتاً، روش‌های تحلیلی ریاضی و روش‌های شبیه‌سازی در برآورد احتمال خرابی بر مبنای یک مدل احتمالاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از انواع روش‌های تحلیلی می‌توان به روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد [۲]، روش دومین مرتبه قابلیت اعتماد [۳] و روش‌های مبتنی بر ممان [۴] اشاره نمود. روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۵ و ۱]، شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای [۵] و شبیه‌سازی وزنی [۶] می‌توانند در برآورد احتمال خرابی مورد استفاده قرار گیرند.

روش‌های شبیه‌سازی در مسائل با احتمال خرابی پایین و نیز سازه‌های پیچیده مهندسی با تعداد متغیرهای زیاد، نیاز به شبیه‌سازی بالایی داشته‌اند، لذا، به لحاظ محاسباتی بسیار وقت‌گیر و ناکارآمد هستند [۷ و ۸]. اخیراً، کشته‌گر و کیسی [۲۱] نشان داده‌اند. روش مونت‌کارلو نسبت به روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد از دقت بالایی برخوردار است اما، برای مسائل با ابعاد بالا بسیار وقت‌گیر است. روش‌های مبتنی بر ممان نیازمند اطلاعات بالاتری از خصوصیات آماری تابع شرایط حدی است که با تغییر فرم تابع شرایط حدی، ممکن است پاسخ مناسبی از روش‌های

¹ Hasofer-Lind and Rackwitz-Fiessler

² Liu and Der Kiureghian

³ Armijo

لوگ-نرمال و گامیل در تحلیل قابلیت اعتماد استفاده شده است. برای این منظور از برنامه رایانه‌ای متلب استفاده شده که قادر به در نظر گرفتن خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی برای توابع شرایط حدی غیرخطی است. یک روش اصلاح‌شده بر مبنای تابع شایسته با طول گام بزرگ‌تر از یک جهت افزایش سرعت همگرایی و بهبود توانمندی روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد ارائه شده است. این روش برای چهار مثال سازه‌ای بر گرفته از طرح آیین‌نامه فولاد ایران با روش گرادیان و هاسوفر و لیند مقایسه شده است. میزان باربری سازه‌های فولادی با یک شاخص قابلیت اعتماد هدف برابر با ۳/۵ ارزیابی گردیده است. نتایج حاکی از آن است که روش ارائه‌شده کاربرد موفقیت‌آمیزی جهت برآورد احتمال خرابی دارد. مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف برای آیین‌نامه فولاد ایران در محدوده بین ۲/۵ تا ۳ محاسبه شده است.

۲. روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد

احتمال خرابی اعضای فولادی را می‌توان به کمک یک مدل احتمالاتی ($g(X)$) که شامل عدم اطمینان‌های مقاومت (مدول ارتجاعی، ابعاد، ضریب پواسون، تنش نهایی و تنش تسلیم) و بار (بارهای زنده و مرده، ظرفیت باربری) بر اساس انتگرال زیر محاسبه نمود [۱۱]:

$$P_f = \int_{g(X) \leq 0} f_X(x) dX \approx \Phi(-\beta) \quad (2)$$

که در آن P_f احتمال خرابی، $g(X)$ تابع شرایط حدی که در برگرفته انواع عدم اطمینان‌ها بر اساس متغیرهای تصادفی پایه X است. تابع شرایط حدی مرز به سلامتی $g(X) < 0$ و خرابی سازه $g(X) > 0$ را بیان می‌کند. هدف اصلی در روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد جستجوی نقطه حداکثر محتمل است که بر اساس آن می‌توان شاخص قابلیت اعتماد (β) را به صورت $\beta = \|U^*\|$ محاسبه نمود [۸]. از این رو، مطابق با رابطه ۲ احتمال خرابی به نقطه حداکثر محتمل در فضای نرمال استاندارد وابسته است. مشخص است که متغیرهای تصادفی از فضای حقیقی (X) بایستی به فضای نرمال استاندارد (U) متغیری با میانگین صفر و انحراف معیار واحد) با یک نگاشت به صورت $u = \Phi^{-1}\{F_X(x)\}$ انتقال یابند؛ لذا داریم که [۱۷]:

$$U = \frac{(X - \mu_X^e)}{\sigma_X^e} \quad (3)$$

که در آن μ_X^e و σ_X^e به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار معادل متغیرهای تصادفی هستند که برای متغیرهای تصادفی نرمال معادل با مقدار میانگین و انحراف معیار است. بر اساس تبدیل روزنبلات مقدار میانگین و انحراف معیار معادل متغیرهای غیرنرمال به صورت روابط زیر قابل محاسبه هستند [۱۱ و ۱۳]:

افزایش نرخ همگرایی و نیز دستیابی به نتایج پایدار توسط کشته‌گر و همکاران ارائه شده است [۸ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۹-۳۱]. روش‌های گرادیان مزدوج نسبت به روش‌های مبنی بر گرادیان ممکن است کارایی بالاتری داشته باشند اما، به لحاظ فرمول‌بندی بسیار پیچیده بوده و نیازمند یک معیار کنترل همگرایی مانند قانده آرمیثو [۸ و ۲۲ و ۲۹] و یا روش تندترین شیب [۲۸ و ۳۱] هستند. سادگی، کارآمدی و توانمندی یک رویه تکرار در روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد در برآورد صحیح احتمال خرابی حائز اهمیت است. برآورد صحیح از میزان ایمنی سازه‌های موجود می‌تواند، یک الگوی مناسب مدیریتی نسبت به تعمیر، تعویض و مقاوم‌سازی آن به ازای بارهای ناشناخته ارائه دهد. از این رو، برآورد شاخص سلامتی سازه‌های طراحی‌شده بر مبنای آیین‌نامه، می‌تواند نسبت به تصمیم‌گیری برای طراحی آینده با استفاده از یک طراح احتمالاتی کمک نماید. این تحقیق بر مبنای دو هدف اساسی تدوین گردیده است:

(۱) فرمول‌بندی یک روش ساده و کارایی قابلیت اعتماد.

(۲) محاسبه شاخص قابلیت اعتماد طراحی برای سازه‌های طراحی‌شده با آیین‌نامه فولاد ایران و نیز ارزیابی باربری سازه‌های موجود بر مبنای نظریه قابلیت اعتماد.

بر مبنای طرح آیین‌نامه ایران شایانفر و همکاران [۱۵] ضرایب بار و مقاومت را بر اساس روش اولین مرتبه دوم ممان با استفاده از نظریه قابلیت اعتماد محاسبه کردند. آن‌ها مقاومت فولاد را با تابع توزیع احتمال لوگ-نرمال شبیه‌سازی کردند و همچنین مقدار شاخص قابلیت اعتماد را با فرض توابع توزیع احتمال لوگ-نرمال برای یک تیر تحت خمش در حدود ۲/۵ برآورد نمودند. روش محاسبه قابلیت اعتماد آن‌ها بر مبنای تابع توزیع احتمال لوگ-نرمال بسط داده شده بود که اثر متغیرهای با توابع توزیع احتمال نرمال نمی‌توانست در مدل احتمالاتی وارد گردد. اژدری مقدم و کشته‌گر احتمال خرابی چندین عضو سازه‌ای فولادی طراحی‌شده بر مبنای آیین‌نامه فولاد سال ۱۳۸۳، را ارزیابی نمودند [۱۶]. آن‌ها در برآورد احتمال خرابی از روش HL-RF استفاده نمودند که کاربرد موفقیت‌آمیزی از آن را در برآورد احتمال خرابی نشان دادند. در این مقاله، به‌کارگیری سه روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد هاسوفر و لیند، گرادیان و یک روش اصلاح‌شده، در برآورد احتمال خرابی اجزای فولادی ارزیابی شده است. یک روش ساده بر گرفته از رابطه هاسوفر و لیند بر اساس یک تابع شایسته که کنترل‌کننده نرخ همگرایی آن است توسعه داده شده است. تابع شایسته بر اساس اطلاعات مربوط به تکرارهای جدید و قبلی قابل محاسبه بوده که بر اساس آن می‌توان یک طول گام دینامیکی بین ۰ تا ۱/۵ برای تنظیم نمود. از متغیرهای تصادفی نرمال و غیرنرمال با تابع توزیع احتمال

در روش گرادیان در هر گام تکرار اطلاعات مربوط به تابع شرایط حدی استفاده شده است. از این رو، در این روش نیازی به برقراری قید احتمالاتی رابطه (۱) به صورت تابع شرایط حدی برابر با صفر در هر تکرار نیست.

۲-۲- روش گرادیان

بر اساس طول گام برابر با واحد و بردار امتداد جستجوی روش گرادیان به صورت زیر است [۲]:

$$\mathbf{d}_k = \frac{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \mathbf{U}_k}{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \nabla g(\mathbf{U}_k)} \nabla g(\mathbf{U}_k) - \mathbf{U}_k \quad (۹)$$

در این روش در هر تکرار بایستی تابع شرایط حدی برقرار گردد (به صورت $\nabla g(\mathbf{U}_k) = 0$). لذا، جهت برقراری قید احتمالاتی مدل رابطه ۱ می‌توان از روش نیوتن در هر تکرار به منظور انتقال نقطه طراحی روی سطح خرابی به صورت زیر استفاده نمود [۲۰]:

$$\mathbf{U}_{k+1}^{i+1} = \mathbf{U}_{k+1}^i - \frac{g(\mathbf{U}_{k+1}^i)}{|\nabla g(\mathbf{U}_{k+1}^i)|^2} \nabla g(\mathbf{U}_{k+1}^i) \quad (۱۰)$$

روش گرادیان و هاسوفر و لیند بر مبنای تندترین شیب فرمول‌بندی شده‌اند. اما در روش گرادیان، نیاز به یک حلقه داخلی جهت برقراری تابع شرایط حدی و انتقال نقطه طراحی روی سطح خرابی در هر تکرار است لذا، افزایش محاسبات را منجر می‌گردد. از این رو، اگر چه تعداد تکرار این دو روش ممکن است مشابه با یکدیگر باشد اما، روش هاسوفر و لیند نسبت به روش گرادیان به دلیل کاهش حجم محاسبات ساده‌تر است. از طرفی مشخص است که در این روش‌ها طول گام برابر با واحد لحاظ شده لذا، رویه تکرار مبتنی بر این روش‌ها ممکن است مشکلات همگرایی مانند همگرایی همراه با نوسان برای توابع شرایط حدی غیرخطی و پیچیده سازه‌ای داشته باشند [۸، ۹، ۱۱ و ۱۹]. استفاده از طول گام برابر با واحد موجب می‌شود تا این روش‌ها نسبت به روش‌های اصلاح‌شده اولین مرتبه قابلیت اعتماد در مسائل خطی و با انحنای پایین همگرایی سریع‌تری داشته باشند. در روش‌های بهبودیافته اولین مرتبه قابلیت اعتماد، طول گام جهت دستیابی به نقطه پایدار، کمتر از یک در نظر گرفته شده است. به طوری که، در رویه انتقال پایدار [۹] و روش حداکثر طول گام [۱۸]، عدد کوچک در حدود ۰/۱ برای طول گام در هر تکرار لحاظ شده است. همچنین، در روش مغشوش گرادیان مزدوج [۸]، طول گام برابر با یک عدد مغشوش بین صفر و یک در تکرار انتخاب گردیده است. طول گام در روش‌های تعدیل [۱۷ و ۱۹] و گرادیان مزدوج [۱۱ و ۲۰] نیز به صورت دینامیکی عددی بین صفر و یک در هر تکرار تنظیم شده است. در این مقاله یک روش اصلاح‌شده هاسوفر و لیند توسعه داده می‌شود که علاوه بر سادگی، تکرار توانمند نیز باشد [۲۱].

$$\sigma_x^e = \frac{1}{f_x(x)} \phi[\Phi^{-1}\{F_x(x)\}] \quad (۴)$$

$$\mu_x^e = x - \sigma_x^e \Phi^{-1}[F_x(x)] \quad (۵)$$

که در آن ϕ و Φ به ترتیب تابع توزیع احتمال و توزیع تجمعی نرمال استاندارد، $f_x(x)$ و $F_x(x)$ به ترتیب تابع توزیع احتمال و تابع تجمعی احتمال متغیر تصادفی در نقطه است. جهت محاسبه نقطه حداکثر محتمل روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد متعددی مانند روش هاسوفر و لیند [۱۰ و ۱۲]، انتقال پایدار [۹]، گرادیان مزدوج [۱۱]، حداکثر طول گام [۱۸]، روش تعدیل [۱۷ و ۱۹] و روش مغشوش گرادیان مزدوج [۸ و ۳۱] ارائه شده است. هدف اصلی در توسعه روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد، دستیابی به یک نتیجه پایدار همراه با حداقل تعداد تکرار است. کشتگر [۸ و ۲۹-۳۱] نشان داد که روش هاسوفر و لیند، روش انتقال پایدار [۹] و روش حداکثر طول گام [۱۸] در برخی از مسائل سازه‌ای ناپایداری تکرار دارند. همچنین روش بهبودیافته هاسوفر و لیند مانند روش تعدیل [۱۹] و گرادیان مزدوج [۱۱] حل پایداری دارند اما در تحلیل مسائل قابلیت اعتماد به تعداد تکرار زیادی نیازمند هستند. روش هاسوفر و لیند علاوه بر سادگی، سرعت همگرایی بالایی در مسائل سازه‌ای دارد. این روش استفاده وسیعی در مسائل طرح بهینه و همچنین تحلیل قابلیت اعتماد دارد. در این مقاله، روش هاسوفر و لیند و روش گرادیان را که بر اساس تندترین شیب امتداد جستجو پایه‌گذاری شده‌اند، برای یافتن نقطه حداکثر بهینه توصیف می‌گردند.

۲-۱- روش هاسوفر و لیند

رویه تکرار اولین مرتبه قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت زیر رابطه‌سازی نمود:

$$\mathbf{U}_{k+1} = \mathbf{U}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (۶)$$

که در آن، α_k طول گام است. در روش هاسوفر و لیند طول گام در تمامی تکرارها برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. \mathbf{d}_k بردار امتداد جستجو است که به صورت زیر قابل محاسبه است [۲]:

$$\mathbf{d}_k = \frac{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \mathbf{U}_k - g(\mathbf{U}_k)}{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \nabla g(\mathbf{U}_k)} \nabla g(\mathbf{U}_k) - \mathbf{U}_k \quad (۷)$$

که در آن، $\nabla g(\mathbf{U}_k)$ بردار گرادیان تابع شرایط حدی $g(\mathbf{U}_k)$ در نقطه \mathbf{U}_k است. با جایگذاری رابطه فوق در رابطه (۶) و در نظر گرفتن طول گام برابر با واحد، رابطه تکرار اولین مرتبه قابلیت اعتماد بر اساس روش هاسوفر و لیند به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\mathbf{U}_k^{HL} = \frac{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \mathbf{U}_k - g(\mathbf{U}_k)}{\nabla^T g(\mathbf{U}_k) \nabla g(\mathbf{U}_k)} \nabla g(\mathbf{U}_k) \quad (۸)$$

۳. روش اصلاح شده هاسوفر و لیند

بر اساس رابطه (۶)، دو پارامتر طول گام و بردار امتداد جستجو، عوامل تأثیرگذار بر رویه تکرار اولین مرتبه قابلیت اعتماد است. طول گام مناسب می‌تواند کنترل‌کننده ناپایداری حل یک رویه تکرار جهت جستجوی نقطه حداکثر محتمل باشد. از این رو، در این مقاله طول گام رویه تکرار اصلاح شده هاسوفر و لیند به صورت دینامیکی بین ۱/۵ تا ۰ انتخاب می‌گردد. مقدار طول گام در هر تکرار بر اساس یک تابع شایسته تنظیم شده که تابع شایسته در هر تکرار به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$m(U_k) = \left\| U_k - \frac{\nabla^T g(U_k) U_k}{\nabla^T g(U_k) \nabla g(U_k)} \nabla g(U_k) \right\|^2 + g(U_k)^2 \quad (11)$$

مقدار عددی تابع شایسته فوق همواره عددی مثبت $m(U_k) \geq 0$ است. اگر $m(U_k)$ برابر با صفر گردد، الگوریتم ارائه شده همگرا گردیده است. این بدان معناست که $g(U_k)$ برابر با صفر شده از این رو، با فرض $g(U_k) = 0$ نقطه جدید را می‌توان بر اساس رابطه (۸) به صورت زیر تخمین نمود:

$$U_{k+1} = \frac{\nabla^T g(U_k) U_k}{\nabla^T g(U_k) \nabla g(U_k)} \nabla g(U_k) \quad (12)$$

و بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲)، نقطه U_k بر نقطه جدید منطبق است. لذا داریم که $U_{k+1} \approx U_k$. این بدان معناست که همگرایی حاصل شده و نقطه U_{k+1} یک نقطه ثابت است. از طرفی می‌توان بیان نمود که اگر $m(U_k)$ برابر با صفر گردد، بردار امتداد جستجوی تندترین شیب نیز برابر با صفر می‌شود ($d_k \approx 0$). در صورتی که، بردار امتداد جستجوی در راستای تندترین شیب حل ناپایداری را ارائه دهد، می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس روش هاسوفر و لیند مقدار بردار امتداد جستجو مقدار ناچیزی نخواهد شد. از این رو، در روش اصلاح شده فرض می‌گردد که طول گام ناپایداری بردار امتداد جستجو را بر اساس تابع شایسته ارائه شده کنترل نماید به نحوی $\alpha_k d_k \approx 0$ گردد. در روش اصلاح شده هاسوفر و لیند فرض می‌شود که $m(U_k) < m(U_{k-1})$ از این رو، بر اساس این فرض طول گام در هر تکرار به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha_{k+1} = \begin{cases} \frac{m(U_{k-1})}{m(U_k)} \alpha_k & m(U_k) \geq m(U_{k-1}) \\ \alpha_k & m(U_k) < m(U_{k-1}) \end{cases} \quad (13)$$

که در آن، مقدار اولیه طول گام برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شده است ($\alpha_0 = 1.5$). بر اساس رابطه فوق می‌توان نتیجه گرفت که $\alpha_{k+1} \leq \alpha_k$ و همان طوری که اشاره شد در صورتی که $m(U_k) < m(U_{k-1})$ ، لذا، $d_k < d_{k-1}$ و همچنین، $\alpha_k d_k < \alpha_{k-1} d_{k-1}$ ، اگر $m(U_k) \geq m(U_{k-1})$ ، مطابق با رابطه (۱۳) داریم که $\alpha_{k+1} < \alpha_k$ ، لذا، برای $k \rightarrow \infty$ ، $\alpha_{k+1} \rightarrow 0$ از

این رو، $\alpha_k d_k \approx 0$. اگر $\alpha_k d_k \approx 0$ ، نقطه جدید طراحی بر نقطه قدیمی منطبق می‌گردد. این بدان معناست که روش ارائه شده، همواره حل پایداری نشان می‌دهد و یک روش توانمند است. مشخص است که روش گرادیان و روش هاسوفر و لیند با طول گام برابر با واحد فرمول‌بندی شده‌اند لذا ممکن است این روش‌های مشکلات همگرایی مانند همگرایی همراه با نوسان و یا اغتشاش برای توابع شرایط حدی غیرخطی و پیچیده سازه‌ای داشته باشند [۸، ۹، ۱۱ و ۱۹]. تابع شایسته ارائه شده، تنظیم‌کننده طول گام به صورت دینامیکی در هر تکرار روش ارائه شده است. مشخص است این روش همانند روش هاسوفر و لیند ساده بوده و بر خلاف روش گرادیان نیاز به محاسبات بیشتر جهت انتقال نقطه طراحی روی سطح خرابی ندارد. برای مسائل پیچیده این روش می‌تواند همگرایی مناسب‌تری را نسبت به روش هاسوفر و لیند ارائه دهد.

در روش‌های بهبودیافته اولین مرتبه قابلیت اعتماد، طول گام جهت دستیابی به نقطه پایدار، کمتر از یک در نظر گرفته شده است. به طوری که، در رویه انتقال پایدار [۹] و روش حداکثر طول گام [۱۸]، عدد کوچک در حدود ۰/۱ برای طول گام در هر تکرار لحاظ شده است. همچنین، در روش مغشوش گرادیان مزدوج [۸]، طول گام برابر با یک عدد مغشوش بین صفر و یک در تکرار انتخاب گردیده است. طول گام در روش‌های تعدیل [۱۷ و ۱۹] و گرادیان مزدوج [۱۱ و ۲۰] نیز به صورت دینامیکی عددی بین صفر و یک در هر تکرار تنظیم شده است. در این مقاله یک روش اصلاح شده هاسوفر و لیند توسعه داده می‌شود که علاوه بر سادگی، می‌تواند برای برخی از مسائل طول گام بزرگ‌تری از واحد داشته باشد [۲۱]. در این روش مطابق با رابطه (۱۳)، در مسائل با درجه انحنا پایین طول گام ممکن است بزرگ‌تر از ۱ محاسبه گردد. این بدان معناست که روش ارائه شده ممکن است نسبت به روش هاسوفر و لیند سرعت همگرایی بالاتری داشته باشد. الگوریتم تکرار روش اصلاح شده هاسوفر و لیند بر اساس گام‌های زیر قابل تدوین در یک برنامه رایانه‌ای است:

۱- تعریف مسئله (g) و معیار همگرایی ($\varepsilon = 10^{-6}$)، خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی (میانگین، انحراف معیار و تابع توزیع احتمال هر متغیر تصادفی) و انتخاب شرایط اولیه به صورت $k=0$ ، $\alpha_0 = 1.5$ و $X_0 = \mu$

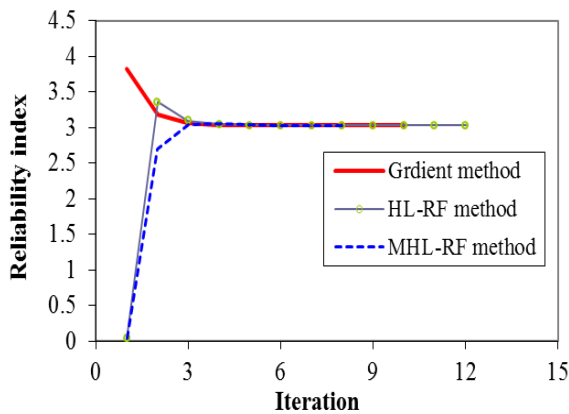
۲- انتقال متغیرهای تصادفی از فضای حقیقی به فضای نرمال استاندارد مطابق با (روابط ۳-۵)

۳- محاسبه بردار گرادیان و تابع شرایط حدی در نقطه U_k

۴- محاسبه تابع شایسته بر اساس رابطه ۱۱، اگر $k > 1$ سپس با توجه به رابطه ۱۳ طول گام جدید را تنظیم نمایید

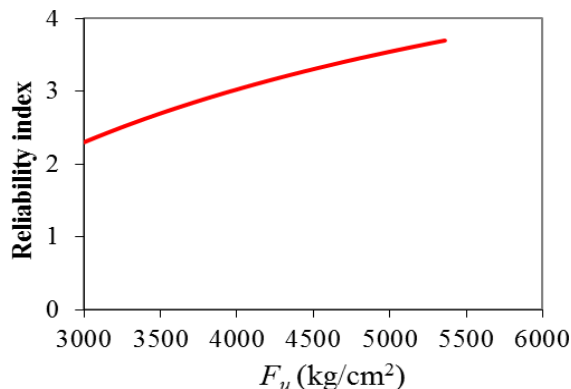
۵- محاسبه بردار امتداد جستجو بر اساس رابطه ۷

مقدار شاخص قابلیت اعتماد $\beta = 3/0.277$ و نقطه حداکثر محتمل بعد از همگرا شدن روش‌های تکرار مورد بررسی به صورت $[q, a, A, Fu] = [2/4714, 3/2967, 1/5955, 3218/9558]$ است. در شکل (۲) مقایسه‌ای از تاریخچه همگرایی روش‌های قابلیت اعتماد مورد بررسی گرادیان (Gradient method)، روش HL-RF و روش بهبودیافته HL-RF (MHL-RF method) نشان داده شده است. مشخص است که سه روش مورد بررسی به مقدار شاخص سلامتی یکسانی همگرا گردیده‌اند، اما تعداد تکرار مورد نیاز جهت همگرایی یکسان نتیجه نشده است و بیش‌ترین تکرار با توجه به روش HL-RF (۱۲ تکرار) نتیجه گردیده است. روش ارائه شده (MHL-RF) با ۸ تکرار سریع‌تر از دو روش دیگر همگرا شده است.



شکل ۲. مقایسه تاریخچه همگرایی شاخص قابلیت اعتماد برای مثال ۱

در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب شاخص قابلیت اعتماد نسبت به تغییرات متغیرهای تصادفی بار و مقاومت نشان داده شده است. از این شکل‌ها مشخص است، تغییرات یکسان بار و مقاومت نتایج احتمال خرابی یکسان ناست و این بر اساس شیب دو منحنی شاخص سلامتی نسبت به مقاومت (شکل ۳) و منحنی شاخص سلامتی نسبت به بار (شکل ۴) کاملاً مشهود است. شیب منحنی شاخص سلامتی نسبت به بار بیشتر از مقاومت نتیجه شده که نشان‌دهنده حساسیت خرابی این سازه نسبت به بار است.



شکل ۳. شاخص قابلیت اعتماد نسبت تغییرات مقاومت (F_u) برای

مثال ۱

۶- محاسبه نقطه جدید با توجه به رابطه ۶

۷- انتقال متغیرهای تصادفی از فضای نرمال استاندارد به فضای

$$X_{k+1} = \sigma_X^e U_{k+1} + \mu_X^e$$

حقیقی به صورت ۸- کنترل همگرایی به صورت $d_k < \epsilon$ در صورت برقراری توقف

در غیر این صورت $k=k+1$ و ارجاع به گام دوم

۹- محاسبه شاخص قابلیت اعتماد و احتمال خرابی

۴. نتایج و مثال‌های مقایسه‌ای از سازه‌های فولادی

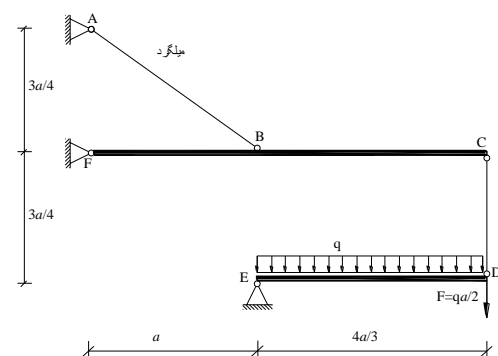
بر اساس سه الگوریتم هاسوفر و لیند، گرادیان و روش اصلاح‌شده هاسوفر و لیند چهار مثال سازه‌ای ارزیابی قابلیت اعتماد شده است. تعداد برآورد گرادیان تابع شرایط حدی و شاخص قابلیت اعتماد را به عنوان معیارهای مقایسه در نظر گرفته و عملکرد روش ارائه‌شده به کمک این مثال‌ها بررسی شده است. روش‌های اولین مرتبه قابلیت اعتماد در نرم‌افزار مطلب برنامه‌نویسی گردیده که جهت محاسبه بردار گرادیان از روش تفاضل مرکزی در هر تکرار استفاده شده است.

مثال ۱: سازه تحت نیروی کشش

سازه‌ای مطابق شکل (۱) برای این مثال نظر گرفته شده است. بر اساس تعادل، تابع شرایط حدی برای خرابی میل‌گرد عضو کششی AB به صورت زیر است:

$$g(\sigma) = \frac{T_{AB}}{A} - F_t = \frac{245}{54} \frac{qa}{A} - F_u \quad (14)$$

که در رابطه فوق A سطح مقطع میل‌گرد، q مقدار شدت بار گسترده و F_u تنش نهایی تسلیم میل‌گرد می‌باشند. خصوصیات آماري متغیرها تصادفی برای این عضو کششی در جدول (۱) تعریف شده است.



شکل ۱. سازه فولادی تحت کشش مثال ۱

جدول ۱. متغیرهای تصادفی مثال کشش میل‌گرد

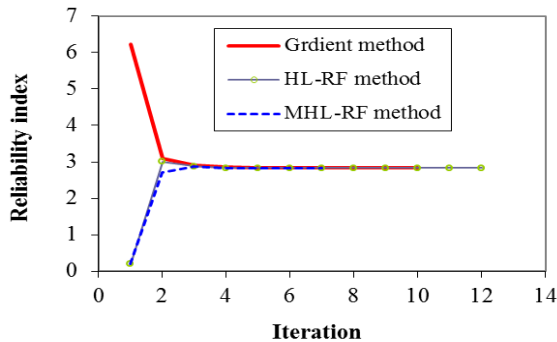
متغیر	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
$(t/m)q$	لوگ - نرمال	۲	۰/۲
$(m)a$	لوگ - نرمال	۳	۰/۲
A (cm^2)	نرمال	۱۰	۱
F_u (kg/cm^2)	نرمال	۴۰۰۰	۴۰۰

نشان داده شده است. مشخص است، کمترین تعداد تکرار جهت همگرایی با توجه به رویه MHL-RF حاصل شده و روش گرادیان از روش هاسوفر و لیند سریع‌تر همگرا نموده است.

جدول ۲. خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی مثال ستون

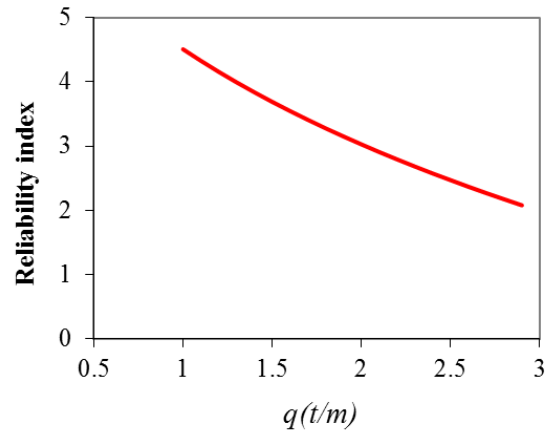
متغیر	توصیف	میانگین	انحراف معیار	تابع توزیع
P	نیروی محوری	۷۰۰۰۰	۸۰۰۰	گامبل
A	سطح مقطع	۶۵/۳	۵	نرمال
F_y	تنش جاری شدن	۲۴۰۰	۲۰۰	لوگ-نرمال
E	مدول ارتجاعی	۲×10^6	1×10^5	گامبل
I	ممان دوم سطح مقطع	۱۳۶۰	۱۳۶	لوگ-نرمال
K	ضریب طول موثر	۰/۷	۰/۱۲	لوگ-نرمال
L	طول ستون	۵۰۰	۷۰	نرمال

*ابعاد بر حسب kg و cm



شکل ۶. تاریخچه همگرایی شاخص قابلیت اعتماد برای مثال ستون

در شکل‌های (۷) تا (۹) به ترتیب شاخص قابلیت اعتماد نسبت به بار (P)، تنش تسلیم (F_y) و سطح مقطع (A) ستون نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش بار، تنش تسلیم و سطح مقطع به ترتیب شاخص قابلیت اعتماد کاهش، افزایش، افزایش می‌یابد. کاهش چشمگیری از شاخص قابلیت اعتماد ۳/۵ به ۲ به ازای افزایش بار از ۵۰ تن به ۸۰ تن مشاهده می‌شود. شاخص سلامتی به نرخ تغییرات تنش تسلیم کمتر از ۲۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و سطح مقطع کمتر ۷۰ سانتی‌متر مربع حساس است. بین متغیرهای بار و مقاومت عضو مشخص است که شاخص قابلیت اعتماد به تغییرات بار نسبت به تغییرات مقاومت حساس تر است. افزایش مقاومت موجب افزایش کارایی این سازه به دلیل لاغر بودن نمی‌شود. افزایش سطح مقطع در یک محدود مناسب شاخص قابلیت اعتماد کمتر از ۳ بسیار تأثیرگذار است. افزایش سطح مقطع از مقدار طراحی شده آیین‌نامه (۶۵/۳) موجب افزایش چشمگیر شاخص قابلیت اعتماد



شکل ۴. شاخص قابلیت اعتماد نسبت به تغییرات بار (q) برای مثال ۱

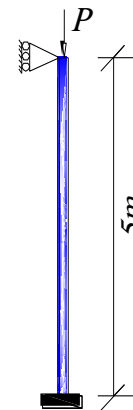
۴-۲. کمانش یک ستون

انهدام یک عضو باریک تحت نیروی محوری فشاری ممکن است قبل از آنکه تنش‌ها در مقطع به حد تسلیم برسد، تحت کمانش اتفاق افتد. یک ستون مطابق با شکل (۵) تحت نیروی P قرار دارد. تابع شرایط حدی برای این ستون می‌تواند به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$g = AF_y \left(1 - \frac{\lambda^2}{2C^2}\right) - P$$

$$C = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{KL}{r}, \quad r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

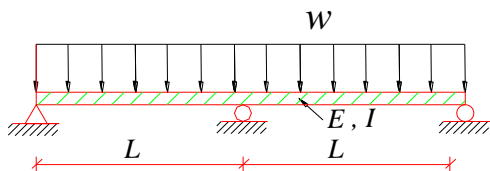


شکل ۵. نمایش شماتیک ستون مثال ۲

خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی تابع شرایط حدی معادله ۱۵ در جدول (۲) درج گردیده است.

مقدار شاخص سلامتی برای این ستون با توجه به روش‌های HL-RF و MHL-RF برابر با ۲/۸۳۰۴ حاصل گردیده و به ازای روش گرادیان برابر با ۲/۸۴۰۳ نتیجه شده است. در شکل (۶) مقایسه‌ای از تاریخچه همگرایی روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد

که در آن، k عدم قطعیت در مقاومت و ϕ ضریب تطبیق لنگر برای تکیه‌گاه میانی است. متغیرهای تصادفی این مسئله در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰. نمایش شماتیک تیر دو دهانه مثال ۳

مقدار شاخص سلامتی و بردار طراحی همگرا شده برای این مثال به ترتیب برابر با ۲/۴۹۶۹ و

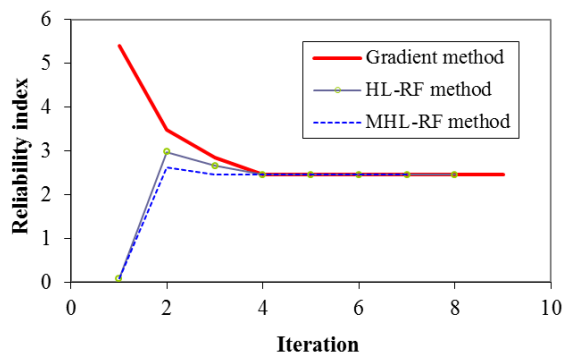
$$[\phi, w, L, S, k, F_y] = [0.9676, 46/139, 889/554, 1984/295, 0.97346, 2225/507]$$

نتیجه شده است.

جدول ۳. متغیرهای تصادفی برای تیر دو دهانه

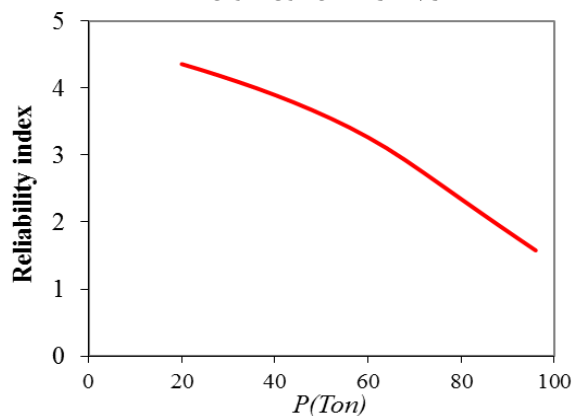
متغیر	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
w (kg/cm)	لوگ - نرمال	۴۰	۵
L (cm)	لوگ - نرمال	۸۰۰	۶۰
S (cm ³)	نرمال	۲۱۸۰	۲۰۰
k	-	۱	۰/۱
F_y (kg/cm ²)	نرمال	۲۴۰۰	۲۰۰
ϕ	لوگ - نرمال	۰/۹	۰/۰۸

شکل (۱۱) تاریخچه همگرایی شاخص سلامتی برای روش‌های مورد در مثال تیر را نشان می‌دهد است. مشخص است، تمامی روش‌های مورد بررسی به مقدار یکسانی از شاخص قابلیت اعتماد همگرا گردیده‌اند. اما روش ارائه‌شده با تعداد تکرار کمتری نسبت به روش گرادیان و هاسوفر و لیند همگرا شده است. طول گام بزرگ‌تر از واحد در این مثال موجب افزایش نرخ همگرایی روش اصلاح‌شده نسبت به روش هاسوفر و لیند می‌گردد.

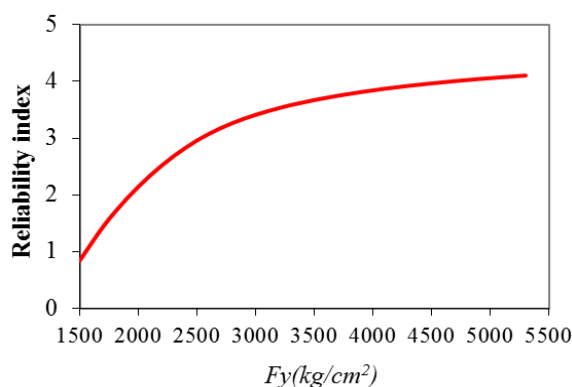


شکل ۱۱. تاریخچه همگرایی شاخص قابلیت اعتماد برای تیر دو دهانه

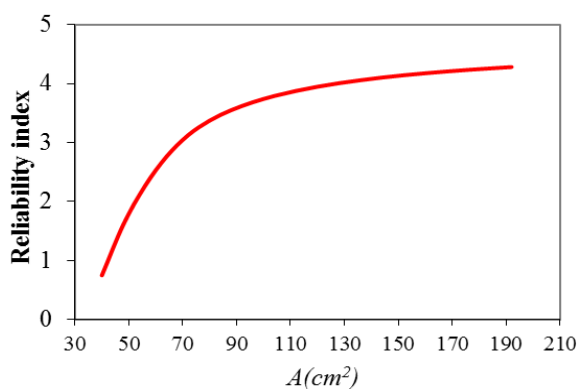
نشده است. این بدان معنا است که، معیارهای طراحی آیین‌نامه بر مبنای یک معیار پایداری قابل قبول تدوین شده است.



شکل ۷. شاخص سلامتی نسبت به بار ستون



شکل ۸. شاخص سلامتی نسبت به تنش تسلیم مصالح ستون



شکل ۹. شاخص قابلیت اعتماد نسبت به سطح مقطع ستون ۲

۳-۴. تیر دو دهانه با بار گسترده

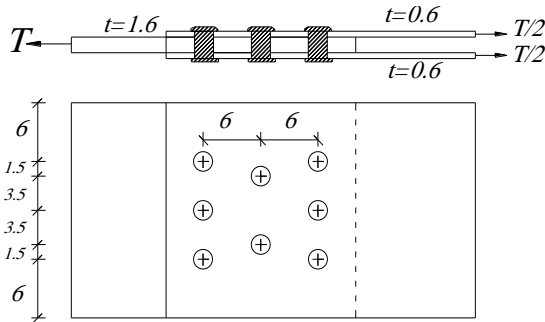
یک تیر دو دهانه تحت بار گسترده مطابق با شکل (۱۰) در این مثال در نظر گرفته شده که تابع شرایط حدی آن تحت خمش به صورت زیر است.

$$g = \phi \frac{wL^2}{8S} - kF_y \tag{16}$$

$$g_3 = \frac{32}{\sqrt{3}} A_b F_{ub} - T \quad (19)$$

(۴) خرابی لهیدگی صفحه نازک‌تر

$$g_4 = 19.2 A_k F_u - T \quad (20)$$



شکل ۱۳. نمایش اتصال مثال ۴ (ابعاد به سانتی متر)

خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی پایه برای این مثال در جدول (۴) درج گردیده است.

جدول ۴. خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی مثال اتصال

متغیر	توصیف	میانگین	انحراف معیار	تابع توزیع
T	نیروی خارجی	۳۷۵۰۰	۳۷۵۰	گامبل
F_y	تنش جاری شدن	۲۴۰۰	۲۰۰	لوگ-نرمال
F_u	تنش نهایی	۳۷۰۰	۳۵۰	لوگ-نرمال
F_{ub}	تنش نهایی پیچ	۸۰۰۰	۵۰۰	لوگ-نرمال
A_e	سطح مقطع موثر	۹/۴	۰/۹	نرمال
A_g	سطح مقطع کل	۱۳/۲	۱	نرمال
A_b	سطح مقطع پیچ	۳/۱۴	۰/۳	نرمال
A_k	سطح مقطع لهیدگی	۱/۲	۰/۱	نرمال

*ابعاد بر حسب kg و cm است

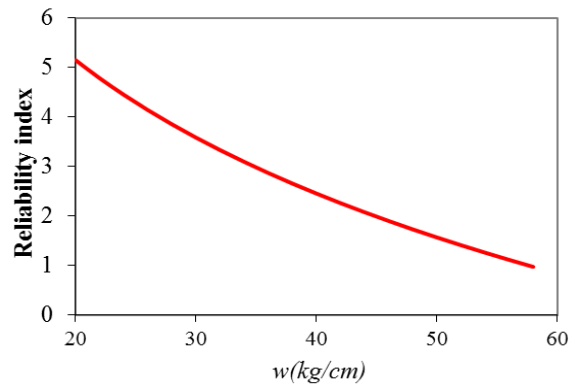
بر اساس چهار تابع شرایط حدی ارائه شده، مقدار شاخص قابلیت اعتماد بحرانی برای این سیستم به صورت زیر است:

$$\beta = \min(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = \min(3.3442, 3.1449, 4.3374, 4.3703) = 3.1449$$

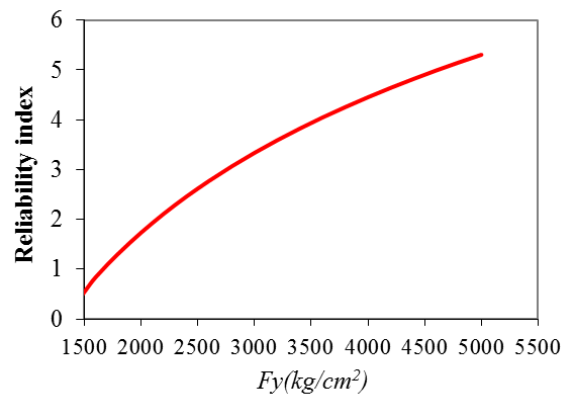
مشخص است، مود خرابی بحرانی با توجه به خرابی صفحه فولادی نازک‌تر حاصل گردیده و حداکثر شاخص قابلیت اعتماد بر اساس مود خرابی مربوط به لهیدگی صفحه نازک‌تر حاصل شده است. در طراحی سازه‌ها تحلیل قابلیت اعتماد حائز اهمیت بوده و این ابزار به کاربر قابلیت ارائه یک طرح مطمئن با سطح خرابی محدود را می‌دهد.

در شکل (۱۴) تاریخچه همگرایی شاخص سلامتی حداقل برای اتصال نشان داده شده به ازای چهار تابع حالت حدی روابط (۱۷-۲۰) ارائه گردیده است. همان طوری که مشخص است تمامی روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد به مقدار یکسانی از

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب شاخص قابلیت اعتماد نسبت به متغیر تصادفی بار (w) و مقاومت (F_y) ترسیم شده است. بر اساس نتایج شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشخص است که نرخ افزایش و کاهش بار و مقاومت یکسان ناست و نرخ تغییرات شاخص قابلیت اعتماد به ازای بار بیشتر از مقاومت نتیجه شده است.



شکل ۱۲. شاخص سلامتی نسبت به بار وارده بر تیر دو دهانه



شکل ۱۳. شاخص سلامتی نسبت تنش تسلیم مصالح تیر دو دهانه

۴-۴. اتصالی تحت نیروی کششی

یک اتصال مطابق با شکل (۱۳) تحت نیروی کششی T و پیچ‌هایی پر مقاومت از نوع A325 به قطر ۲ سانتی متر، برای این مثال در نظر گرفته شده است. این اتصال به عنوان یک اتصال متعارف در اغلب سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سازه شامل انواع متنوعی از مودهای خرابی است که ممکن است در ورق‌ها و یا در پیچ‌های اتفاق افتد. چهار تابع حالت حدی برای این مثال بر مبنای انواع خرابی به صورت زیر تعریف شده است:

(۱) خرابی ورق سوراخ دار با ضخامت نازک‌تر

$$g_1 = 2A_e F_u - T \quad (17)$$

(۲) خرابی صفحات فلزی با ضخامت نازک‌تر

$$g_2 = 2A_g F_y - T \quad (18)$$

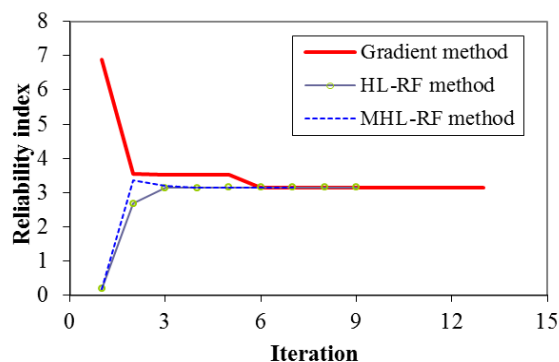
(۳) خرابی برشی پیچ‌ها

۵. نتیجه گیری

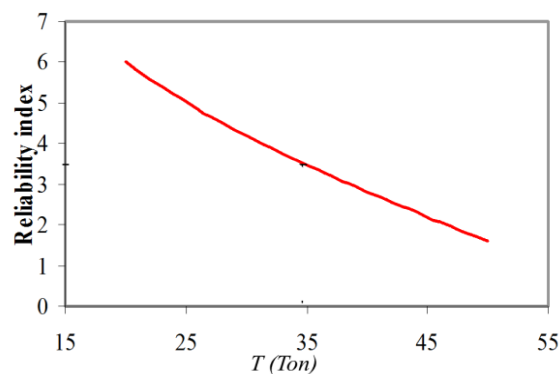
در این مقاله، یک الگوریتم اولین مرتبه قابلیت اعتماد بر مبنای رابطه تکرار هاسوفر و لیند بسط داده شده است. در روش تحلیل قابلیت اعتماد ارائه شده، طول گام به صورت دینامیکی عددی بین ۰ و ۱/۵ انتخاب می‌گردد. جهت تنظیم طول گام در هر تکرار از یک تابع شایسته استفاده شده که به سادگی بر اساس اطلاعات تکرار قبلی قابل محاسبه است. از آنجایی طول گام در تکرارهای اولیه ممکن است عددی بزرگتر از ۱ انتخاب گردد لذا، سرعت همگرایی این روش بیشتر از روش هاسوفر و لیند است. به دلیل مقدار ناچیز بردار امتداد جستجو و یا طول گام کوچک در تکرارهای نهایی، تابع شایسته در این الگوریتم به سمت صفر میل می‌کند. از این رو، همگرایی این روش به صورت پایدار است. عملکرد الگوریتم اصلاح شده هاسوفر و لیند با استفاده از چهار مثال سازه‌ای طراحی شده با آیین‌نامه فولاد ایران با روش‌های هاسوفر و لیند و روش گرادیان مقایسه شده است. روش ارائه شده توانمندی همانند روش گرادیان و هاسوفر و لیند دارد اما، نسبت به آن‌ها با تعداد تکرار کمتری در تمامی مثال‌ها همگرا شده است. همچنین این روش همانند روش هاسوفر و لیند ساده بوده و بر خلاف روش گرادیان در هر تکرار، نیاز به محاسبات بیشتر جهت انتقال نقطه جدید روی سطح خرابی ندارد. با توجه به تحلیل قابلیت اعتماد می‌توان نتیجه گرفت که احتمال خرابی اعضای سازه‌ای برای مثال‌ها مورد بررسی در یک حاشیه ایمنی مناسب از شاخص قابلیت اعتماد در محدوده بین ۲/۵ تا ۳ واقع گردیده‌اند. با افزایش نرخ بار از شاخص قابلیت اعتماد کاسته شده که درصد کاهش شاخص قابلیت اعتماد برای اعضای مختلف سازه‌ای در حدود ۷۲، ۸۹، ۱۶۶ و ۱۳۷ به ترتیب برای عضو کششی، ستون، تیر و اتصال فولادی نتیجه شده است. افزایش مقاومت موجب افزایش مقدار شاخص قابلیت اعتماد شده که میزان افزایش شاخص قابلیت اعتماد به ازای افزایش مقاومت در حدود ۶۶، ۷۱ و ۱۵۹ درصد افزایش قابلیت اعتماد به ترتیب برای اعضای کششی، ستون و تیر نتیجه شده است. شاخص قابلیت اعتماد تیر مورد بررسی (در حدود ۲/۵) از سه مثال دیگر کمتر نتیجه شده است (ستون در حدود ۲/۸۵، عضو کشش و اتصال در حدود ۳). روش ارائه شده می‌تواند در تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های پیچیده استفاده گردد. توانمندی و کارایی این روش در آینده برای توابع با درجه غیرخطی بالا می‌تواند ارزیابی گردد. روش ارائه شده توانمندی تحلیل قابلیت اعتماد را به سادگی روش هاسوفر و لیند دارد لذا، از آن می‌توان جهت برآورد ضرایب مقاومت آیین‌نامه بر اساس شاخص قابلیت اعتماد هدف بین ۲/۵ تا ۳ در آینده استفاده نمود.

شاخص قابلیت اعتماد همگرا گردیده‌اند، اما تعداد تکرار مورد نیاز جهت همگرایی متفاوت نتیجه شده است. به طوری که، کمترین تعداد تکرار جهت همگرایی بر اساس رویه MHL-RF (۷ تکرار) و بیش‌ترین تکرار بر اساس روش گرادیان (۱۳ تکرار) حاصل شده است. مشخص است روش اصلاح شده در این تحقیق در تمامی مثال‌ها با سرعت بیشتری همگرا شده و همانند روش HL-RF ساده است. این روش می‌تواند جهت تحلیل مسائل قابلیت اعتماد با درجه انحنای بالا نیز مورد استفاده قرار گیرد و عملکرد آن بررسی شود. از طرفی، روش ارائه شده اولین مرتبه قابلیت اعتماد در آئیند جهت کالیبراسیون ضرایب مقاومت آیین‌نامه فولاد ایران بر مبنای نظریه قابلیت اعتماد می‌تواند کاربرد موفقیت‌آمیزی داشته باشد.

شکل (۱۵) شاخص قابلیت اعتماد نسبت به نیروی کششی اتصال را نشان می‌دهد. با افزایش بار از شاخص قابلیت اعتماد کاسته شده است. همچنین حداکثر بار قابل تحمل برای این اتصال با شاخص قابلیت اعتماد برابر با ۳ در حدود ۴۰ تن نتیجه شده که با مقایسه طرح آیین‌نامه ایران در حدود ۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این بدان معنا است که طرح مطمئن بر مبنای نظریه قابلیت اعتماد و آیین‌نامه در حدود یکدیگر است.



شکل ۱۴. مقایسه تاریخچه همگرایی شاخص قابلیت اعتماد برای مثال اتصال



شکل ۱۵. شاخص سلامتی نسبت به بار برای مثال اتصال

۶. مراجع‌ها

- [18] Gong, J. X.; Yi, P. "A Robust Iterative Algorithm for Structural Reliability Analysis"; *Struct. Multidisc. Optim.* 2011, 43, 519-527.
- [19] Keshtegar, B.; Miri, M. "An Enhanced HL-RF Method for the Computation of Structural Failure Probability Based on Relaxed Approach"; *Civil Eng. Infrastruct. J.* 2013, 1, 69-80.
- [20] Keshtegar, B.; Miri, M. "A Novel Method for Assessment of Reliability in Structures"; *J. Modeling Eng.* 2014, 12, 29-42.
- [21] Gholizad, A.; Abedi Eivrih, A. "Reliability Analysis of Structures under Blast Loading"; *J. Adv. Defence Sci. & Tech.* 2017, 8, 19-31.
- [22] Keshtegar, B.; Kisi, O. "M5 Model Tree and Monte Carlo Simulation for Efficient Structural Reliability Analysis"; *Appl. Math. Modeling* 2017, 48, 899-910.
- [23] Keshtegar, B.; Meng, Z. "Conjugate and Directional Chaos Control Methods for Reliability Analysis of CNT-Reinforced Nanocomposite Beams under Buckling Forces: A Comparative Study"; *J. Appl. Comput. Mech.* 2016, 2, 144-151.
- [24] Meng, Z.; Hao, P.; Li, G.; Wang, B.; Zhang K. "Non-Probabilistic Reliability-Based Design Optimization of Stiffened Shells under Buckling Constraint"; *Thin-Walled Struct.* 2015, 94, 325-333.
- [25] Hu, Z.; Du, X. "First Order Reliability Method for Time-Variant Problems Using Series Expansions"; *Struct. Multidisciplinary Optimization* 2015, 51, 1-21.
- [26] Stewart, M. G.; Suo, Q. "Extent of Spatially Variable Corrosion Damage as an Indicator of Strength and Time-Dependent Reliability of RC Beams"; *Eng. Struct.* 2009, 31, 198-207.
- [27] Keshtegar, B.; Miri, M. "Reliability Analysis of Corroded Pipes Using Conjugate HL-RF Algorithm Based on Average Shear Stress Yield Criterion"; *Eng. Failure Anal.* 2014, 46, 104-117.
- [28] Tee, K. F.; Pesinis, K. "Reliability Prediction for Corroding Natural Gas Pipelines"; *Tunneling and Underground Space Technology* 2017, 65, 91-105.
- [29] Keshtegar B. "Enriched FR Conjugate Search Directions for Robust and Efficient Structural Reliability Analysis"; *Eng. Comput.* 2017, 1-12.
- [30] Keshtegar, B. "A hybrid Conjugate Finite-Step Length Method for Robust and Efficient Reliability Analysis"; *Appl. Math. Modeling* 2017, 45, 226-237.
- [31] Keshtegar B. "Chaotic Conjugate Stability Transformation Method for Structural Reliability Analysis"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2016, 310, 866-885.
- [32] Keshtegar B; Chakraborty S. "A hybrid self-adaptive conjugate first order reliability method for robust structural reliability analysis"; *Appl. Math. Modeling* 2018, 53, 319-332.
- [1] Ditlevsen, O.; Madsen, H. O. "Structural Reliability Methods"; John Wiley and Sons Ltd, 1996.
- [2] Liu, P. L.; Kiureghian, A. "Optimization Algorithms for Structural Reliability"; *Struct. Safety* 1991, 9, 161-177.
- [3] Der Kiureghian, A.; Stefano, M. D. "Efficient Algorithm for Second-order Reliability Analysis"; *J. Eng. Mech.* 1991, 117, 2904-2923.
- [4] Zhao, Y. G.; Lu, Z. H. "Fourth-Moment Standardization for Structural Reliability Assessment"; *J. Struct. Eng.* 2007, 133, 916-924.
- [5] Au, S. K; Beck, J. L. "Estimation of Small Failure Probabilities in High Dimensions by Subset Simulation"; *Probabilistic Eng. Mech.* 2001, 16, 263-277.
- [6] Rashki, M.; Miri, M.; Moghaddam, M. A. "A New Efficient Simulation Method to Approximate the Probability of Failure and Most Probable Point"; *Struct. Safety* 2012, 39, 22-29.
- [7] Chakraborty, S.; Chowdhury, R. "A Semi-analytical Framework for Structural Reliability Analysis"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2015, 289, 475-497.
- [8] Keshtegar, B. "Stability Iterative Method for Structural Reliability Analysis Using a Chaotic Conjugate Map"; *Nonlinear Dynamics* 2016, 84, 2161-2174.
- [9] Yang, D. "Chaos Control for Numerical Instability of First Order Reliability Method"; *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010, 15, 3131-3141
- [10] Hasofer, A. M.; Lind N. C. "Exact and Invariant Second Moment Code Format"; *J. Eng. Mech. Division* 1974, 111, 111-121.
- [11] Keshtegar, B.; Miri, M. "Introducing Conjugate Gradient Optimization For Modified HL-RF Method"; *Eng. Comput.* 2014, 31, 775-790.
- [12] Rackwitz, R.; Fiessler, B. "Structural Reliability under Combined Load Sequences"; *Comput. Struct.* 1987, 9, 489-494.
- [13] Santosh, T. V.; Saraf, R. K.; Ghosh, A. K.; Kushwaha H. S. "Optimum Step Length Selection Rule in Modified HL-RF Method For Structural Reliability"; *Int. J. Pressure Vessels and Piping* 2006, 83, 742-748.
- [14] The 10th issue of Iran's National Building Codes "Design & Implementation of Steel Structure"; Development and Promotion Office of National Building Codes, Publication, 2014.
- [15] Shayanfar, M. A.; Barkhordari, M. A.; Rahmanian, M. "Reliability of the Member Stability Criteria in the 2008 Iranian Specification for Structural Steel"; *J. Steel Struct.* 2011, 7(9), 5-12.
- [16] Azhdari Moghadam, M. M.; Keshtegar, B. "Evaluation of Reliability for Components Based Iranian National Building Code"; *J. Steel Struct.* 2011, 7, 5-12.
- [17] Mohammadi Farsani, A.; Keshtegar, B. "Reliability Analysis of Corroded Reinforced Concrete Beams Using Enhanced HL-RF Method"; *Civil Eng. Infrastruct. J.* 2015, 48, 323-330.