

بررسی لغزش گرهی نبشی‌های دوتایی در برج‌های مشبک توربین بادی با استفاده از روش اجزای محدود

امیر ابراهیمی^۱، صالح یعقوبی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (زلزله)، گروه مهندسی عمران، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران
۲*. استادیار مهندسی عمران (سازه)، گروه مهندسی عمران، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد، ایران

Saleh.yaghoobi@Bojnourdiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۲۰

چکیده

با توجه به افزایش سرعت متوسط باد در جهان و کاهش و آلودگی سوخت‌های فسیلی، استفاده از توربین‌های بادی که در سازه‌های دارای انرژی‌های نو و تجدیدپذیر طبقه‌بندی می‌شوند، بسیار مقرون به صرفه خواهد بود. برج‌های توربین بادی می‌توانند به صورت بتنی، فولادی و یا چند ماده‌ای اجرا شوند که در این میان، برج‌های مشبک فولادی می‌توانند سبب کاهش ۳۰ درصدی هزینه ساخت سازه توربین بادی شوند و بنابراین مدلی کامل و درست برای تحلیل این نوع سازه‌ها بسیار مهم و از نظر اقتصادی قابل توجه خواهد بود. برج‌های مشبک توربین بادی بیشتر با اتصالات پیچی ساخته و اجرا می‌شوند و به علل اجرایی، سوراخ پیچ از قطر پیچ بزرگ‌تر و همین سبب ایجاد لغزش گرهی می‌شود. لغزش گرهی سبب افزایش تغییر مکان برج‌های مشبک شده و عدم در نظر گرفتن آن سبب انهدام برج و فرض ضریب اطمینان سبب غیراقتصادی شدن آن خواهد شد. در این نوع سازه‌ها، بیشتر سازه از نبشی ساخته شده و نبشی‌های تک در اعضای ضربدری و مهاربندی و نبشی‌های دوتایی بیشتر در پایه‌های برج‌های مشبک به کار برده می‌شوند. با این توضیح، در این مطالعه ۳ نمونه با مقطع نبشی تک برای درستی‌آزمایی و ۴ نمونه با مقطع نبشی دوتایی در نرم‌افزار Abaqus مدل و منحنی نیرو-تغییر مکان این نمونه‌ها تحت بارهای رفت و برگشتی به دست آورده شد. در این پژوهش داده‌های موجود در لغزش گرهی اتصالات پیچی را که شامل نبشی‌هایی با بال‌های برابر است، توسعه بخشیده و نمودار نیرو-تغییر مکان اتصالات مختلف را ارائه و بر اساس آن، نسبت میرایی (ک) آن‌ها را محاسبه و اثربخشی هر متغیر بر لغزش گرهی در نبشی‌های دوتایی بیان می‌شود. این پژوهش، برای طراحی سازه‌های مشبک توربین بادی مفید و در آن، رفتار سازه را به صورت دقیق‌تر در اختیار طراح قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: برج مشبک توربین بادی، لغزش گرهی، بارهای رفت و برگشتی، Abaqus، نسبت میرایی (ک).

۱- مقدمه

تولید انرژی الکتریکی یکی از مهم‌ترین پروژه‌ها برای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی است که سبب آلودگی محیط‌زیست شده و رو به اتمام است. هزینه سرمایه‌گذاری برای

توربین‌های بادی تجهیزاتی هستند که انرژی پتانسیل باد را به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند.

۲- مدل سازی عددی و خروجی

۲-۱- کلیات

به طور کلی، یک اتصال پیچی، نیرو را به چهار صورت مختلف می تواند انتقال دهد: (۱) نیروی برشی در یک راستا، (۲) نیروی برشی در چند راستا (۳) نیروی برشی و نیروی محوری در یک راستا و (۴) نیروی برشی و نیروی محوری در چند راستا [9]. معمول ترین حالت موجود در دکل های انتقال برق در سیستم انتقال نیرو و برج های مشبک توربین بادی، نیروی برشی در یک راستاست؛ بنابراین، این نوع بارگذاری برای نمونه ها در این پژوهش نیز انتخاب شده است. با توجه به اینکه برای یک طراح، مقاومت و لغزش یا تغییر شکل اتصال از رفتار یک اتصال پیچی پراهمیت بوده و بررسی می شود، در این پژوهش نیز، تغییر شکل اتصال پیچی بررسی شده و رفتار آن در اثر بارهای رفت و برگشتی مورد ارزیابی قرار می گیرد. لغزش گاهی نتیجه ی متغیرهای مختلفی است، از این متغیرها می توان به (۱) بارهای اعمال شده، (۲) طرز کار و ساخت ضعیف (ناهمترازی و خطای ساخت نامناسب)، (۳) ویژگی های پیچ ها، (۴) تعداد پیچ ها، (۵) گام پیچ ها، (۶) قطر پیچ ها، (۷) چیدمان قرارگیری پیچ ها، (۸) طول پیچ ها، (۹) ویژگی های نبشی، (۱۰) نسبت مساحت خالص مؤثر نبشی فولادی (A_{ne}) و مساحت خالص مؤثر برشی نبشی (A_s)، (۱۱) نسبت مساحت خالص مؤثر نبشی فولادی (A_{ne}) و مساحت کل نبشی (A_g)، (۱۲) ویژگی های سطحی که بر آن عملیات نصب صورت می پذیرد، (۱۳) روش سفت کردن پیچ ها، (۱۴) فاصله از لبه و فاصله از انتها، (۱۵) نوع بار کششی و فشاری وارد شده و (۱۶) برش یک جهته یا چند جهته بودن اشاره نمود [13]. در آزمایش ها و مدل سازی های انجام شده، متغیر (۱) زمانی که متغیر (۲) ثابت فرض شده بود، اندازه گیری شد؛ متغیر (۳) با استفاده نمودن از پیچ های رده 8.8 بر اساس استاندارد DIN، ثابت در نظر گرفته شد؛ متغیر (۴) به صورت تصادفی و مطابق با فرض های اجرایی انتخاب شد؛ متغیر (۵) ثابت در نظر گرفته شد، متغیر (۶) برای مقاطع مختلف نبشی به صورت منطقی و با نگاه مقایسه ای تغییر داده شد. برای آزمایش های انجام شده، به تناسب طراحی انجام شده، پیچ از قطر ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۲ استفاده شده است.

ساخت یک نیروگاه بادی و اتصال آن به شبکه انتقال نیرو، ۷۵ تا ۸۵ درصد و هزینه ساخت سازه آن، ۱۵ تا ۲۵ درصد هزینه کل است [1]. سازه های مشبک توربین بادی بیشتر با اتصالات پیچی ساخته و اجرا می شوند؛ در عین حال، با توجه به سختی کمتر و اتصالات بیشتر این برج ها، تغییر مکان بیشینه بیشتری نسبت به سایر برج ها دارند [2]. کاهش قابل توجه وزن فولاد مصرفی، استفاده از این برج ها را اقتصادی تر نموده [3]؛ تا جایی که می تواند ۲۰ تا ۳۰ درصد هزینه تمام شده کل پروژه را کاهش دهد [4]. سطح مقطع اجزای برج های مشبک بیشتر به صورت نبشی هستند و به صورت خرابایی عمل می نمایند، از طرفی، این سازه ها را می توان در محل پروژه، اجرا و نصب نمود که سبب کاهش هزینه بیشتر نیز خواهد شد [4]. مطالعاتی توسط Al-Bermani و Kitipornchai [5-6] و همکاران [7] انجام پذیرفت، لیکن تغییر شکل برج که توسط روش های عددی پیش بینی شده بود، با نتایج آزمایش هماهنگی نداشته و این اختلاف، ناشی از آثار لغزش گرهی بود. سپس، Knight و Santhakumar [8] نتایج موجود روی یک آزمایش تمام مقیاس یک دکل انتقال برق را با نتایج موجود از تحلیل کلاسیک مقایسه نمودند. آنان متوجه شدند که تنش های ثانویه که از آثار گرهی به وجود می آیند، به قدری بزرگ است که سبب گسیختگی اعضا، تحت ترکیب بارهای طراحی می شود. بر اساس پژوهش Ungkurapinan [9] تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و راه حل های عددی برای تحلیل برج، با ضریب اطمینان در طراحی اتصالات اعضا جبران می شود، لیکن آثار رفتار رفت و برگشتی و سایر تغییر شکل ها با استفاده از ضریب اطمینان جبران شده اند. همچنین، Ahmed و همکاران [10] نتیجه گرفتند که لغزش گرهی تأثیر زیادی در رفتار برج خواهد داشت، زیرا سبب کاهش ظرفیت باربری و افزایش تغییر مکان تحت بارهای موجود می شود. در پژوهش دیگری، یعقوبی و شوشتری [11-12] مدلی بر اساس نمونه های آزمایشگاهی و عددی ارائه دادند که با توجه به خروج از مرکزیت بار در یک برج مشبک در اعضای تک نبشی، آثار لغزش گرهی قابل رابطه سازی است.

شکل ۲. بخش‌های مختلف آزمایش‌های انجام‌شده [12]

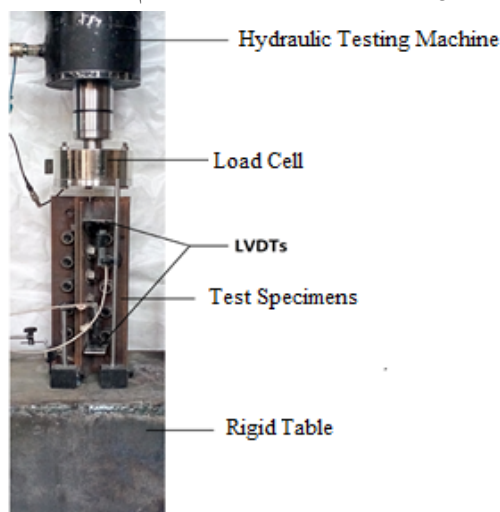


Fig. 2. Deferent Parts of Test set up

۱-۴-۲- ویژگی‌های فولاد در نمونه‌های آزمایش

متغیر (۷) بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC [14] طراحی و در نظر گرفته شد، متغیر (۸) برای آزمایش‌های انجام‌شده و متغیر (۹) بر اساس ضوابط CAN/CSA S6-06 [15] ثابت فرض شد، در آزمایش‌ها از نبشی‌های با بال مساوی $L40*4$ ، $L60*6$ ، $L80*8$ ، $L100*10$ و $L120*12$ استفاده شد. متغیرهای (۱۰) و (۱۱) تغییر داده شد به گونه‌ای که بتوان تأثیر آن‌ها را به‌عنوان متغیری مستقل بررسی و ارزیابی نمود؛ متغیر (۱۲) را با استفاده کردن از نبشی‌های صاف و ماسه پاشی شده، ثابت در نظر گرفته شد، متغیر (۱۳) بر اساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه AISC [16] لنگر پیچشی لازم اعمال شد؛ بنابراین، در هر آزمایش با توجه به معلوم بودن مقدار لنگر پیچشی لازم، ثابت فرض شد. متغیر (۱۴) بر اساس کمترین‌ها و بیشترین‌های آیین‌نامه AISC [16] طراحی و ساخته شد، بارگذاری نیز (متغیر ۱۵ و ۱۶)، به‌صورت یک‌جهته در گوشه نبشی اعمال شد [12]. به صورت کلی، هرچند اعضا بر اساس ضوابط طراحی و بر مبنای تحلیل فرکانسی به دست می‌آیند، ولی بیشتر اعضای مهاربندی از نبشی‌های تک و مقطع پایه‌ها و سایر اعضا از نبشی‌های دوتایی و چهارتایی استفاده می‌شود. در شکل (۱) مقاطع مختلفی که در اعضای برج‌های توربین بادی مشبک استفاده می‌شود، نمایش داده شده است.

(الف) (ب) (ت) (ث)

Fig. 1. Different types of wind turbine lattice tower sections [12]

مدل‌سازی عددی بر اساس آزمایش‌های یعقوبی و شوشتری [11] انجام شد، برای توضیح بیشتر، صفحه‌ای فولادی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر روی میز فلزی صلب و در گوشه آن جوش داده شد به گونه‌ای که نبشی‌ها بتوانند به راحتی به آن پیچ شده و نیرو به گوشه نبشی و به صورت دقیق اعمال شود. با توجه به این که هدف آزمایش، به دست آوردن روشی برای ارزیابی آثار لغزش گرهی بر اتصالات برج‌های مشبک است، نبشی‌ها به صفحه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌متر پیچ شدند، با توجه به این که آثار تغییر شکل

standard finite sliding و پیچ و صفحه ۵۰ میلی‌متری به صورت standard surface to surface و برای هر دو حالت، روش discretization method در نرم‌افزار در نظر گرفته شد. سپس، در منوی Intraction Module/Create Intraction Property/Contact رفته و به‌عنوان Normal Behavior گزینه Contact "Hard" و به‌عنوان Tanjential Behavior گزینه Penalty انتخاب‌شده و ضریب اصطکاک (Friction Coeff) برابر ۰/۲۷ تعریف می‌شود. شایان ذکر است، این مقدار با سعی و خطا به‌دست‌آمده و بر روی ضریب اصطکاک بین فولاد آزمایشی انجام‌نشده است.

۲-۵- هندسه و ابعاد نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده از نبشی با اندازه‌های مختلف ساخته‌شده که جزییات این نمونه‌ها از نظر اندازه نبشی، چیدمان، اندازه و تعداد پیچ‌ها در شکل (۳) و جدول (۱) آمده است. در این نمونه‌ها، از بین همه تغییرشکل‌ها، لغزش گرهی اهمیت بسیار بیشتری دارد زیرا در بارهای کوچک اتفاق می‌افتد [13] و در نظر گرفتن آثار آن، بسیار ضروری است.

۲-۴- خروجی

نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت کلی در شکل (۴) آورده شده است. این نمودارها به‌صورت کلی شامل ۹ نقطه است که مقادیر متناظر با هر نقطه در جدول‌های (۲ تا ۴) و در شکل‌های (۵ و ۶) آورده شده است.

۲-۴-۱- تحلیل حساسیت

برای مدل‌سازی نبشی‌ها از جزء آجری سه‌بعدی خطی ۸ گرهی (C3D8) و برای صفحه ۵۰ میلی‌متری و پیچ‌ها از جزء آجری سه‌بعدی خطی ۸ گرهی با نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته

شکل ۳. هندسه کلی نمونه‌های مورد آزمایش

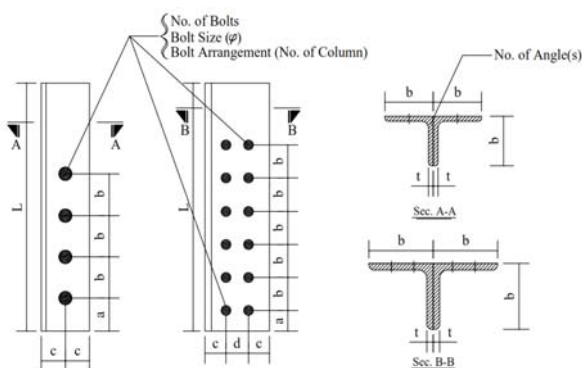


Fig. 3. Details of test specimens

تسلیم آن برابر 640MPa تعریف می‌شود. همچنین، ضریب پواسون در نرم‌افزار برابر با 0.3 برای فولاد در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴-۲- نوع المان‌ها و چگونگی مش‌بندی

نمونه‌های آزمایش، روی میزی فولادی که دارای دو ورق بالایی و پایینی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر و ورق سخت‌کننده است، قرار می‌گیرند، سپس ورق ۵۰ میلی‌متر که نبشی‌ها توسط پیچ به آن اتصال داده‌شده‌اند به آن به صورت نفوذی جوش می‌شود. از این‌رو، با تقریبی بسیار خوب می‌توان میز فولادی را به‌عنوان یک بستر صلب در نرم‌افزار تعریف نمود و با توجه به جوش نفوذی ورق فولادی ۵۰ میلی‌متر به کف، فرض می‌شود که ورق فولادی به‌صورت گیردار به کف اتصال دارد (ENCASTRE $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$). همچنین بارگذاری در نرم‌افزار مانند نمونه‌های آزمایشگاهی وارد شده است، یعنی بار به گوشه نبشی در نمونه‌های تک و در محل مرکز تقارن در نمونه‌های دوتایی اعمال می‌شود. در نرم‌افزار روی سطح فوقانی، با استفاده از زیرشاخه Intraction Module/Create Constraint/MPC Beam، یک نقطه مرجع قرار داده به گونه‌ای تغییر شکل کل آن بخش، به نقطه‌ی مرجع داده می‌شود. با این راهکار، تغییر شکل کل بخشی که در زیر صفحه فولادی قرار گرفته، به یک نقطه مرجع اختصاص می‌یابد و کافی است بار را به این نقطه اختصاص داد. با این توضیحات، در نرم‌افزار زیرشاخه‌ی

Load Module/Create Boundry Condition/Mechanical انتخاب‌شده و تغییر مکان در راستای بارگذاری آزمایشگاهی به صورت رفت و برگشتی تعریف می‌شود. بدیهی است میزان بزرگی تغییر مکان در نرم‌افزار بایستی اعمال شود، درحالی‌که در آزمایشگاه، نیرو قرائت می‌شود؛ از این‌رو، می‌توان با سعی و خطا نیروی قرائت‌شده در آزمایشگاه را به عنوان تغییر مکان در نرم‌افزار اعمال نمود. برای تعریف میزان لنگر پیچشی (پیش‌تندگی) وارد بر پیچ‌ها را، در نرم‌افزار به منوی Load Module/Create Load/Mechanical (Bolt Load) رفته و میزان لنگر پیش‌تندگی تعریف می‌شود. این لنگر مطابق آیین‌نامه AISC [14] در نظر گرفته و در نرم‌افزار اعمال‌شده است.

اندرکنش بین صفحه فولادی ۵۰ میلی‌متری و نبشی که توسط پیچ به آن متصل شده است و پیچ‌ها و نبشی به‌گونه‌ای است که پیچ‌ها داخل نبشی یا صفحه‌ی فولادی نشده و تنها آثار لغزش در آنها مشاهده می‌شود؛ برای این منظور، اندرکنش پیچ و نبشی به‌صورت

و -z را در نظر می گیرد. جزء C3D8 دارای ۸ نقطه انتگرال گیری و جزء C3D8R تنها دارای یک نقطه انتگرال گیری است. به منظور بررسی و ارزیابی همگرایی و درستی مدل سازی، تحلیل همگرایی برای یک مدل گزارش شده است و نتایج نشان می دهد که مدل با مش بندی مناسب همگرا خواهد شد؛ علاوه بر این، سعی شده است که از مش های تقریباً مکعبی استفاده شود تا خطای عددی حاصل، کم تر و اندازه مش بندی مناسب باشد تا زمان تحلیل نیز تا حد ممکن کوتاه و پاسخ ها از دقت لازم برخوردار باشند، به عنوان نمونه، برای نمونه شماره ۵

شکل ۴. نمودار کلی و ایده آل سازی شده ی نیرو-تغییر مکان گرهی نتایج آزمایش [11-12]

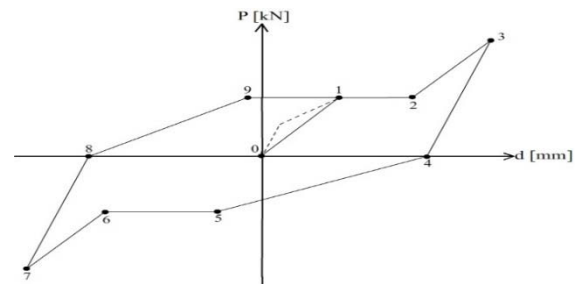


Fig. 4. General diagram of idealized load vs. deformation for joints.

(C3D8R) استفاده شده است. این دو جزء با ۶ درجه آزادی در

هر گره تعریف شده که تغییر مکان و دوران در راستای x-، y-

جدول ۱. فهرست و جزییات نمونه های مدل سازی شده

No.	Angle (b*b*t)			Bolts			End/Edge distance [mm]			
	No. Angle(s)	b [mm]	t [mm]	No.	No. Column	Size [mm]	L	a	b	c d
1	1	40	4	2	1	16	200	40	50	20 ---
2	1	80	8	5	1	20	440	50	70	40 ---
3	2	100	10	6	1	22	525	50	70	50 ---
4	2	40	4	2	1	16	200	40	50	20 ---
5	2	80	8	5	1	20	440	50	70	40 ---
6	2	120	12	16	2	16	300	25	40	26 28

Table 1. Details of test specimens

جدول ۲. مقادیر نیرو-تغییر مکان گرهی در نمونه های ۱ تا ۳

شماره نمونه	1(L40*4-2Bolt16)		2(L80*8-5Bolt20)		3(L100*10-6Bolt22)	
	Force [kN]	Displacement [mm]	Force [kN]	Displacement [mm]	Force [kN]	Displacement [mm]
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	15.022	0.689	50.023	0.684	66.646	0.659
2	15.022	1.346	50.023	1.195	66.646	1.196
3	24.669	1.800	108.724	1.982	133.870	1.890
4	0.000	1.090	0.000	1.063	0.000	1.056
5	-17.946	0.173	-63.002	0.109	-89.270	0.050
6	-17.946	-1.435	-63.002	-1.231	-89.270	-1.424
7	-25.830	-1.716	-129.358	-1.905	-146.735	-1.870
8	0.000	-1.281	0.000	-1.264	0.000	-1.336
9	15.022	-0.167	50.023	-0.167	66.646	-0.252

Table 2. Load-displacement value in specimens No. 1 to 3.

جدول ۳. مقادیر نیرو-تغییر مکان گرهی در نمونه های ۴ تا ۶

شماره نمونه	4(2L40x4-2Bolt16)		5(2L80x8-5Bolt20)		6(2L100x10-6Bolt22)	
	Force [kN]	Displacement [mm]	Force [kN]	Displacement [mm]	Force [kN]	Displacement [mm]
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.687	29.437	96.402	0.670	125.481	0.760
2	1.537	30.378	94.900	1.445	124.572	1.381
3	2.588	64.610	181.179	2.131	267.370	2.306
4	1.487	0.000	0.000	1.103	0.000	1.107
5	0.264	-34.251	-106.252	0.161	-138.092	-0.117
6	-1.561	-33.414	-108.775	-1.425	-135.772	-1.354
7	-2.351	-62.500	-216.705	-2.231	-305.247	-2.270
8	-1.591	0.000	0.000	-1.123	0.000	-0.981
9	-0.188	31.892	98.322	-0.160	127.340	0.058

Table 3. Load-displacement value in specimens No. 4 to 6.

جدول ۴. مقادیر نیرو-تغییر مکان گرهی در نمونه‌های ۷

7(2L120x12-16Bolt16)		
شماره نمونه	Force [kN]	Displacement [mm]
0	0.000	0.000
1	97.929	0.694
2	95.659	1.466
3	256.485	2.329
4	0.000	1.250
5	-110.152	-0.049
6	-110.541	-1.757
7	-296.989	-2.907
8	0.000	-1.542
9	104.271	0.094

Table 4. Load-displacement value in specimen No. 7.

مش بندی به گونه‌ای انجام می‌شود که مش در محل سوراخ‌ها، ریزتر باشد تا با این راهکار، پاسخ‌های مناسب‌تری را می‌توان از نرم‌افزار دریافت نمود. در شکل (۷) برای نمونه ۵ تحلیل حساسیت انجام شده و نمایش داده شده است.

شکل ۷. تحلیل حساسیت نمونه شماره ۵ برای بررسی همگرایی

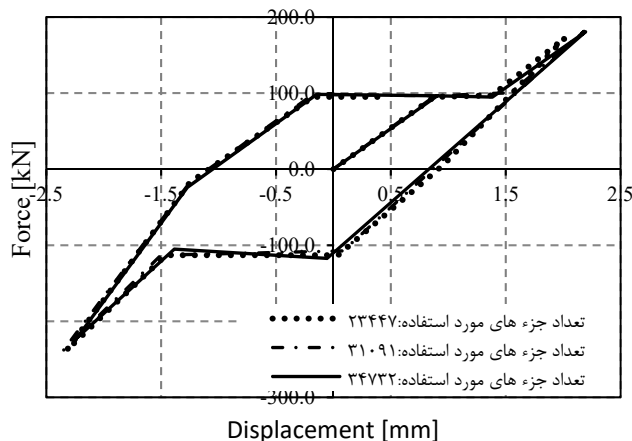


Fig. 7. Sensitivity analysis of specimen no. 5.

۲-۴-۲- تفسیر خروجی نرم‌افزار

بر اساس نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایش، سختی الاستیک قبل از لغزش (بین نقاط ۰ و ۱ در شکل ۴) کوچک ترین بخش از نمودار نیرو-تغییر مکان است که به علت نیروی اصطکاک، بین پیچی که توسط لنگر پیچشی مطابق آیین‌نامه پیش تنیده شده است و نبشی به وجود می‌آید. سختی الاستیک قبل از لغزش بستگی به تعداد پیچ‌های اتصال، قطر پیچ، اندازه و ضخامت نبشی و مساحت مؤثر مقطع دارد.

لغزش گرهی (بین نقاط ۱ و ۲ در شکل ۴) به عنوان اولین تغییر شکل هنگامی که بار تقریباً ثابت است اطلاق می‌شود که

شکل ۵. نمودار نیرو-تغییر مکان گرهی برای نمونه‌های شماره ۱ تا ۳

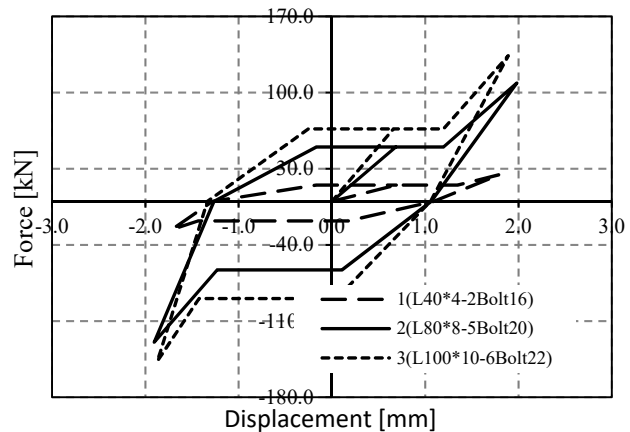


Fig 5. Load vs. total joint deformation for specimens' No. 1 to 3.

شکل ۶. نمودار نیرو-تغییر مکان گرهی برای نمونه‌های شماره ۴ تا ۷

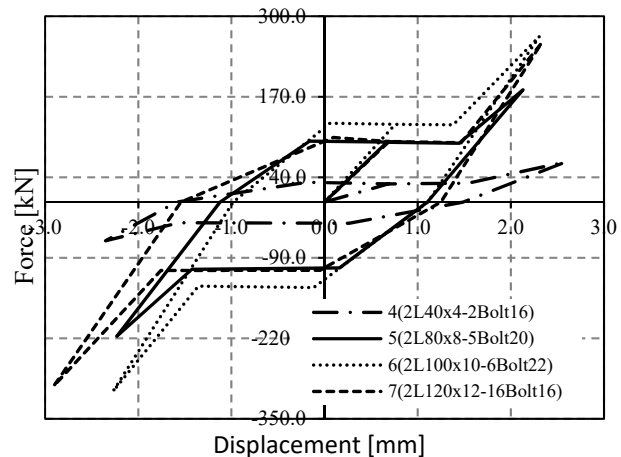


Fig 5. Load vs. total joint deformation for specimens' No. 4 to 7.

(2L80*80*8-5Bolt20) تعداد مش‌ها برابر ۲۳۴۴۷ و ۳۱۰۹۱ و ۳۴۷۳۲ در نظر گرفته شده است. همچنین، محل سوراخ‌ها در نبشی بسیار مهم و در نتایج تأثیر زیادی خواهد داشت، پس

و نیروی این اعضا زیاد است، در نظر گرفتن آثار آن بسیار مهم است زیرا مشخص می‌شود که لغزش گرهی در طی بارهای سرویس اتفاق می‌افتد [13]. بخش الاستیک انتقال بار که توسط پیچ‌های اصطکاکی پس از لغزش اتفاق می‌افتد (بین نقاط 2 و 3 در شکل ۴)، نتایج نشان می‌دهد شیب این بخش نزدیک به شیب سختی الاستیک قبل از لغزش است. بخش باربرداری نمودار (بین نقاط 3 و 4 در شکل ۴ متناسب با سختی الاستیک قبل از لغزش است. نسبت شیب این بخش به اولین شیب در ناحیه فشاری (بین نقاط 4 و 5 در شکل ۴) به صورت تقریبی برابر با $1/35$ است که این عدد نسبت به نمونه‌های تک نبشی کمتر است. ناحیه فشاری از نقطه 4 در شکل (۵) شروع شده و شامل ۴ بخش است که متناسب با ۴ بخش در ناحیه کششی است. در شکل (۸) رفتار نبشی‌های تک و دوتایی مقایسه شده‌اند.

در سختی‌های کوچک اتفاق می‌افتد [13] و بستگی به تعداد پیچ‌های اتصال، قطر پیچ، اندازه و ضخامت نبشی و مساحت خالص مقطع دارد. همچنین، اگرچه Ungkurapinan و همکاران [13] به این نتیجه رسیدند که بیشینه تغییر مکان گرهی در زمان لغزش به $3/2$ میلی‌متر (اختلاف بیشینه در اندازه سوراخ و قطر پیچ) و $1/6$ میلی‌متر (اختلاف نرمال در اندازهی سوراخ و قطر پیچ) نمی‌رسد، لیکن بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، اگر ظرفیت اتصال بیشتر از ظرفیت مقطع باشد، لغزش گرهی به حدود ۲ میلی‌متر خواهد رسید که ۲ میلی‌متر اندازهی استاندارد در اختلاف اندازهی سوراخ و قطر پیچ‌های کوچک‌تر از ۲۴ میلی‌متر است [18]. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که لغزش گرهی در بین بارهای ۳۰ کیلو نیوتن تا ۱۲۵ کیلو نیوتن اتفاق می‌افتد که نسبت به نمونه‌های مشابه تک نبشی نیروی لغزش نزدیک به دو برابر شده است، با توجه به این‌که نمونه‌های دوتایی در پایه‌های اصلی توربین بادی بکار می‌رود

شکل ۸. مقایسه نبشی‌های دوتایی و تک از نظر رفتاری

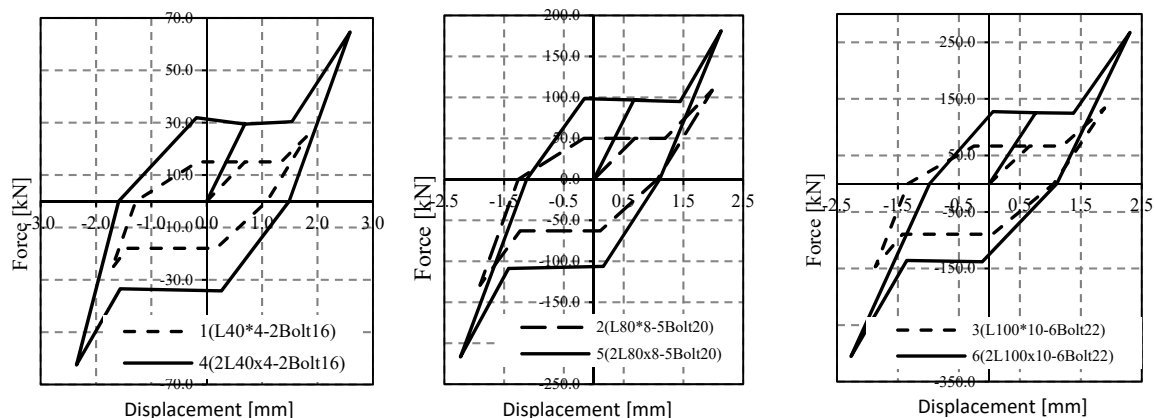


Fig. 8. Comparison of Load vs total joint deformation for Specimens.

آزمایشگاهی نوشته شده است.

۲-۵- محاسبه نسبت میرایی ویسکوز (ζ) برای اتصالات مدل‌سازی شده

بر اساس نمودارهای نیرو-تغییرمکان، نسبت میرایی ویسکوز (ζ) برای اتصالات مورد آزمایش، قابل محاسبه است $\frac{E_D}{4\pi E_S}$ نسبت میرایی ویسکوز (ζ) را می‌توان بر اساس فرمول بدست

آورد که در این فرمول E_S انرژی استاتیکی و E_D سطح کل نمودار نیرو-تغییرمکان است. با توجه به نمودارهای نیرو-

۳-۴-۲- درستی آزمایشی نمونه‌های نرم‌افزار با نمونه های مشابه آزمایشگاهی

مدل‌سازی در نرم‌افزار باید با نتایج آزمایش همخوانی کافی داشته باشد. برای بررسی هماهنگی نمودارهای نیرو-تغییرمکان آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده در Abaqus، دو نمودار مشابه از هر نمونه را روی یکدیگر قرار داده می‌شود. مقایسه نمودارهای نیرو-تغییرمکان آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده در Abaqus در شکل‌های (۹) آورده شده است. برای توضیح بیشتر در این نمودارها، عبارت Experiment برای نمونه‌های

طول مدلسازی شده کوتاه است و با مدل نمودن کل عضو، می توان دو سر عضو را به صورت فنری با این میرایی در نظر گرفت. همچنین، نسبت میرایی در حالت نبشی دوتایی و تک تغییر زیادی با یکدیگر ندارد و با افزایش تعداد پیچ و کاهش قطر آن، نسبت میرایی اتصال افزایش خواهد یافت.

شکل ۹. مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان آزمایشگاهی و Abaqus برای نمونه های ۱ تا ۳.

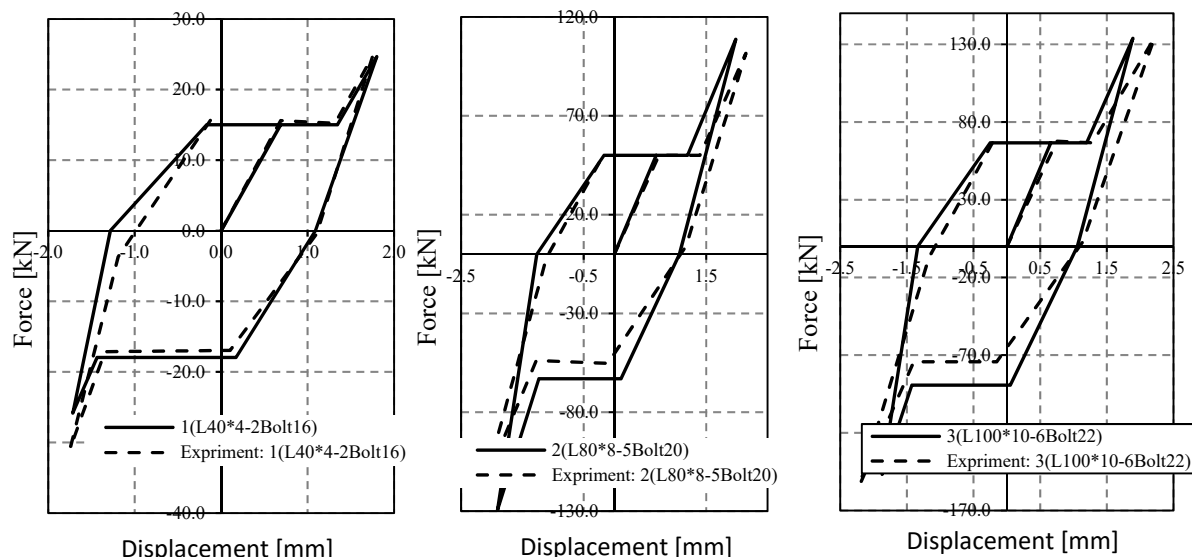


Fig.9. Comparison of the experimental results vs. the results obtained from Abaqus for specimens No. 1 to 3.

جدول ۵. محاسبه نسبت میرایی ویسکوز (ζ)

شماره نمونه	E_D	E_s	نسبت میرایی ویسکوز (ζ)
1(L40*4-2Bolt16)	61.395	11.358	0.430
2(L80*8-5Bolt20)	199.608	40.774	0.390
3(L100*10-6Bolt22)	274.148	54.551	0.400
4(2L40x4-2Bolt16)	171.524	31.111	0.439
5(2L80x8-5Bolt20)	413.165	77.468	0.424
6(2L100x10-6Bolt22)	475.310	102.425	0.369
7(2L120x12-16Bolt16)	481.978	78.474	0.489

Table 5. Calculation of viscous damping ratio (ζ).

۳- نتایج نشان می دهد لغزش گرهی در طول بارهای سرویس اتفاق می افتد و قطر پیچ مهم ترین پارامتر برای پیش بینی رفتار گره است.

۴- نسبت میرایی ویسکوز (ζ) برای اتصالات تک و دوتایی نبشی تقریباً با هم برابرست و می توان آن را ۴۲/۵ درصد فرض نمود. این نسبت با افزایش تعداد و کاهش قطر پیچ افزایش می یابد.

۴- مراجع

- [1] Şahin AD. Progress and recent trends in wind energy. Progress in energy and combustion science. 2004 Jan 1; 30(5):501-43.
- [2] Weitkamp R, Hinz U, Schäfer S, inventors; Envion SE, assignee. Tower for a wind power

۳- نتایج

در این پژوهش دستاوردهای گوناگونی حاصل شد که از آن میان، می توان بر نتایج زیر تأکید کرد.

۱- در نظر گرفتن لغزش گرهی در رفتار برج مشبک، سختی برج کاهش خواهد یافت و باعث افزایش در تغییر شکل های برج می شود.

۲- رفتار گره تحت بارگذاری چرخه ای به تعداد پیچ، قطر پیچ، سطح مقطع پیچ، ضخامت نبشی و سطح مقطع مؤثر بستگی دارد.

- [12] Yaghoobi S, Shooshtari A. *Joint Slip Formulation Based on Experimental Results in Wind Turbine Lattice Towers*. Journal of Structural Engineering. 2018 Jun 1; 144(6):04018058.
- [13] Ungkurapinan N, Chandrakeerthy SD, Rajapakse RK, Yue SB. *Joint slip in steel electric transmission towers*. Engineering Structures. 2003 May 1; 25(6):779-88.
- [14] AISC 341-10. Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction. 2010.
- [15] Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). Supplement# 1 to CAN/CSA-S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). CSA S6S1-10. 2010.
- [16] Bolts AH. Shop install high-strength bolts according to RCSC's" *Specification for Structural Joints Using ASTM A 325 or A 490 Bolts*" for type of bolt and type of joint specified. 1. Joint Type: Snug tightened.
- [17] Lloyd G. *Rules and Guidelines IV, Industrial Services 1, Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg, Germany. 2003.
- [18] Kulak GL, Fisher JW, Struik JH. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints* Second Edition. station. United States patent US 7,276,808. 2007 Oct 2.
- [3] Muskulus M. *The full-height lattice tower concept*. Energy Procedia. 2012 Jan 1; 24:371-7.
- [4] Gencturk B, Attar A, Tort C. *Optimal design of lattice wind turbine towers*. In 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012 Sep (pp. 24-28).
- [5] Al-Bermani FG, Kitipornchai S. *Nonlinear analysis of transmission towers*. Engineering Structures. 1992 Jan 1; 14(3):139-51.
- [6] Al-Bermani FG, Kitipornchai S. *Elastoplastic nonlinear analysis of flexibly jointed space frames*. Journal of Structural Engineering. 1992 Jan; 118(1):108-27.
- [7] Alberman F, Kitipornchai S, Chan RW. *Failure analysis of transmission towers*. Engineering Failure Analysis. 2009 Sep 1; 16(6):1922-8.
- [8] Knight GM, Santhakumar AR. *Joint effects on behavior of transmission towers*. Journal of Structural Engineering. 1993 Mar; 119(3):698-712.
- [9] Ungkurapinan N. *A study of joint slip in galvanized bolted angle connections*. PhD diss., University of Manitoba, 2000.
- [10] Ahmed KI, Rajapakse RK, Gadala MS. *Influence of bolted-joint slippage on the response of transmission towers subjected to frost-heave*. Advances in Structural Engineering. 2009 Feb; 12(1):1-7.
- [11] Yaghoobi S, Shooshtari A. *Joint slip investigation based on finite element modelling verified by experimental results on wind turbine lattice towers*. Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2018 Sep 1; 12(3):341-51.

Joint Slippage Investigation of double angle on Wind Turbine Lattice Towers Using Finite Element Modelling

Amir Ebrahimi¹, Saleh Yaghoobi²

1 MS student, Department of Civil Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran.

Saleh.yaghoobi@Bojnourdiau.ac.ir

Abstract

Although fossil fuel resources are declining, their use also pollutes the environment. Also, due to the increase in the average wind speed in the world, the use of wind turbines, which are classified in structures with new and renewable energy, will be very cost-effective. Wind turbine towers can be made of concrete, steel, conical, lattice, wood, or multi material. Given that the investment cost to build a wind farm and connect it to the transmission network is 75 to 85 percent, and the cost of building the structure is 15 to 25 percent of the total cost. Steel lattice towers can reduce the cost of building a wind turbine structure by 30 percent and therefore, a complete and correct model for analyzing these types of structures will be very important and economically noteworthy. Wind turbine lattice towers are usually made and executed with bolt connections. In this case, the number of bolts is very high, which increases the need for cyclical and reciprocal loads. Joint slip in these structures refers to the relative displacement of bolt connection under the influence of force. Therefore, creating a joint slip will be inevitable due to the ease and speed of execution in which the bolt hole is made of a larger bolt diameter. Joint slip increase the displacement of lattice towers So much so that the maximum displacement of the tower is twice as high as that of static methods. And not considering it will destroy the tower and assuming the reliability factor will make it uneconomical. In this type of structure, the tower is often made of angle and single angles are used in cross members and bracing and double angles are mostly used in the bases of lattice towers. With this explanation, in this study, the force curve of the displacement of the of three samples with single angle section in the laboratory and four samples with double angle section in Abaqus software was modeled and were affected by reciprocating loads and then the results of numerical modeling were validated with laboratory samples. In the models modeled in the software, after sensitivity analysis, the type and size of the mesh is precisely minimized the resulting error. In this investigation available data in joint slip develops bolt connections which include angles with equal leg. It offers force-displacement curve of different connections for double angles and their connections damping ratio are calculated likewise and the effectiveness of each variable on the slip of the node is expressed in double angles. The results show that joint slip occurs during service loads and this effect depends on the number of bolt, the diameter of the bolt, the bolt cross-sectional area, the thickness of the angle and the effective cross-sectional area among these, screw diameter is the most important variable for predicting joint behavior. Also, the viscosity damping ratio for single and double angle connections is almost equal and can be assumed to be 42.5. This ratio increases with increasing number and decreasing bolt diameter. This investigation is beneficial for designing wind turbine lattice towers and in it, provides structure behavior to the designer more accurately.

Keyword: Wind Turbine Lattice Tower, Joint Slippage, cyclic loading, Abaqus, Damping Ration (ζ).