

ضریب رفتار لرزه ای برای توربینهای بادی دو مگاواتی با برج فولادی لوله ای

محمد علی جعفری صحنه سرایی، علیرضا رهنورد، حدیث محمد مرادی

گروه سازه های انتقال نیرو

پژوهشگاه نیرو

تهران - ایران

که با استفاده از توربینهای بادی صورت می گیرد. در سالهای اخیر به منظور افزایش راندمان و بهره وری بهینه در تولید انرژی الکتریکی، استفاده از توربینهای بادی بزرگتر و مرتفع تر که دارای ظرفیت تولید بیشتری می باشند، در کشورهای مختلف از جمله ایران، مورد توجه قرار گرفته است.

زلزله یکی از پدیده های طبیعی است که دارای آثار مخرب و زیان باری بر مستحدمات بشری می باشد. تجربیات گذشته در نقاط مختلف جهان نشان دهنده پتانسیل بالای تخریب و خسارت در انواع سازه ها، ناشی از زلزله است. بنابراین در مناطق لرزه خیز دنیا، لحاظ تأثیر زلزله بر سازه ها در طراحی آنها که اصطلاحاً به طراحی لرزه ای نیز موسوم است، ضروری می باشد. کشور ایران نیز یکی از مناطق لرزه خیز دنیا است و وقوع زلزله های متعدد و بروز خسارات گسترده حاصل از آنها در نقاط مختلف کشور، این موضوع را به اثبات رسانده است. بر این اساس، لحاظ نیروهای حاصل از زلزله نیز، در طراحی سازه ای توربینهای بادی در کشور ضروری است.

امروزه بخش عمده ای از روند طراحی لرزه ای سازه ها در آیین نامه های طراحی در دنیا با استفاده از روش استاتیکی معادل انجام می آید. روش استاتیکی معادل بر اساس تعیین نیروهای زلزله با استفاده از طیف طراحی غیرخطی تدوین شده است. برای تهیه طیف طراحی غیرخطی زلزله با استفاده از طیف الاستیک خطی، از ضریبی به نام ضریب رفتار استفاده می آید. این ضریب در واقع اعمال کننده فلسفه طراحی لرزه ای بر اساس پذیرش رفتار غیرخطی سازه در اثر وقوع خرابیهای محدود ناشی از زلزله های بزرگ می باشد. بعبارت دیگر با استفاده از توان شکل پذیری سازه ها در حوزه غیرخطی و استفاده از تمامی ظرفیت سازه (حالت

چکیده — با توجه به لزوم طراحی توربینهای بادی در برابر آثار ناشی از زلزله در مناطق لرزه خیز، بارگذاری و تحلیل سازه این توربینها در برابر نیروهای زلزله ضروری است. یکی از متداولترین و ساده ترین روشها برای طراحی انواع سازه ها در برابر زلزله، روش استاتیکی معادل است که در این روش، نیروی زلزله با استفاده از ضریب یک ضریب (ضریب زلزله) در وزن سازه تعیین می آید. ضریب زلزله بطور کلی وابسته به عواملی مانند لرزه آخیزی منطقه، خصوصیات دینامیکی سازه، اهمیت سازه و رفتار لرزه ای سازه است. وابستگی ضریب زلزله به رفتار لرزه ای سازه با اعمال ضریبی به نام ضریب رفتار منظور می آید که برای انواع سازه ها توسط محققان مختلف محاسبه و در استانداردهای طراحی لرزه ای ارائه شده اند. با توجه به اینکه در مورد ضریب رفتار توربینهای بادی اطلاعات مشخصی در استانداردها و ادبیات فنی موجود نیست، در این مقاله ضریب رفتار لرزه ای برای توربینهای بادی ۲ مگاواتی که دارای برج فولادی لوله ای هستند، تعیین و ارائه شده است.

واژه های کلیدی — توربین بادی؛ زلزله؛ ضریب رفتار؛ شکل پذیری

۱. مقدمه

امروزه به دلایل گوناگون از جمله محدودیت منابع انرژی، استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر و بدون آلودگی، بسیار مورد توجه بشر قرار گرفته است. یکی از مفیدترین منابع تجدیدپذیر برای تأمین انرژی، باد است. امروزه یکی از موارد مهم استفاده از انرژی باد، تأمین انرژی الکتریکی است

۲.۳. روش طراحی بکار گرفته شده

در روش طراحی براساس تنش مجاز، یک ضریب اضافی نیز بکار گرفته می‌شود تا نیروی حاصل از زلزله را به سطح تنشهای مجاز برساند. در روشهای مبتنی بر مقاومت نهایی (مانند روش ضرایب بار و مقاومت یا روش حالات حدی) این ضریب برابر یک منظور میگردد.

۳. روش های محاسبه ضریب رفتار

تاکنون پژوهشگران روش های متفاوتی برای محاسبه ضریب رفتار ارائه نموده‌اند. با مقایسه این روشها می توان آنها را در دو گروه کلی تقسیم بندی کرد که شامل روش های پژوهشگران آمریکایی و روش های پژوهشگران اروپایی می شود. عموماً روش های آمریکایی مبانی تئوری ساده تری دارند، ولی با وجود این کاربردی تر هستند، در حالی که روش های اروپایی دارای مبانی تئوری و تحلیلی پیچیده تری بوده و استفاده از آنها در عمل دشوار است. با بررسی اجمالی کلیه روش های طرح شده برای محاسبه ضریب رفتار می‌توان دریافت که روش ضریب شکل پذیری یوانگ از روشهای آمریکایی و روش تئوری شکل پذیری از روش های اروپایی، مشابهت زیادی با یکدیگر داشته و هر دو براساس نتایج تحقیقات نیومارک برای سیستم‌هایی با یک درجه آزادی، استوارند.

در کل روش های آمریکایی نسبت به روش های اروپایی عمومیت بیشتری دارند و در بیشتر پژوهش ها به روش های آمریکایی استناد شده است. از طرفی، بیشترین تاثیر در ضریب رفتار ناشی از شکل پذیری و مقاومت افزون می باشد که هر دوی این پارامترها در روش یوانگ وارد شده است و روابط قابل استنادی برای تمام پارامترها ارائه شده است. در روش یوانگ ضریبی به نام ضریب تنش مجاز بصورت صریح بیان شده است که این ضریب به نوع روش طراحی بستگی دارد و این موضوع از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. روش یوانگ علاوه بر اینکه پارامترهای تاثیرگذار در ضریب رفتار را در نظر گرفته، نسبت به سایر روش ها، از دقت و سادگی بیشتری نیز برخوردار است. تمامی پارامترهای مهم در روش یوانگ از تحلیل استاتیکی غیر خطی قابل تعیین است.

برای تعیین ضریب رفتار در این مطالعه، می‌توان گفت روش یوانگ بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد. براین اساس در این تحقیق از فرمول‌بندی کلی مربوط به روش یوانگ استفاده شده است و برای تعیین هر یک از پارامترها، روش مناسب و قابل استنادی بکار گرفته شده است. [۴]

پلاستیک)، می‌توان وقوع خرابی‌های محدود در سازه را پذیرفته و نیروهای طراحی زلزله را کاهش داد که این کاهش، با استفاده از ضریب رفتار انجام می‌شود. مقادیر ضریب رفتار برای انواع مختلف سازه ها در استانداردهای طراحی لرزه‌ای ارائه شده‌اند. در مورد سازه توربین بادی مقدار ضریب رفتار در مراجع طراحی لرزه ای ارائه نشده است. [۱] و [۲] مرجع [۳] با مشابه‌سازی توربین بادی با پاندول وارونه و بر اساس استاندارد آمریکایی ASCE، در مواردی که وقوع کماتش موضعی در سازه محتمل است، مقدار ضریب رفتار سازه توربین بادی را برابر $R=1$ پیشنهاد میدهد.

در این پژوهش با بررسی روش های مختلف تعیین ضریب رفتار که توسط محققین متعددی ارائه شده است، روش مناسب برای تعیین ضریب رفتار یک نمونه توربین بادی با ظرفیت تولید توان الکتریکی ۲ مگاوات انتخاب شده و مقدار این ضریب تعیین گردیده است. بدنه برج توربین بادی مذکور فولادی و به شکل مخروط ناقص است. ارتفاع برج این توربین ۸۰ متر است که از چهار مخروط ناقص به ارتفاع ۲۰ متر و ضخامت های متفاوت تشکیل شده است. برای تعیین منحنی نیرو-تغییر مکان این برج از نرم افزار اجزاء محدود غیرخطی ABAQUS استفاده شده و در نهایت با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی و محاسبه پارامترهای لازم برای تعیین ضریب رفتار، این ضریب تعیین شده است.

۲. پارامترهای موثر بر ضریب رفتار

مهمترین پارامترهای موثر در ضریب رفتار عبارتند از: [۴]

۲.۱. شکل پذیری

توان پذیرش تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی بدون افت مقاومت و سختی، شکل پذیری نامیده می‌شود. شکل‌پذیری یک سازه از لحاظ کمی، نسبت ماکزیمم تغییر مکان جانبی غیرخطی نهایی به تغییر مکان جانبی حد تسلیم است.

۲.۲. مقاومت افزون

مقاومت افزون سازه مقاومتی است که بر اثر عوامل مختلف در سازه مانند درجه نامعینی، لحاظ ترکیبات مختلف بارها در طراحی و باز توزیع نیروهای داخلی در محدوده غیر ارتجاعی، ذخیره شده و انهدام سازه را به تأخیر می‌اندازد.

تمام المانهای برج در منطقه مذکور کاملاً تسلیم شوند، در همان محل کمانش موضعی غیرالاستیک رخ می دهد.

نمودار نیرو- تغییر مکان در این حالت نیز در شکل (۳) ارائه شده است. محور افقی تغییر مکان بالاترین نقطه برج و محور عمودی عکس العمل جانبی در محل تکیه گاه (برش پایه) می باشد

اتصال پای برج به فونداسیون نیز بصورت صلب در مدلسازی وارد شده است. در این تحقیق، تحلیلهای غیرخطی استاتیکی فزاینده بصورت کنترل شده با تغییر مکان انجام شده اند.

۵. بررسی نتایج تحلیل

برای بارگذاری و اعمال پروفیل حداکثر تغییر مکان های جانبی بر سازه، الگوهای مختلفی را می توان در نظر گرفت. در اینجا از سه الگوی بارگذاری جانبی زیر استفاده شده است:

- اعمال بار متمرکز در بالاترین نقطه برج:

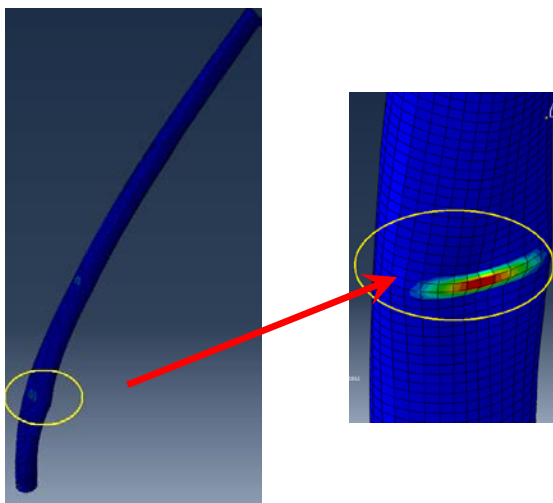
در این روش بدون توجه به توزیع جرم تنها در بالاترین نقطه برج تغییر مکان بصورت افزایشی وارد می شود و عکس العمل تکیه گاه (برش پایه) در هر گام محاسبه و ثبت میشود.

- توزیع مثلث وارونه:

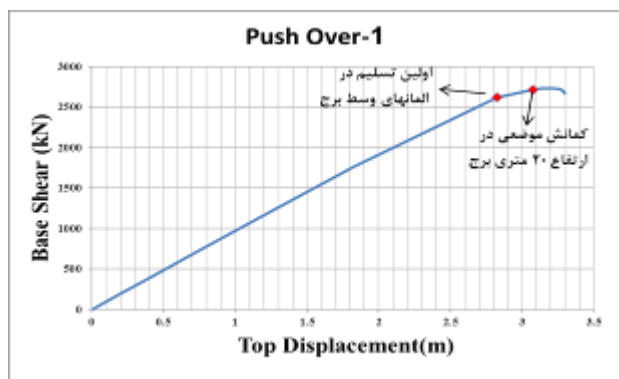
در اغلب آیین نامه های ساختمانی این روش پیشنهاد می شود و برای فرض استوار است که سازه تحت یک توزیع خطی از تغییر مکان ها در ارتفاع خود قرار دارد.

- اعمال بار متناسب با توزیع جرم در ارتفاع برج:

در این روش حداکثر تغییر مکان ها براساس توزیع جرم در ارتفاع های مختلف توزیع میشود. بدلیل متغیر بودن مقطع برج، توزیع جرم بصورت یکنواخت و ثابت نیست. از طرفی در بالای برج به دلیل وجود روتور و ناسل جرم قابل توجهی وجود دارد. به همین دلیل در این حالت از توزیع تغییر مکان مقدار افزایش تغییر مکان ثابت نیست.



شکل ۲: کانتورهای کرنش پلاستیک در محل ایجاد کمانش موضعی در برج



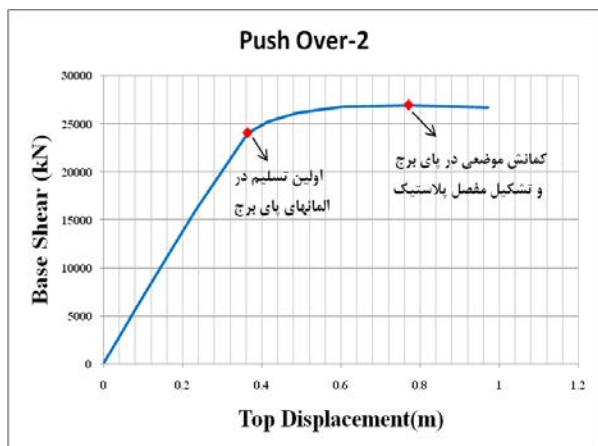
شکل ۳: نمودار نیرو-تغییر مکان. برای الگوی اول بارگذاری

در این سازه با توجه به اینکه یک المان بصورت ستون طره ای تحت خمش در آن وجود دارد، می توان فاصله میان مقاومت متناظر با اولین تسلیم تا مقاومت نهایی متناظر با کمانش موضعی غیرالاستیک را برابر با مقاومت افزون سازه در نظر گرفت. همچنین با توجه به اینکه منحنی فوق حاصل از تحلیل مونوتونیک بوده و آثار ناشی از کاهندگی تحت اثر رفتار چرخه ای در آن لحاظ نشده، در راستای اطمینان تغییر مکان متناظر با اولین ناپایداری (کمانش موضعی) به عنوان حداکثر تغییر مکان برای محاسبه ضریب شکل

۵.۱. نتایج الگوی بارگذاری متمرکز (اعمال بار در

بالاترین نقطه برج توربین بادی)

در این الگوی بارگذاری، کمانش موضعی در انتهای بالایی سگمنت اول برج اتفاق می افتد. در نهایت به علت کمانش موضعی که رخ داده و به دنبال آن ناپایداری برج اتفاق افتاده است، تحلیل متوقف می شود. شکل (۲) کرنش های پلاستیک را در زمان کمانش موضعی نشان می دهد. در واقع کمانش موضعی و تسلیم تقریباً همزمان رخ می دهد. به عبارتی دیگر قبل از اینکه



شکل ۵: منحنی نیرو-تغییر مکان در حالت بارگذاری مثلثی وارونه

پذیری منظور میگردد. با توجه به مطالب ذکر شده، مقدار ضریب رفتار در این حالت بر اساس منحنی شکل ۳ عبارتست از:

$$R = R_{\mu} \Omega \approx 1.1$$

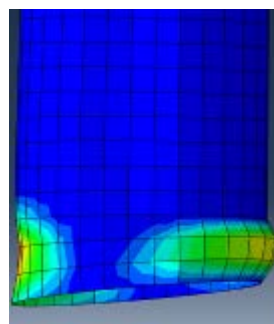
۵.۲. نتایج الگوی بارگذاری جانبی به شکل مثلث وارونه

در این حالت از بارگذاری تغییر مکان جانبی تنها در یک نقطه از برج اعمال نمی شود و در سراسر برج تغییر مکان جانبی بصورت خطی توزیع می شود. بدیهی است که در بالاترین نقطه برج بیشترین تغییر مکان اعمال می شود. پس از تحلیل مدل مشاهده می شود که تسلیم المانهای پای برج و کمانش موضعی بطور تقریباً همزمان اتفاق می افتد. در شکل (۴) کانتورهای کرنش پلاستیک در لحظه وقوع کمانش موضعی که در پای برج نشان داده شده است. در شکل (۵) نیز منحنی نیرو-تغییر مکان برج در این حالت بارگذاری، ارائه شده است.

در این حالت از الگوی بارگذاری ملاحظه می شود که بعد از کمانش موضعی، نمودار به شکل تقریباً مستقیم و بدون افزایش مقاومت پیش می رود. از این رو تغییر مکان ماکزیمم در این حالت از بارگذاری، تقریباً برابر با تغییر مکان در لحظه کمانش موضعی در نظر گرفته می شود.

در این حالت نیز بر اساس روند محاسباتی مشابه با حالت قبل، مقدار ضریب رفتار عبارتست از:

$$R = R_{\mu} \Omega \approx 2.27$$

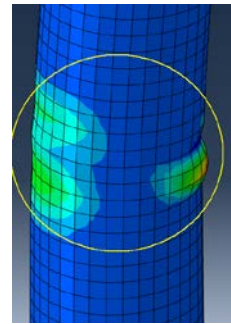


شکل ۴: کانتورهای کرنش پلاستیک در زمان کمانش موضعی در پای برج

۵.۳. نتایج الگوی بارگذاری جانبی بر اساس توزیع جرم

در این حالت، نحوه توزیع بارگذاری جانبی در ارتفاع برج متناسب با توزیع جرم آن در ارتفاع است. تغییر مکان جانبی مورد نظر در پنج نقطه از برج اعمال شده است. در این حالت به دلیل وجود روتور و ناسل در بالای برج، مقدار نیروی اعمالی به بالای برج نسبتاً بزرگتر از سایر نقاط موجود در بدنه آن است. این موضوع می تواند توجهی برای رخ دادن کمانش موضعی در ارتفاع بالای برج باشد. در شکل (۶) کانتورهای کرنش پلاستیک در زمان وقوع کمانش موضعی، ملاحظه می شود. در این حالت از بارگذاری نیز قبل از اینکه تمام المان های مقطع تسلیم شود، کمانش موضعی در بدنه برج اتفاق می افتد. در شکل (۷) نیز نمودار نیرو-تغییر مکان برای این حالت از بارگذاری ملاحظه می شود. محل تسلیم اولین المانها و همچنین کمانش موضعی در نمودار مشخص شده اند.

علت اختلافی که در مقدارهای بدست آمده برای ضریب رفتار وجود دارد، استفاده از توزیع های مختلف تغییر مکان جانبی است. مناسب ترین توزیع تغییر مکان جانبی برای آنالیز، توزیع بار یا تغییر مکان بر اساس جرم می باشد که در اینجا عدد بدست آمده بر اساس این توزیع بار برابر ۱.۵ می باشد.



شکل ۶: کانتورهای کرنش پلاستیک در هنگام کماتش موضعی در برج

نتیجه گیری

ضریب رفتار یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در تعیین نیروهای زلزله در سازه توربین بادی است که در آیین نامه های طراحی لرزه ای مقدار مشخصی برای آن ارائه نشده است. در این تحقیق، با انجام تحلیل های لازم در نرم افزار اجزاء محدود غیرخطی و بررسی نحوه رفتار سازه تحت اثر انواع بارگذاریهای جانبی، مقدار قابل اطمینانی برای ضریب رفتار لرزه ای سازه توربین بادی تعیین شد. با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین نتایج حاصله، مقدار میانگین ضریب رفتار حاصل از سه الگوی توزیع بار منظور شده برابر با ۱.۶۲ می باشد که به مقدار حاصل از توزیع بار متناسب با جرم نزدیکتر است. بنابراین مناسبترین مقدار برای ضریب رفتار توربین بادی، برای طراحی به روش های مقاومت نهایی برابر ۱.۵ می باشد. برج توربین بادی تحت اثر نیروهای زلزله حاصل از ضریب رفتار فوق، باید برای جلوگیری از وقوع حالات حدی اولین تسلیم و انواع ناپایداری (کمانش) کنترل و طراحی شود.



شکل ۷: منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت توزیع بار متناسب با جرم در ارتفاع برج

در این حالت نیز براساس روند محاسباتی مشابه با حالات قبل، مقدار

ضریب رفتار عبارتست از:

$$R = R_{\mu} \Omega \approx 1.50$$

بنابر نتایج بدست آمده بر اساس مدلسازی برج توربین بادی در نرم افزار

ABAQUS و تحلیل های انجام شده برای الگوهای مختلف توزیع بار

جانبی، مقادیر مختلفی برای ضریب رفتار حاصل گردید. در جدول (۱)

خلاصه این نتایج ملاحظه می شود.

جدول ۱: مقادیر ضریب رفتار، حاصل از تحلیل های مختلف

مقدار ضریب رفتار	الگوی توزیع تغییر مکان جانبی
۱.۱	نقطه ای متمرکز
۱.۲۷	مثلثی وارونه
۱.۵	متناسب با توزیع جرم

فهرست منابع و مراجع

- [1] RISO, "Guideline for design of wind turbines", 2nd edition, a publication from DNV/Risø, ISBN 87-550-2870-5, Denmark 2002.
- [2] GL Regulations "Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion Systems", GL Regulations, Vol. IV - Non-Marine Technology, Part 1 - Wind Energy, in Germanischer Lloyd Rules and Regulations, Hamburg, Germany, 2010.
- [3] Prowell, I., Veers, P. (2009) "Assessment of Wind Turbine Seismic Risk: Literature and Simple Study of Tower Moment Demand, Sandia National SAND2009-1100
۴. تسنیمی و معصومی. "محاسبه ضریب رفتار قابهای خمشی بتن مسلح"، نشریه شماره ۴۳۶ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. ۱۳۸۵
۵. مقدم، حسن. مبانی و کاربرد مهندسی زلزله، نشر فرهنگ، فروردین ۱۳۸۱.
- [6] Miranda, E. and Bertero, V.V, 1994, Evaluation of strength reduction factors for Earthquake-resistant design, Earthquake Spectra.No2, Vol.10, pp.357-379.
- [7].Anil K.Chopra, M, ASCE, and chaptan cheentanapakdee.A.M.ASCE." Inelastic Deformation Ratios for Design and Evaluation of Structures: Single Degree of Freedom Bilinear Systems".Journal of Structural Engineering.Septamper 2004.
- [8].Uang, C.M. (1991),"Establishing R (or Rw) and cd Factors for Building Seismic Provision. , ASCE, 117(1), 19-28.