

## بررسی سفتی ساختار خرپاهای چوبی به روش عناصر محدود

احسان کتابی<sup>۱</sup> و امیر لشگری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، مهرشهر

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، مهرشهر

پست الکترونیک: amir.lashgari@kia.ac.ir

تاریخ پذیرش: دی ۱۳۹۵

تاریخ دریافت: آبان ۱۳۹۵

### چکیده

در این تحقیق تأثیر ساختار سازه خرپا بر روی سفتی و توزیع تنش در عضوهای سازه خرپا مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور نمونه‌هایی در ۱۱ ساختار با چهار ۴ تکرار با چوب تبریزی (*Populus nigra*) ساخته و به‌طور همزمان از دو اتصال مفصلی و اصطکاکی استفاده شد. به‌منظور محاسبه مقاومت خرپاها ابتدا سازه‌ها توسط دستگاه آزمون مکانیکی با سرعت ۱۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شدند. نتایج نشان داده است که خرابی Hip Girder بیشترین مقاومت و کمترین توزیع تنش را نسبت به بقیه خرپاها دارا بوده است. تأثیر ساختار خرپا بر روی مقاومت و توزیع تنش در عضوهای آن در سطح ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. برای نشان دادن توزیع تنش بر روی اعضا از روش اجزاء محدود و دو نرم‌افزار Autodesk و ANSYS استفاده شد. نتایج حکایت از آن دارد که تمرکز تنش حداکثر در تعامل با شکست در حالت تجربی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خرپا، آزمون مکانیکی، اتصال مفصلی، اتصال اصطکاکی، عناصر محدود.

### مقدمه

تولید و توسعه سازه‌های چوبی، منجر به پیدایش نسل جدیدی از اسکلت ساختمان‌های چوبی شده است (Freilingor et al., 1997) در سازه‌های چوبی نیروهای محوری در المان‌های دیوار، سقف و کف توسط مقاطع خرپا تحمل شده و از طرف دیگر مجموع خرپاها با مقاومت برشی بالا علاوه بر سختی اجزا ساختمانی، سختی کل سازه را عهده‌دار است (Hektor et al). در اسکلت سازه‌های چوبی هریک از اجزا به راحتی در پیکربندی آن جابجا و فضای میان چوب‌ها با مواد عایق پر می‌شود. بدین وسیله اعضای باربر، عایق حرارتی و صوتی لازم و مناسب را

داراست. فاصله بین ستون‌ها و تیرهای سازه‌های چوبی بستگی به ابعاد صفحات پوششی چوبی دارد (Arguelles et al., 2003). توسعه مواد با کیفیت بالا سهم مهمی در بهبود سازه و خرپا داشته و عمر چوب به گونه، وزن مخصوص و به‌ویژه محل مصرف بستگی دارد. ولی به‌طور کلی می‌توان گفت اگر چوب در شرایط ثابت از نظر آب‌وهوا و رطوبت قرار گیرد عمر آن از چند صدسال نیز بیشتر خواهد بود (Stehn and Borjes K., 2004). سازه‌های سبک، مقاوم و شکل‌پذیر با خاصیت الاستیسیته مناسبی هستند. عناصر باربر سازه ترکیبی است از خرپاها و صفحات پوششی دیوارها که با هم تشکیل یک سیستم می‌دهند و در مجموع

مقاومت برشی و فاکتور سفتی نمی‌توان نادیده گرفت (Hektor and Thoma., 2007).

هدف در این بررسی، مقایسه تغییر شکل در سازه‌های خرپای ساخته شده با ماده غیر ایزوتروپیک می‌باشد که این خود تفاوت این تحقیق با سایر تحقیقات می‌باشد (که بر روی مواد ایزوتروپیک بررسی شده‌اند). با توجه به اینکه تعداد پارامترهای مهندسی در مواد ارتوتروپیک در جهات مختلف متفاوت است، نمی‌توان از نتایج خرپاهای ساخته شده با مواد ایزوتروپیک برای بررسی رفتار خرپاهای ساخته شده از مواد ارتوتروپیک بهره برد.

خرپای یکی از سازه‌های اصلی مهندسی است. هر خرپا شامل عضوهای مستقیمی است که در مفصل‌ها به یکدیگر متصل‌اند. عضوهای خرپاها تنها از دوسر به هم متصل می‌شوند.

خرپای **King Post**: یکی از ساده‌ترین سبک‌های پیاده سازی خرپا است، متشکل از دو بال زاویه دار، دو چشمه، یک بال تحتانی و یک عضو پشتیبانی عمودی مرکزی است که برای مهار بهتر است و معروف به عضو کروات و در رأس تنش نیروهای عمودی را کنترل می‌کند. این سازه در اثر اعمال نیروی فشاری دچار خمیدگی زیاد می‌شود و موارد استفاده طراحی آن در سازه‌های مکانیکی و مهندسی دریایی و معماری زیاد است. این سازه خرپای ساده برای سقف با دهانه کوتاه و پل برای مصارف کوتاه مدت استفاده می‌شود. این سازه از کمترین تعداد اعضا ساخته شده است. عضو افقی ممکن است به عنوان یک تیرچه سقف مورد استفاده قرار گیرد.

خرپای **Howe(K)**: این خرپا در قالب یک K با توجه به جهت گیری دو عضو مورب از عضو عمودی و در هر مقطع قطر تحت فشار تحت بار متعادل خرپاها و نسبتاً نادر است، شامل اعضای عمودی و قطری که شیب به سمت مرکز، برخلاف خرپای پرات هستند. اعضای مورب فشاری می‌باشد و اعضای عمودی در تنش هستند.

خرپای **Fink(W)**: خرپا فینک (نیمه طول و سطح مقطع): خرپا فینک توسط آلبرت فینک اهل آلمان در سال ۱۸۶۰

باربری هریک از آنها چند برابر ظرفیت تنهائی افزایش می‌یابد. صفحات پوششی دیوار مانع از کمناش تیرها و خرپاها شده و همزمان تیرها و خرپاها هم از کمناش صفحات پوششی جلوگیری می‌کنند ( Hektor et al., 2007). اتصالات این سیستم شامل میخ، گیره، پیچ و صفحه‌های فلزی عاج‌دار می‌باشد. از قابلیت‌های مثبت قابل ذکر می‌توان به اجرا در کارگاه یا اجرای کامل یک ساختمان به صورت پیش‌ساخته و مقاومت در برابر زلزله به دلیل داشتن ضریب الاستیسیته بالا اشاره کرد. با توجه به موارد ذکر شده آشنایی با انواع خرپاها، نحوه ساخت آنها و بررسی مقاومت آن حائز اهمیت و تحقیق در این زمینه باعث کاربرد صحیح این سیستم استاتیکی در ساختمان‌سازی به‌عنوان یک مصالح مناسب خواهد شد ( Kent et al., 1999). بررسی رفتار خرپای چوبی با اتصالات پیچ و مهره در برابر باد نشان داد که با توجه به آزمون استاتیکی مقاومت میانگین اتصال سازه خرپا تحت کشش ۱۷٪ بیشتر از همان اتصال تحت فشار است و اختلاف معنی‌داری در فاکتور سفتی این اتصال تحت فشار یا کشش وجود ندارد (Gupta et al., 2004). اتصالات پیچ و مهره در خرپای چوبی در شرایط زلزله شبیه‌سازی و بررسی شد و اعلام شد که هیچ رابطه‌ای بین درجه مقاومت چوب و زلزله وجود ندارد. اما بر این نکته تأکید شد که تفاوت اندکی در سفتی اتصالات محوری وجود دارد و میزان خسارت‌های زلزله بستگی به میزان جابجایی اتصالات دارد ( Kent et al., 1999). از بارهای محوری متناوب برای بررسی مدت زمان فاکتور فشار برای باد و زلزله و میزان بار زلزله در اتصالات خرپا استفاده شده و دریافتند که فاکتور (۱/۶) برای آن مناسب و درجه‌بندی سفتی مناسبی را برای هر اتصال ارائه شد (Freilingor et al., 1997). اتصالات خرپاهای ساخته شده از چوب‌های قدیمی آزمایشی تحت تنش برشی انجام داده و مشخصات نمونه‌های آزمایش مشخصاتی را که از اجزای تیرهای ساختمانی انتظار می‌رفت، نشان داد، همچنین ثابت شد اگر ترک‌ها در صفحه شکست نباشند، اثر منفی در مقاومت برشی اتصال ندارند و حتی تأثیر مثبت گره را در

چوب تبریزی (*Populus nigra*)، میخ فولادی و چسب پلی ونیل استات (جدول ۱ و ۲).  
 مشخصات میخ  
 طول ۴ میلی متر و قطر ۱/۵ میلی متر  
 سطح مقطع عضوهای خرپا  
 ۲\*۲ سانتیمتر

#### آزمون مکانیکی

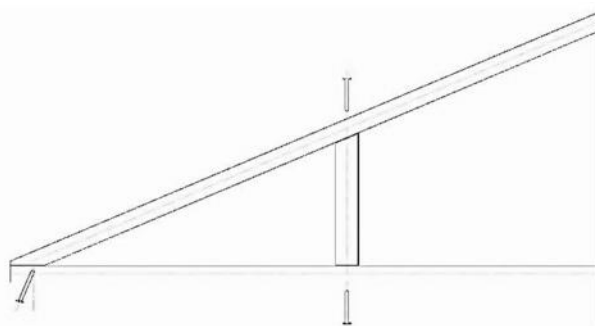
سازه‌های خرپای ساخته شده برای انجام آزمون مکانیکی به آزمایشگاه مکانیک منتقل و توسط دستگاه آزمون مکانیکی مدل INSTRON 4486 با سرعت بارگذاری  $12/5 \text{ mm/min}$  که نیرو در دو سطح به فاصله ۳۵ cm از دو طرف در جهت عمود بر تیر افقی اعمال (شکل ۲) و مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۲).  
 بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آماری توسط نرم افزار SPSS از روش تجزیه واریانس آزمایش در سطح ۹۵٪ قابل اطمینان استفاده شد (جدول ۶).

طراحی شد. با این نوع خرپا، پل محبوب بالتیمور و راه آهن اوهایو را طراحی کردند. برای دهانه هایی از ۶۰۹۶/۰ تا ۹۱۴۴/۰ سانتیمتر به نسبت سطح مقطع، بهتر است مورد مصرف قرار گیرد.  
 خرپای Fan: نوعی خرپای فینیک، دارای جان‌هایی که تعدادشان بیشتر از سه عدد است و از یک نقطه مرکزی به سمت بیرون منشعب می‌شوند، طراحی می‌شود.

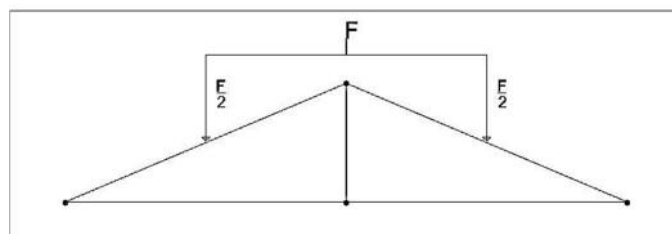
خرپای Hip Grider و Step Down: ترکیبی از خرپاها و خرپای سقفی هستند که در سازه پل کاربرد فراوانی دارند.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر شکل خرپاهای چوبی بر سفتی (میزان جابجایی و تغییر شکل ساختار خرپا) و نحوه توزیع تنش از دو روش آزمون مکانیکی و شبیه سازی توسط نرم افزار ANSYS برای تجزیه و تحلیل عناصر محدود استفاده شد.  
 مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:



شکل ۱- اتصال میخ در سازه خرپا



شکل ۲- نحوه اعمال نیرو بر خرپا

جدول ۱- پارامترهای مهندسی چوب تبریزی

۷	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۵	ضریب پوآسون
۰/۳۵	دانسیته ( $\text{gr/cm}^3$ )

جدول ۲- مشخصات چسب پلی ونیل استات

چسب	توصیف	آماده سازی	عمر انبار	زمان سوار کردن	مدت عمل کردن	درز پرکنی	مقاومت به رطوبت
PVA	گرما نرم	نیاز ندارد	۶ ماه	۱۰ دقیقه	۲ ساعت در دمای معمولی	ضعیف	ضعیف

ادامه جدول ۲-

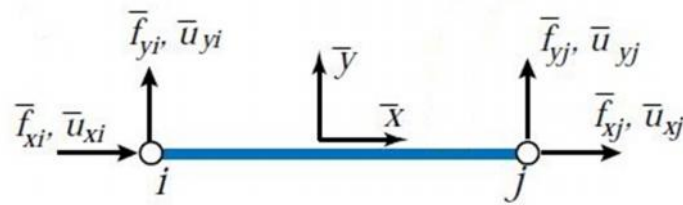
مقاومت به دما	کاربردها	حالت	PH	حلال	پرکننده ها	گران روی
با گرما نرم می شود	نجاری-اتصالات	محلول با امولسیون	۷	استرها، الکل های سبک	گچ، کلسیم، کربنات اندود شده	۶۰۰۰CP در دمای ۲۵ درجه

## روش عناصر محدود

برای انجام آزمون به روش عناصر محدود از نرم افزار ANSYS استفاده شد. مراحل تجزیه و تحلیل در این روش به شرح زیر است.



محاسبات عددی



شکل ۳- یک عضو عمومی خریا

رابطه سختی عضو برابر است با

$$f = K u \quad \text{فرمول ۱:}$$

به طور کلی از نظر FEM بردار F و U به ترتیب نیرو و جابجایی عضو نامیده می شوند، در حالی که K ماتریس سختی عضو است. به طوری که راه های مختلفی برای نوشتن K ماتریس سختی از نظر E، L و A وجود دارد.

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{xi} \\ \bar{f}_{yi} \\ \bar{f}_{xj} \\ \bar{f}_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{K}_{xixi} & \bar{K}_{xiyi} & \bar{K}_{xijj} & \bar{K}_{xiyj} \\ \bar{K}_{yixi} & \bar{K}_{yiyi} & \bar{K}_{yixj} & \bar{K}_{yiyj} \\ \bar{K}_{xjxi} & \bar{K}_{xjyi} & \bar{K}_{xjjj} & \bar{K}_{xjyj} \\ \bar{K}_{yjxi} & \bar{K}_{yjyi} & \bar{K}_{yjxj} & \bar{K}_{yjyj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{xi} \\ \bar{U}_{yi} \\ \bar{U}_{xj} \\ \bar{U}_{yj} \end{bmatrix} \quad \text{فرمول ۲:}$$

$$F = k_s d = \frac{EA}{L} d \quad \text{فرمول ۴:} \quad K_s = \frac{EA}{L} \quad \text{فرمول ۳:}$$

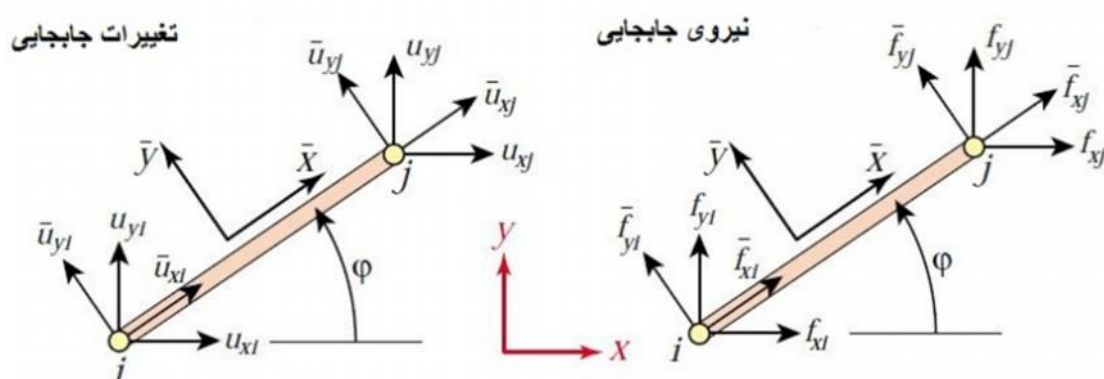
که در آن F نیروی محوری داخلی و d جابجایی محوری نسبی

$$F = f_{xj}, \quad d = U_{xj} - U_{xi} \quad \text{فرمول ۵:}$$

$$\bar{f} = \begin{bmatrix} \bar{f}_{xi} \\ \bar{f}_{yi} \\ \bar{f}_{xj} \\ \bar{f}_{yj} \end{bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{xi} \\ \bar{U}_{yi} \\ \bar{U}_{xj} \\ \bar{U}_{yj} \end{bmatrix} \quad \text{فرمول ۶:}$$

$$\bar{K} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

فرمول ۷: ماتریس سختی خریا



شکل ۴- نمایش جابجایی و نیروها بر روی یک عضو خرپا با تغییر زاویه  $\phi$  در خرپاهای مختلف (نوع خرپا) اعداد داخل ماتریس تبدیل، در روش عناصر محدود تغییر خواهد کرد.

محاسبات جابجایی و نیرو در شکل (۴)

$$\bar{U}_{xi} = U_{xi}C + U_{yi}S, \quad \bar{U}_{yi} = -U_{xi}S + U_{yi}C,$$

$$\bar{U}_{xj} = U_{xj}C + U_{yj}S, \quad \bar{U}_{yj} = -U_{xj}S + U_{yj}C,$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{xi} \\ \bar{U}_{yi} \\ \bar{U}_{xj} \\ \bar{U}_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & S & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{xi} \\ U_{yi} \\ U_{xj} \\ U_{yj} \end{bmatrix}$$

که در آن  $C = \cos \phi$ ,  $S = \sin \phi$  و زاویه تشکیل شده توسط  $X$  و  $\bar{X}$ .

$$\begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ f_{xj} \\ f_{yj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -S & 0 & 0 \\ S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & -S \\ 0 & 0 & S & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{f}_{xi} \\ \bar{f}_{yi} \\ \bar{f}_{xj} \\ \bar{f}_{yj} \end{bmatrix}$$

### نتایج

در جان‌های بالای خرپاها می‌باشد (جدول ۳).  
در جدول شماره (۴) نتایج مقاومت مکانیکی خرپاها و در جدول‌های (۳، ۴ و ۵) میزان کرنش و تنش در اعمال نیروهای مختلف آورده شده است.

نتایج به دست آمده از روش عناصر محدود نشان می‌دهد با تغییر نوع خرپا، ماتریس ضریب سفتی خرپا تغییر می‌کند. میزان جابجایی در خرپاهای مختلف متفاوت بوده و کمترین جابجایی در تکیه‌گاه‌ها به میزان ۰ mm و بیشترین جابجایی

جدول ۴- میانگین نیروی برشی خرپاها در آزمون مکانیکی

نام خرپا	نیروی برشی KN
King Post	۱/۰۳۱۴
Howe(K)	۱/۵۷۰۵
Double Howe(KK)	۱/۶۶۳
Triple Howe(KKK)	۱/۹۹۳۴
Fan(double fan)	۲/۲۵۹۴
Modified Fan(Triple fan)	۱/۶۸۷
Fink(W)	۲/۶۳۳۵
Double Fink(WW)	۲/۷۶۲
Triple Fink(WWW)	۲/۰۷
Hip Grider	۳/۵۵۴
Step Down	۲/۹۷۱۵

جدول ۳- بیشترین میزان جابجایی در ساختار خرپاها نسبت به تکیه گاه

نوع خرپا	میزان جابجایی به روش عناصر محدود (mm.)
King post	۳/۴۷۷
Howe	۰/۷۰۱۷۷
Double Howe	۰/۸۳۶۴۵
Triple Howe	۰/۶۹۶۱۳
Fan	۱/۵۳۴۲
Modified fan	۱/۶۰۲۱
Fink	۱/۴۴۰۴
Double fink	۱/۵۵۲
Triple fink	۰/۷۲۶۷۱
Hip girder	۱/۸۴۰۴
Step Down	۱/۰۴۲۶

جدول ۵- جابجایی و تنش با اعمال نیروی ۳/۵ کیلو نیوتن

نام خرپا	جابجایی (Mm)	تنش (MPa)
King Post	۶/۵۵۴۹	۲۲/۲۸
Howe(K)	۰/۶۹۵۰۹	۱۳/۳۵۲
Double Howe(KK)	۰/۹۷۸۰۱	۱۵/۲۳۸
Triple Howe(KKK)	۰/۶۷۹۱۷	۱۱/۸۵۱
Fan	۱/۳۲۰۴	۱۰/۲۴۲
Modified Fan	۱/۸۴۶۶	۱۸/۳۴۵
Fink(W)	۱/۰۶۳۵	۱۲/۵۹۷
double fink(WW)	۱/۰۹۲۶	۸/۶۸۱۷
Triple Fink(WWW)	۱/۶۸۲۶۳	۱۳/۷۸۶
Hip Girder	۱/۰۰۹۸	۱۱/۸۵۳
Step Down	۰/۶۸۲۲۶	۱۲/۶۰۵

جدول ۶- جابجایی و تنش با اعمال نیروهای به دست آمده از آزمون مکانیکی

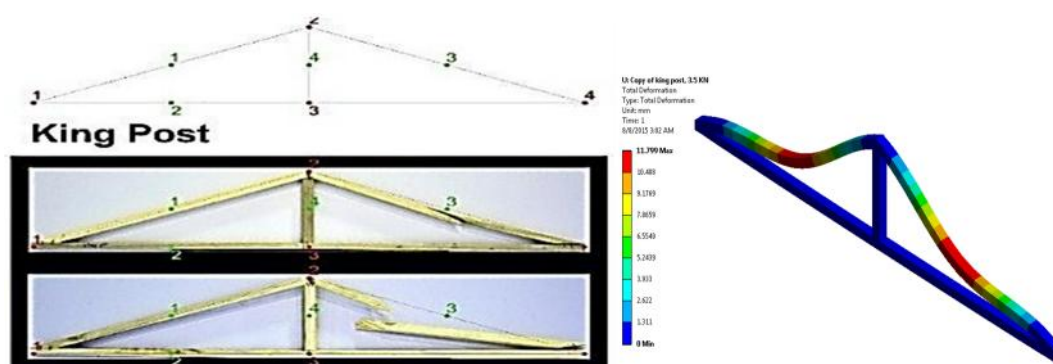
نام خرپا	جابجایی (Mm)	تنش (MPa)
King Post	۱/۹۳۱۶	۶/۵۶۵۷
Howe(K)	۰/۳۸۹۸۷	۵/۹۹۱۱
Double Howe(KK)	۰/۴۶۴۷	۷/۲۴۰۱
Triple Howe(KKK)	۰/۳۸۶۷۴	۶/۷۴۸۱
Fan	۰/۸۵۲۳۶	۷
Modified Fan	۰/۸۹۰۰۵	۸/۸۴۲۱
Fink(W)	۰/۸۰۰۲۲	۹/۴۷۸۱
double fink(WW)	۰/۸۶۲۲۲	۶/۸۵۱۱
Triple Fink(WWW)	۰/۴۰۳۷۳	۸/۲۰۶۸
Hip Girder	۱/۰۲۲۵	۱۲/۰۰۲
Step Down	۰/۵۷۹۲۴	۱۰/۷۰۱

جدول ۷- نتایج آماری

سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	ساختار خرپا
۰/۰۰۲	۶/۴۲۵	۱/۰۵۶	۱۰	۱۰/۵۶۴	ساختار خرپا

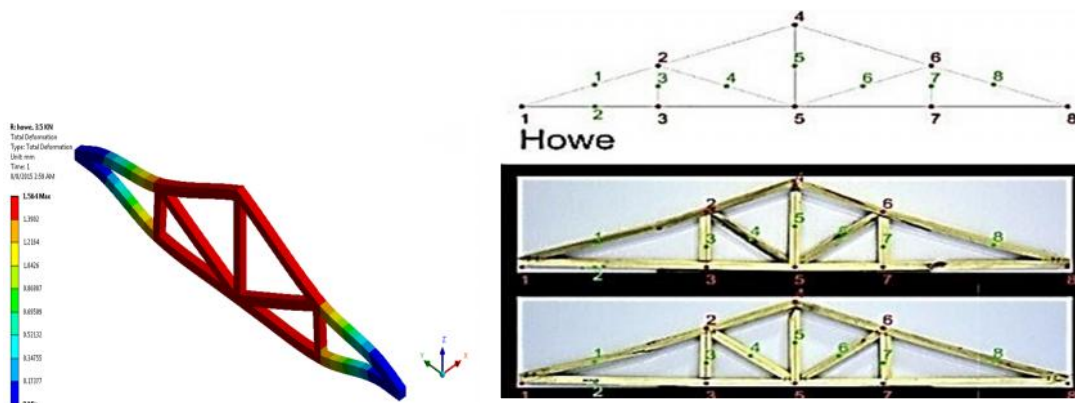
می دهد. نوار رنگی کنار شکل ها توزیع تنش و جابجایی را نشان می دهد. در شکل ۵ مشاهده می شود که بیشترین جابجایی در تحلیل عناصر محدود مربوط به نقطه ۳ بوده که شکست نیز در این نقطه حادث شده است.

جدول (۷) نشان می دهد تأثیر شکل ساختار خرپا بر مقاومت و توزیع تنش معنی دار است. در شکل های ۲ تا ۱۱ توزیع تنش و میزان جابجایی در ساختار خرپاهای قابل مشاهده می باشد. حداکثر تنش و کرنش مربوط به نقاط قرمز رنگ (تیره تر) می باشد و شکست در این نواحی رخ

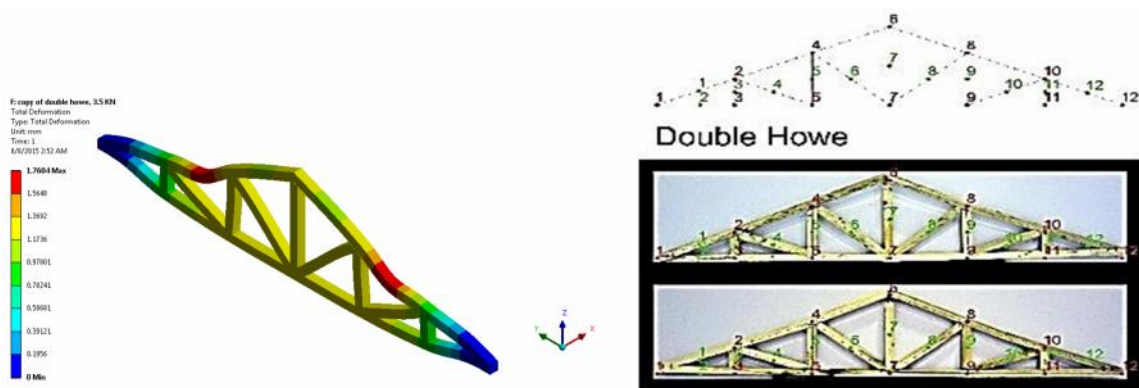


شکل ۵- تغییر شکل ساختار King Post





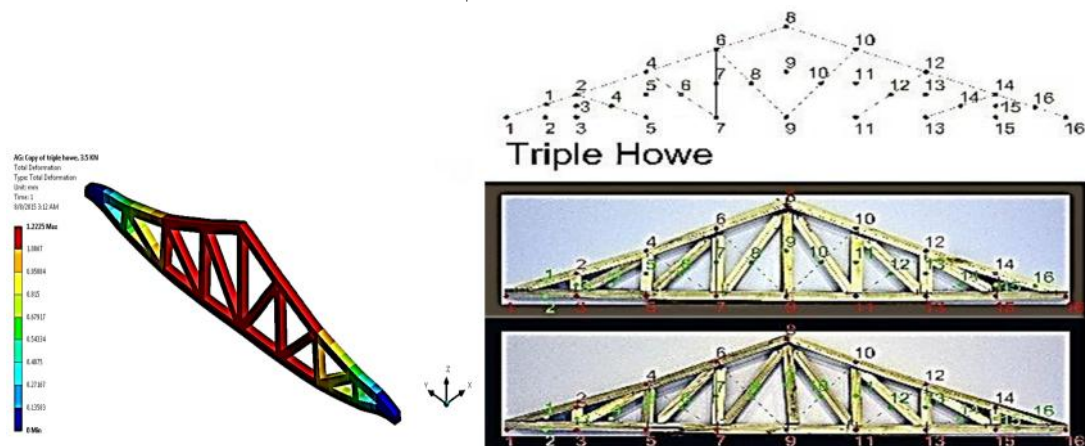
شکل ۶- تغییر شکل ساختار Howe



شکل ۷- ساختار Double Howe

در شکل ۷ توزیع تنش و کرنش حداکثر بر روی عضو ۲-۴ و عضو ۸-۱۰ می‌باشد و گره‌های ۴ و ۸ نقاط بحرانی سازه در هنگام تحمل بار می‌باشند.

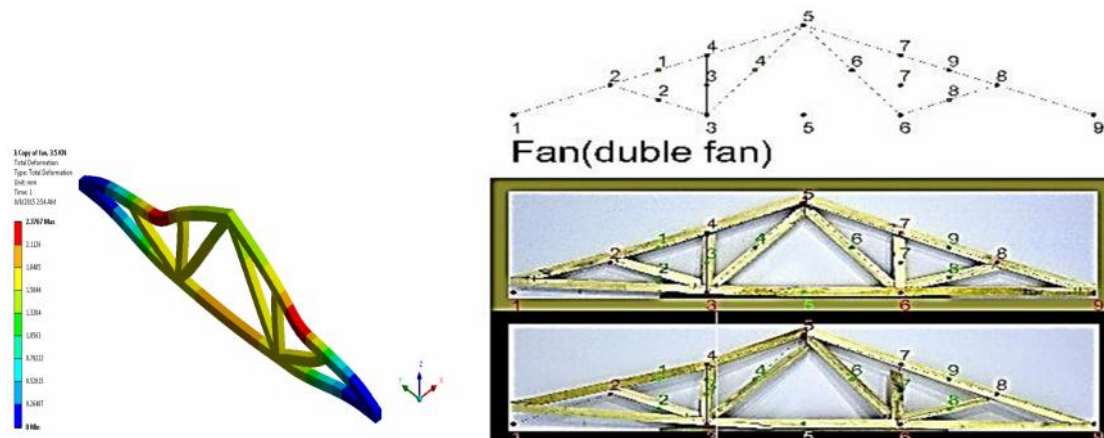
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی در تحلیل عناصر محدود مربوط به نقطه ۵ و دو مثلث میانی بوده که شکست نیز در این نقطه حادث شده است.



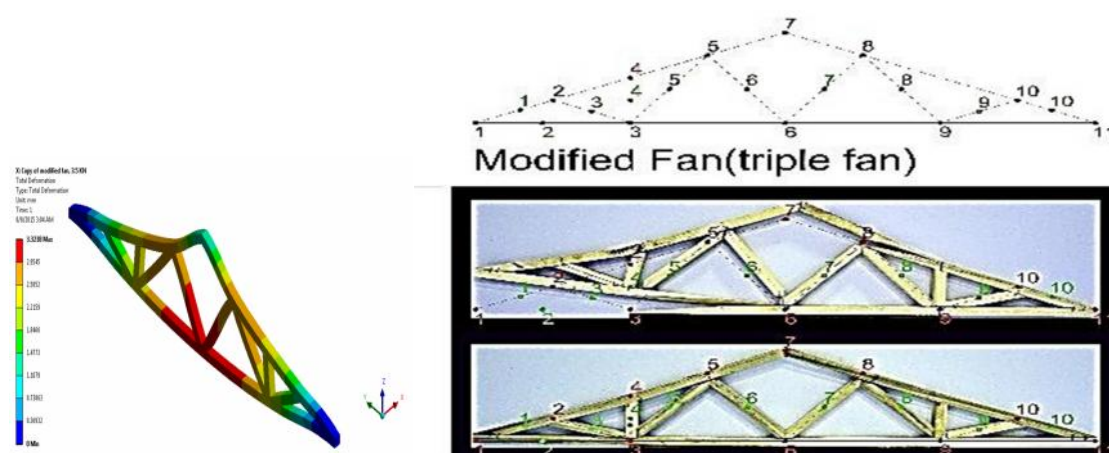
شکل ۸- تغییر شکل ساختار Triple Howe

در شکل ۱۰ مشاهده می شود که بیشترین جابجایی در تحلیل عناصر محدود مربوط به عضو ۳-۶ بوده که شکست نیز در این نقطه حادث شده است.

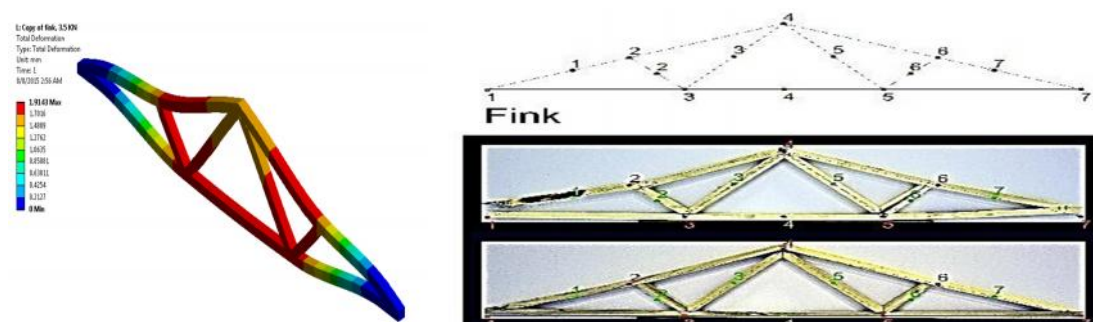
در شکل ۸ مشاهده می شود که بیشترین جابجایی در تحلیل عناصر محدود مربوط به نقطه ۸ بوده که شکست نیز در این نقطه حادث شده است.



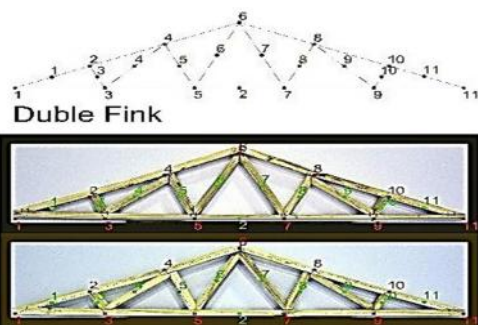
شکل ۹- تغییر شکل ساختار Fan



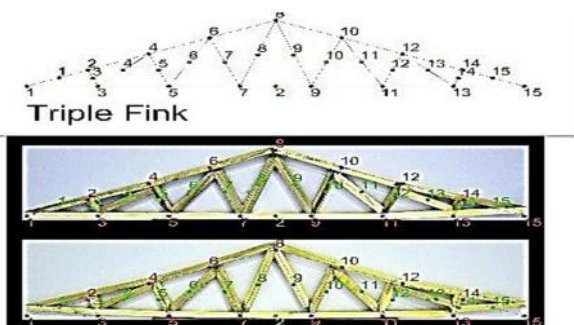
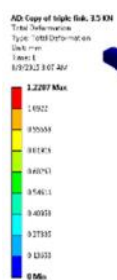
شکل ۱۰- تغییر شکل ساختار Modified Fan



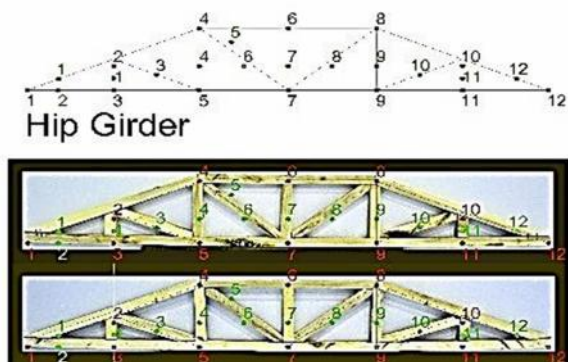
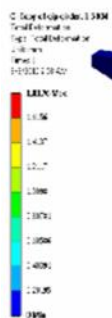
شکل ۱۱- تغییر شکل ساختار Fink



شکل ۱۲- شکل ساختار خرابای Double Fink



شکل ۱۳- تغییر شکل ساختار خرابای Triple Fink



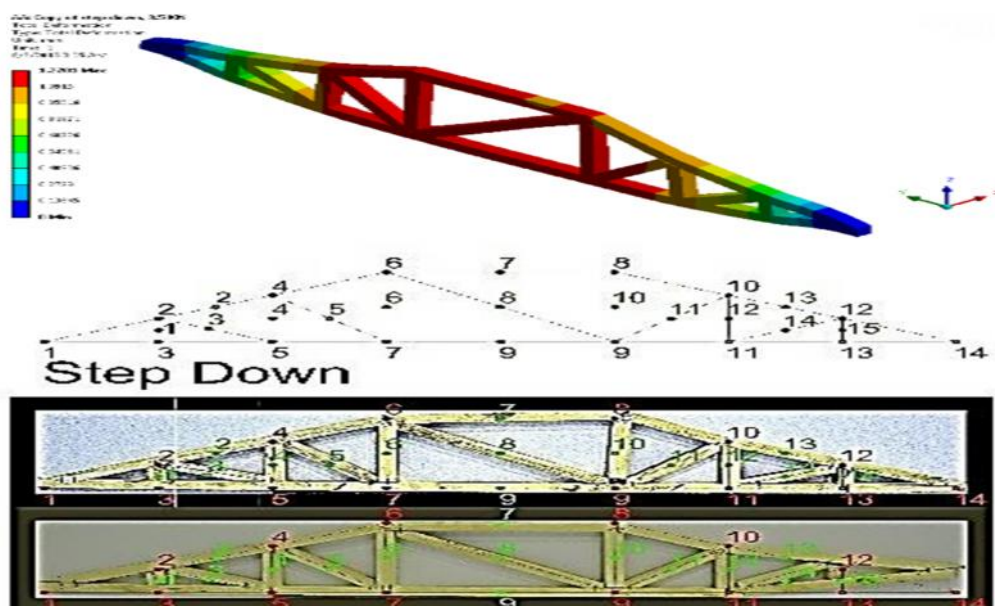
شکل ۱۴- تغییر شکل ساختار خرابای Hip Girder

تحلیل عناصر محدود مربوط به عضو ۷-۹ بوده که شکست نیز در این نقطه حادث شده است و نشان‌دهنده این موضوع است که شکست در محل حداکثر تنش اتفاق می‌افتد.

در شکل (۱۳) توزیع تنش و کرنش حداکثر بر روی عضو ۲-۴ و عضو ۸-۱۰ می‌باشد و گره‌های ۴ و ۸ نقاط بحرانی سازه در هنگام تحمل بار می‌باشند.

در شکل ۱۵ و ۱۴ مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی در





شکل ۱۵- تغییر شکل ساختار خرپای Step Down

## بحث

عضوها و همچنین کاهش تنش و افزایش مقاومت سازه را به همراه دارد (Gupta et al., 2004).

دلیل تغییر شکل بیشتر و مقاومت کمتر خرپای Modified Fan نسبت به Fan را می‌توان به عدم رعایت پایدارترین ساختار هندسی یعنی مثلث در خرپای Modified Fan نسبت داد.

با توجه به شواهد به دست آمده بین دو خرپای Step Down و Hip Girder، مقاومت Hip Girder بیشتر و میزان جابجایی و تغییر شکل آن کمتر بوده که دلیل این امر را می‌توان تمرکز نیرو در قسمت میانی خرپا در نتیجه جابجایی کمتر در عضوهای شیب‌دار خرپا بیان کرد (Kent et al., 1999).

شواهد نشان می‌دهد که خرپای Double Fink مقاومت بالاتری نسبت به خرپای Fink و خرپای Fink مقاومت و سفتی بیشتری نسبت به خرپای Triple Fink از خود نشان می‌دهد که دلیل این موضوع را می‌توان به تعداد بیشتر عضوهای قائم‌الزاویه در ساخت این خرپاها نسبت داد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد عضوهای عمودی در سازه

شکست در خرپای King Post، Double Howe، Fink و Double Fink در عضوهای آنها رخ می‌دهد که علت آن نیروی کششی و فشاری بیشتر از نیروی مجاز طراحی (f و u حداکثر با توجه فرمول‌های محاسبات عددی و روش عناصر محدود) است، این عضوها و در سایر خرپاها در محل مفاصل (گره) به دلیل نیروی برشی و لهیدگی حداکثر در محل اتصالات میخ می‌باشد (Freilingor et al., 1997). نتایج روش عناصر محدود نشان می‌دهند که با تغییر نوع خرپا ماتریس ضرایب سفتی و میزان جابجایی در قسمت‌های مختلف خرپا با توجه به ماتریس سفتی هر نوع خرپا تغییر کرده که این میزان تغییر از صفر میلی‌متر در تکیه‌گاه‌ها تا بیشترین در جان بالای خرپای King Post قابل مشاهده است.

در سازه خرپا با افزایش عضوهای فاقد نیروی داخلی که به عنوان عضوهای تعادلی کاربرد دارند میزان جابجایی با توجه به ماتریس سفتی ایجادشده در این سازه کامل‌تر شده که این مورد خود کاهش نیروی کششی و فشاری در سایر

- Structural Engineering, 132(3), 409417.
- Freilingor 1997. Cyclic Performance of Wood Truss Joints. Proct: Structural Congress XV AM. Society of Civil Engineer, Restart, VA, 939943.
- Hektor, Full Size Truss Joints Made of Old Wood: Laboratory
- Kent 1997. Dynamic Behavior of Metal Plate Connected Wood Truss Joint. Journal of Structural Engineering, 123 (8): 1037-1043.
- Stehn 2004. The influence of nail ductility on the load capacity of a glulam truss structure. Engineering Structures, 26(6), 809-816.
- Tests on Shear Failures. ICOMOS IWC-XVI International Symposium-Florence, Venice.2047.<sup>۴</sup>
- Xu 2009. Numerical 3D Finite Element Modelling and Experimental Tests for Dowel Type Timber Joints. Construction and Building Materials, 23, 3043-3052

خریا و به دنبال آن افزایش مثلث های قائم الزاویه و نسبت ۴،۳ و ۵ مقاومت سازه خرپاها به ترتیب از King Post، Howe، Double Howe و Triple Howe افزایش می یابد که با توجه به نتایج تحلیل اجزای محدود، میزان جابجایی و تغییر شکل و توزیع تنش نیز روند معکوس را در خرپاهای مذکور نشان می دهد.

#### منابع مورد استفاده

- Arguelles 2003. Estructura de Madera. Diseno Calculo [Timber structures. Design and Calculus.]. Asociacion de Investigacion Tecnica de las Industrias de la Madera Corcho, Madrid (AITIM), Spain.
- Ellegaard 2006. Finite-element modeling of timber joints with punched, metal plate fasteners. Journal of

## Application of finite element method to determine the impact of truss structure on its stiffness

E. Ketabi<sup>1</sup> and A. Lashgari<sup>2\*</sup>

1-M.Sc., graduate student, Department of wood and paper Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Karaj branch of Islamic Azad University.

2\*-Corresponding author, Associate Professor, Department of wood and paper Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Karaj branch of Islamic Azad University. Email: amir.lashgari@kia.ac.ir

Received: Oct., 2016

Accepted: Jan., 2017

### Abstract

In this study, the effect of truss structure on the stiffness and stress distribution in the truss members was investigated. Finite element method (FEM) and two ANSYS and Autodesk software were used to show of stress distribution on the members. Samples with eleven different structures in four replications were made from poplar (*Populus nigra* L.) wood. Two dowel joints and friction joints were used in the truss fabrication. To calculate of the resistance of the trusses, first the trusses were loaded at the rate of 12.5 mm min<sup>-1</sup> by mechanical testing machine. The results showed that the Hip Girder truss have highest resistance and lowest stress distribution compared with other trusses. The effect of truss structure on the resistance and stress distribution was statistically significant in 95% confidence level. The results showed that the maximum stress concentration appeared identically with experimental failure mode.

**Keywords:** Truss, mechanical test, dowel joint, wood, friction joint, finite element method.