

## خصوصیات برشی، خمشی و فشاری ساقه نیشکر در قسمت های مختلف ساقه

رضا طباطبایی کلور<sup>۱\*</sup>، رمضان هادی پور<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۹ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۷/۰۹	ساقه نیشکر به هنگام برداشت و پس از آن در معرض بارهای مکانیکی مختلف قرار دارد. طراحی و بهینه سازی دستگاه های برداشت و فرآوری نیشکر نیاز به مطالعه خصوصیات مکانیکی و فیزیکی محصول و ارتباط آنها با ماشین دارد. در این تحقیق، خصوصیات برشی، فشاری و خمشی ساقه در سه قسمت از ساقه (پایین، وسط و بالا) و در دو نقطه (روی گره و بین گره ها) در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که تیمارهای آزمایشی در قسمت های مختلف ساقه اختلاف معنی دار دارند. مقاومت برشی و نیز مدول الاستیسیته و تنش حاصل از بارگذاری خمشی در قسمت های پایین تر ساقه و نقاط روی گره بیشتر از نقاط دیگر می باشند. انرژی برشی مخصوص در قسمت های بالایی ساقه و روی گره بیشتر بود؛ در حالی که انرژی حاصل از بارگذاری فشاری و خمشی در این نقاط کمتر بود. مقاومت برشی ساقه، مدول الاستیسیته فشاری، تنش خمشی و مدول خمشی در قسمت پایین ساقه و روی گره به ترتیب مگاپاسکال ۲/۴۷، ۲۱۵/۳، ۹۳/۴ و ۷۲۱/۳ و در قسمت بالای ساقه و بین گره ها به ترتیب مگاپاسکال ۱/۵۳، ۸۴/۵، ۷۹/۲ و ۶۳۶/۷ به دست آمد. همچنین، انرژی برشی مخصوص، انرژی فشاری و خمشی در قسمت پایین ساقه و روی گره به ترتیب $\text{mJ.mm}^{-2}$ ۴۱/۸، ۱۱۱/۳ و ۱۱۰/۲ و در قسمت بالای ساقه و بین گره ها به ترتیب $\text{mJ.mm}^{-2}$ ۵۶/۱، ۴۴/۱ و ۷۲/۴ به دست آمد. به طور کلی می توان گفت که قسمت های پایین ساقه دارای ساختار سلولی و فیبری محکم بوده و در نتیجه بافت خمشی و سفت تری دارند و در قسمت گره نیز سلول ها به صورت رشته های مارپیچی و درهم تنیده هستند. بنابراین، خصوصیات مکانیکی ساقه نیشکر در قسمت های مختلف تحت تاثیر ساختار سلولی ساقه قرار می گیرد.
کلمات کلیدی: نیشکر، برش، خمش، فشار	
* عهده دار مکاتبات Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir	

### مقدمه

نیشکر یکی از محصولات مهم در تولید فرآورده های قندی می باشد که تولید سالانه آن در کشور حدود ۶۸۰۰ هزار تن از ۸۸ هزار هکتار سطح زیر کشت می باشد (۱). در فصل برداشت، ارتفاع ساقه نیشکر به حدود ۲۸۰ سانتیمتر و قطر آن به ۲ الی ۳ سانتیمتر می رسد. ساقه نیشکر بطور واضح به دو قسمت گره و میان گره متمایز است. ساقه توپر و غیر منشعب این گیاه تقریباً استوانه ای با مقطع دایره ای شکل است و بندهای مشخصی دارد که در آنها قند ذخیره می گردد (۸). ساقه نیشکر در مراحل برداشت و پس از برداشت تحت تاثیر تنش های مکانیکی مختلف از جمله نیروی برشی، فشاری و خمشی قرار می گیرد. این تنش ها نیز ممکن است در نواحی مختلف ساقه متفاوت باشد و تحت تاثیر برخی خصوصیات فیزیکی از جمله نوع رقم، چگالی، رطوبت، قطر ساقه و ساختار سلولی مواد گیاهی قرار گیرند (۱۲).

برداشت نیشکر معمولاً با داس دستی و یا با ماشین انجام می شود و از آنجا که ساقه در نزدیکی سطح زمین برداشت می شود و در این ناحیه نسبتاً قطور، خشبی و محکم می باشد، بنابراین با بررسی خصوصیات برشی می توان به طراحی مناسب و بهینه سازی ماشین های برداشت کمک کرد. بعلاوه، در مراحل پس از برداشت و فرآوری، سیستم های فشرده سازی جهت استحصال شیر، ساقه ها را در معرض بارهای فشاری و خمشی قرار می دهند. از این رو، داشتن اطلاعات کافی در مورد رابطه گیاه و ماشین اهمیت زیادی دارد (۱۹ و ۲۰).

اینچه<sup>۱</sup> و همکاران (۴) تنش خمشی، مدول الاستیسیته، و تنش برشی ساقه آفتابگردان را در نواحی مختلف ساقه اندازه گیری کردند. تنش خمشی بین ۳۷/۷ تا ۶۲/۱ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته بین ۱۲۵۱ تا ۲۲۱۱ مگاپاسکال به دست آمد. مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص ساقه آفتابگردان به ترتیب ۱/۰۷ MPa و ۱ mJ mm<sup>-2</sup> به دست آمد که در نواحی پایین ساقه

نسبت به نواحی بالا بیشتر می باشند. در تحقیقی دیگر شهبازی و همکاران (۱۵) تنش خمشی و مدول الاستیسیته را برای ساقه آفتابگردان به ترتیب ۲۵/۹ تا ۴۷/۷۱ مگاپاسکال و ۱/۲۸ تا ۲/۵۴ گیگاپاسکال به دست آوردند. نظری گله دار و همکاران (۱۱) مقاومت کششی، تنش برشی و انرژی برشی ساقه یونجه را در سه ارتفاع مختلف ساقه اندازه گیری کردند. مقاومت کششی در رطوبت های مختلف در محدوده ۹/۲۴ تا ۲۶/۳۵، ۱۶/۳۱ تا ۳۲/۷۴ و ۲۸/۸ تا ۴۳/۸ مگاپاسکال به ترتیب برای نواحی بالا، وسط و پایین ساقه به دست آمد. بیشترین مقدار تنش برشی و انرژی برشی نیز به ترتیب ۲۸/۱۶ مگاپاسکال و ۳۴۵/۸ میلی ژول به دست آمد.

کرونبرگر<sup>۲</sup> (۹) مقاومت کششی، برشی، مدول الاستیسیته و مدول برشی ساقه گندم را به منظور یافتن روشی برای کاهش مصرف انرژی در فرآوری ساقه گندم اندازه گیری کرد. چن<sup>۳</sup> و همکاران (۳) حداکثر نیرو و انرژی برشی کل برای ساقه کف را به ترتیب ۲۴۳ نیوتن و ۲/۱ ژول به دست آوردند. همچنین، آنها دریافتند که انرژی مخصوص برای برش ساقه کف حدود ۱۰ الی ۶۰٪ بیشتر از ساقه یونجه می باشد. سامرز<sup>۴</sup> و همکاران (۱۷) خواص برشی کلش برنج را در نزدیکی گره های ساقه بررسی کردند. آنها دریافتند که محل برش و تعداد ساقه ها بر روی فرایند برش تاثیرگذار است. حسین زاده و همکاران (۶) اثر رقم گندم، رطوبت ساقه، زاویه لبه تیغه و سرعت برشی را بر انرژی برشی کلش گندم توسط یک آونگ پاندولی بررسی کردند. نتایج یافته های آنها نشان داد که اثرات رقم، زاویه لبه تیغه، رطوبت و سرعت برشی بر انرژی برشی معنی دار بود. اسحاق بیگی و همکاران (۵) گزارش کردند که تنش برشی ساقه های گندم با کاهش رطوبت کاهش پیدا کرد و نیروی برش ساقه ها با افزایش ارتفاع برش افزایش یافت. چاتوپادیای و پندی<sup>۵</sup> (۲)

2- Kronbergs

3- Chen *et al.*4- Summers *et al.*

5- Chattopadhyay and Pandey

1- Inche *et al.*

تعیین خصوصیات مکانیکی دشوار می باشد (۱۳). با توجه به این که در برداشت و پس از برداشت نیشکر، ساقه ها در معرض نیروهای مکانیکی برش، فشار و خردشدن هستند، لذا عملکرد اجزای درگیر با ساقه بستگی به خصوصیات برشی، فشاری و خمشی ساقه دارد. بعلاوه، با توجه به تغییر ساختار سلولی ساقه در نواحی نزدیک به زمین، بین گره ها و روی گره ها، داشتن اطلاعات در مورد خواص مکانیکی ساقه نیشکر در نواحی مختلف روی ساقه در بهینه سازی فرایندهای مرتبط با برداشت و تبدیل نیشکر ضروری است؛ بنابراین، اهداف این تحقیق عبارت بودند از تعیین الف) مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص، ب) مدول الاستیسیته و انرژی حاصل از بارگذاری فشاری و ج) تنش، مدول الاستیسیته و انرژی حاصل از بارگذاری خمشی در قسمت های مختلف ساقه.

## مواد و روش ها

### مواد

نمونه های ساقه نیشکر رقم CP48 از مزارع نیشکر شهرستان بهنمیر مازندران و توسط داس دستی از ارتفاع ۱۰ سانتیمتری نسبت به سطح زمین تهیه شد. با توجه به ارتفاع زیاد ساقه ها و تغییر ساختار سلولی آنها در ارتفاع-های مختلف، سه ناحیه ساقه به طول ۵۰ سانتیمتر در قسمت های پایین، وسط و بالا انتخاب شد. محدوده قطر متوسط نمونه های ساقه در این سه قسمت به ترتیب ۲۱ تا ۲۵، ۱۸ تا ۲۰ و ۱۵ تا ۱۷ میلیمتر به دست آمد. نمونه ها درون کیسه های پلاستیکی بلافاصله جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه منتقل شد. رطوبت نمونه ها بر مبنای وزن تر با استفاده از روش خشک کردن در آون در دمای  $102^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد (۴).

### خواص فیزیکی ساقه نیشکر

ساقه های نیشکر هنگام آزمایش دارای رطوبت میانگین ۷۰٪ بر مبنای وزن تر بودند. تغییرات قطر جرم واحد

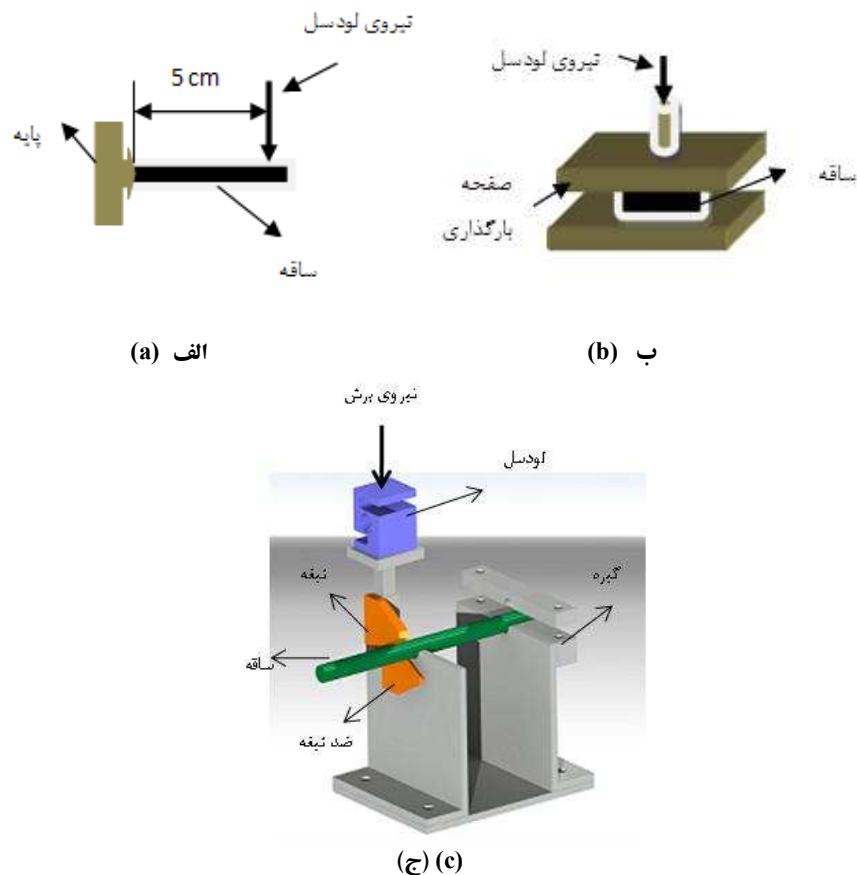
خصوصیات برشی، خمشی و فشاری ساقه سورگم را تحت بارگذاری شبه استاتیکی بررسی کردند. با افزایش زاویه لبه تیغه از ۳۰ به ۷۰ درجه، مقاومت برشی ساقه از ۳/۷۴ به ۸/۱۸ مگاپاسکال و انرژی برشی مخصوص از ۳۴/۱ به ۱۰/۱ مگاژول بر میلیمتر مربع افزایش پیدا کرد. بعلاوه، افزایش زاویه لبه تیغه موجب افزایش مقاومت فشاری ساقه گردید؛ اما بر روی مقاومت خمشی تاثیر معنی داری نداشت.

ایگاسیناسان<sup>۱</sup> و همکاران (۷) تاثیر زاویه قرارگیری ساقه ذرت را بر نیرو و انرژی برش در فواصل بین گره ها بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد در صورتی که ساقه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به تیغه قرار گیرد نیرو و انرژی برش حدود ۵۰ درصد کمتر است. رحمان خان<sup>۲</sup> و همکاران (۱۴) رفتار ساقه کنف تحت بارگذاری فشاری در دو جهت محوری و عرضی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییرات ماکزیمم نیروی فشاری از ۵۸ الی ۱۴۲۵ نیوتن و انرژی مورد نیاز از ۲۳ الی ۱۸۰۹ میلی ژول با توجه به نوع رقم، ارتفاع ساقه، قطر ساقه و جهت بارگذاری تغییر پیدا کرد. تقی نژاد و همکاران (۱۸) تاثیر رطوبت و ابعاد ساقه بر خصوصیات برشی ساقه نیشکر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت نیرو و انرژی برشی کاهش و با افزایش ابعاد ساقه نیرو و انرژی برشی افزایش پیدا کرد. جعفری و همکاران (۸) اثر سرعت و نوع تیغه را بر نیروی مورد نیاز برش ساقه دو رقم نیشکر بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نوع تیغه و سرعت برشی بر نیرو و مقاومت برشی ساقه نیشکر تاثیر معنی داری دارد اما تاثیر نوع رقم معنی دار نیست.

به علت تفاوت در ساختار سلولی ساقه نیشکر خواص مکانیکی متفاوتی می تواند بروز کند. یکی از مهم ترین عوامل موثر بر این تفاوت، جهت و محل قرارگیری اجزای درون ساقه است. از سویی دیگر، به دلیل وجود حفره های بین سلولی که بیشتر از سایر نواحی بافتی است

1- Igathinathan *et al.*  
2- Rahman khan *et al.*

طباطبایی کلور و هادی پور: خصوصیات برشی، خمشی و...

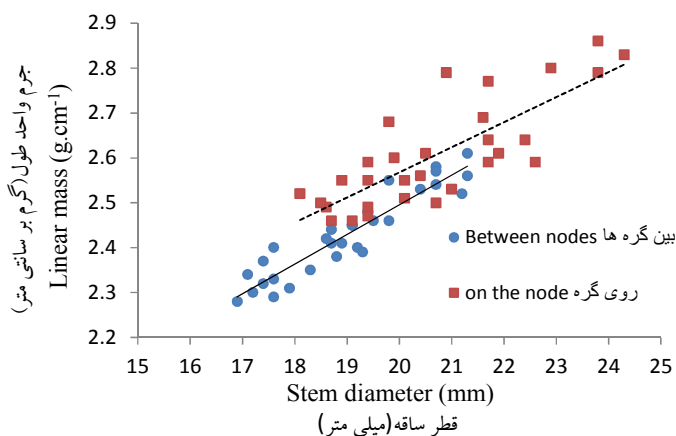


شکل (۱) مکانیزم‌های بارگذاری ساقه نیشکر؛ (الف) خمشی، (ب) فشاری و (ج) برشی  
Figure (1) Loading mechanisms of sugarcane stem: (a) bending, (b) compressing and (c) cutting

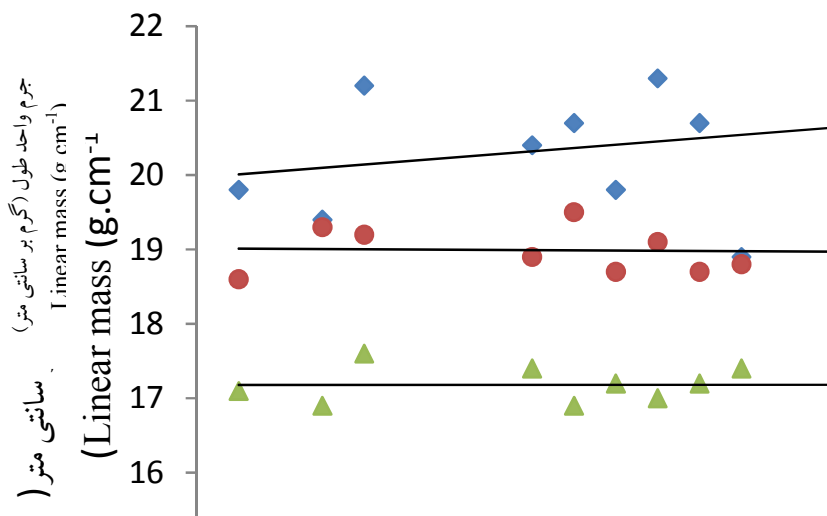
است؛ اما مقادیر جرم نمونه در قسمت‌های پایین ساقه بیشتر از نقاط وسط و بالا است. این تغییرات، مشابه با نتایج به دست آمده توسط توسط تقی نژاد و همکاران (۱۸) می باشد. بین جرم واحد طول و قطر ساقه یک رابطه خطی به دست آمد اما پراکندگی داده‌ها در روی گره‌ها بیشتر بود. رابطه گره‌ها و رابطه  $\rho = 13.8d - 13.03$  با  $R^2 = 0.97$  برای بین گره‌ها و رابطه  $\rho = 11.51D - 93.1$  با  $R^2 = 0.64$  برای روی گره‌ها به دست آمد. دلیل پایین بودن ضریب تبیین، ساختار سلولی پیچیده بافت گره‌ها است و در ضمن بر خلاف مواد مهندسی معمولاً در محصولات کشاورزی به دلیل ناهمگن بودن بافت سلولی ضریب تبیین پایین است.

طول نمونه‌های ساقه نیشکر در بین گره‌ها در محدوده ۱۶/۸ تا ۲۱/۳ میلیمتر و در روی گره در محدوده ۱۸/۵ تا ۲۴/۳ میلیمتر به دست آمد؛ همچنین، جرم واحد طول نمونه‌های ساقه نیشکر در بین گره‌ها ۲/۲۸ تا ۲/۶۱ گرم بر سانتیمتر و روی گره‌ها ۲/۴۶ تا ۲/۸۶ گرم بر سانتیمتر به دست آمد. با توجه به شکل ۲ با افزایش قطر ساقه، جرم نیز افزایش یافته است و جرم واحد طول در روی گره به طور قابل توجهی بیشتر از مقادیر بین گره‌ها می باشد. این امر به دلیل تمرکز بافت‌های سفت و به هم پیچیده الیاف بیرونی ساقه می باشد که آن را دارای ساختار متفاوتی نسبت به نقاط دیگر ساقه می کند.

در شکل ۳ مشاهده می شود که در قسمت‌هایی مختلف ساقه با افزایش قطر تغییرات جرم قابل توجه نیست که این امر به دلیل ساختار نسبتاً مشابه بافتی و سلولی ساقه در هر ناحیه



شکل (۲) تغییرات جرم واحد طول نسبت به قطر ساقه نیشکر در روی گره و بین گره ها در همه نمونه ها  
 Figure (2) Variations of unit length mass vs. sugarcane stem diameter on the node and between nodes in all samples



شکل (۳) تغییرات جرم واحد طول نسبت به قطر ساقه نیشکر در قسمت های مختلف روی ساقه در فواصل بین گره ها  
 Figure (3) Variations of unit linear mass vs. sugarcane stem diameter on different sections of stem between nodes

نیشکر استفاده شد (دستگاه یونیورسال مدل STM50، شرکت سنتام، ایران). این دستگاه می تواند بار شبه استاتیکی را در سرعت های از ۰/۱ الی ۵ میلیمتر بر ثانیه اعمال کند. برای ساقه محصولات کشاورزی سرعت بارگذاری شبه استاتیکی در محدوده ۰/۵ الی ۵ میلیمتر بر ثانیه توصیه می شود (۲). نیروی وارده توسط لودسل و

### تعیین خواص مکانیکی ساقه

خواص مکانیکی ساقه معمولا بر اساس نیروهای برشی، فشاری و خمشی وارد بر ساقه تعیین می شوند. برای اعمال بارهای برشی، فشاری و خمشی به ساقه از یک دستگاه تست کشش- فشار مجهز به لودسل ۵ KN و گیره های مخصوص برای اعمال بار و نگهداشتن ساقه

به طول پنج سانتیمتر تهیه شد و در راستای قطر بین دو صفحه بارگذاری گردید. پس از اعمال فشار، ساقه بین دو لبه له شده و منحنی نیرو - جابجایی ثبت شد. شاخص هایی که رفتار گیاه در مقابل نیروی فشاری را تعیین می- کنند، عبارتند از مدول الاستیسیته در فشار و انرژی فشردگی. مطابق قانون هوک بخش خطی نمودار نیرو- جابجایی برای تعیین مدول الاستیسیته به کار می رود (۲).

$$\frac{F_c}{A} = E \frac{\Delta d}{d} \rightarrow E = \frac{F_c d}{A \Delta d} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)،  $E$  مدول الاستیسیته در فشار،  $F_c$  نیروی فشاری،  $\Delta d$  تغییر شکل در راستای قطر و  $d$  قطر ساقه در نقطه فشاری می باشد.

برای به دست آوردن انرژی فشاری از رابطه مشابه با فرمول ۲ استفاده شد.

#### تنش و انرژی حاصل از بارگذاری خمشی

برای تعیین ویژگی های خمشی ساقه نیز از روش تیر یک سر گیردار استفاده شد (شکل ۱-الف). ساقه به طول ۱۰۰ میلیمتر از یک انتها توسط گیره مخصوص نگه داشته شد و انتهای آزاد آن در فاصله ۸۰ میلیمتری از تکیه گاه توسط یک مکانیزم به صورت نقطه ای بارگذاری گردید. رفتار مواد گیاهی در برابر خمش توسط شاخص های تنش خمشی، مدول الاستیسیته در خمش و انرژی خمشی تعیین می شود. تنش خمشی در یک تیر یک سر گیردار از رابطه زیر به دست آمد (۴).

$$\sigma_b = \frac{M\rho}{I} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)،  $M$  حداکثر گشتاور خمشی،  $\rho$  فاصله تار خنثی تا سطح بیرونی ساقه و  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع ساقه می باشد.

مدول الاستیسیته در خمش برای تیر یک سر گیردار از رابطه زیر به دست آمد.

$$E_b = \frac{F_b L^3}{3\delta I} \quad (5)$$

که در رابطه (۵)،  $E_b$  مدول الاستیسیته در خمش و  $\delta$  مقدار خیز ساقه در نقطه اعمال نیرو و  $L$  طول نمونه می باشد.

ثبات داده و میزان جابجایی فک متحرک نیز به وسیله یک حسگر جابجایی LVDT با دقت یک صدم قابل ثبت می باشد.

#### مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص

برای برش ساقه از دو تیغه ثابت و متحرک استفاده شد و فاصله آزاد بین این دو تیغه به مقدار ۰/۵ میلیمتر تنظیم گردید. زاویه لبه تیغه ۳۰ درجه و شعاع انحنای آن ۰/۱ میلیمتر بود که مشابه با شرایط فیزیکی تیغه های موجود برای برداشت نیشکر می باشد. نمونه ساقه مورد نظر به طول ۱۰ سانتیمتر توسط یک گیره مخصوص به فک ثابت محکم شده و نیروی برش با سرعت  $1 \text{ mm.s}^{-1}$  اعمال شد. قطر نمونه در محل برش نیز ثبت شد (شکل ۱-ج).

شاخص هایی که رفتار برشی مواد گیاهی را تعیین می کنند عبارتند از: حداکثر مقاومت برشی،  $T_s$  و انرژی برشی مخصوص،  $E_s$ . حداکثر مقاومت برشی ساقه که از رابطه زیر به دست آمد (۱۰).

$$T_s = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $T_s$  حداکثر مقاومت برشی،  $F_{max}$  حداکثر نیروی برش و  $A$  سطح مقطع ساقه در صفحه برش می باشد.

انرژی برشی مخصوص ساقه با تعیین مساحت زیر منحنی نیروی برش- جابجایی و توسط رابطه زیر تعیین گردید (۲).

$$E_s = \frac{1}{A} \int F dx = n \times \frac{f}{A} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)،  $E_s$  انرژی برشی مخصوص،  $F$  نیروی برش،  $X$  جابجایی تیغه،  $n$  تعداد واحدهای تقسیم شده سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی و  $f$  فاکتور مقیاس واحد سطح زیر منحنی می باشند.

#### مدول الاستیسیته و انرژی فشاری

برای وارد کردن فشار به ساقه از یک صفحه تخت متحرک متصل به لودسل و صفحه زیرین ثابت در راستای قطر ساقه استفاده گردید (شکل ۱-ب). نمونه های ساقه

سلول‌های نرم و خلل و فرج تقسیم کرد که در این میان الیاف فیبری نقش مهمی در مقاومت برشی دارند. چون سفتی گیاه با سلول‌های فیبری فراهم می‌شود و ساقه در قسمتهای پایین تر دارای الیاف لیفی ضخیم تر و در نقاط روی گره دارای الیاف درهم تنیده است، لذا در این قسمت ها مقاومت برشی بیشتری به دست آمد. اینچه و همکاران (۴) نتایج مشابهی برای نواحی پایین، وسط و بالای ساقه آفتابگردان به دست آوردند و دلیل این امر را فیبرهای محکم تر و کلفت تر ساقه در نواحی پایین تر ساقه گزارش نمودند.

انرژی برشی مخصوص که از سطح زیر منحنی نیرو-جابه‌جایی ساقه به دست آمد در قسمت های مختلف ساقه دارای تفاوت معنی داری بود. در نواحی بالاتر ساقه انرژی مخصوص برش افزایش پیدا کرد. برش مواد گیاهی یک فرایند پیچیده و چند مرحله ای است که تابعی از تغییر شکل در بافت های سلولی در لحظه برخورد اولیه تیغه به ساقه و متعاقب آن شکست در بافت های سلولی و در نتیجه گسیختگی است. از آنجا که قسمت های بالایی ساقه برخلاف قسمت های پایین، دارای الیاف انعطاف پذیرتری هستند در لحظه برخورد تیغه به جای برش ساقه موجب فشرده شدن آن می‌شود، در نتیجه شکافت فیبرهای سطح ساقه به سرعت انجام نمی‌شود و مقاومت لحظه ای زیادی ایجاد می‌کند. از سویی دیگر به دلیل داشتن سطح مقطع کمتر انرژی برشی مخصوص افزایش پیدا می‌کند. تقی نژاد و همکاران (۱۸) نشان دادند که با افزایش قطر های میانگین ساقه نیشکر انرژی برشی مخصوص کاهش پیدا کرد. در هر صورت، انرژی برشی مخصوص دارای تفاوت معنی داری بین گره و روی گره می‌باشد. سریواستوا و همکاران<sup>۱</sup> (۱۶) دریافتند که نقاط روی گره در ساقه ها به دلیل ساختار درهم تنیده سلولی و تراکم بالای سلولی دارای رفتار مکانیکی متفاوتی نسبت به نقاط بین گرهی دارند. بنابراین، هنگام طراحی سیستم‌های برشی مورد استفاده در برداشت ساقه های نیشکر باید حداکثر مقاومت برشی و در طراحی سیستم‌های تامین توان بیشترین انرژی مورد نیاز سیستم را در نظر گرفت.

در این حالت نیروی لازم برای اعمال بار تا رسیدن انتهای تیر به خیز ۲۰ میلیمتر ثبت شد.

انرژی خمش از سطح زیر منحنی نمودار نیروی خمش-جابه‌جایی و توسط رابطه ای مشابه رابطه ۲ به دست آمد. از منحنی نیرو-جابه‌جایی برای محاسبه تنش خمشی، مدول الاستیسیته و انرژی خمشی استفاده شد.

### طرح آزمایشی و تحلیل داده ها

در این مطالعه خصوصیات مکانیکی ساقه نیشکر شامل مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص، مدول الاستیسیته و انرژی حاصل از بارگذاری فشاری و تنش و انرژی حاصل از بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر عوامل مربوط به ساقه از جمله محل برش (روی گره و بین گره) و ارتفاع روی ساقه (پایین، وسط و بالا) بر این خصوصیات در قالب آزمایش فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. داده ها با استفاده از از نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند.

### نتایج و بحث

#### مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص

نتایج مربوط به تاثیر محل و ارتفاع برش روی ساقه بر مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص به‌عنوان شاخص-های خصوصیات برشی ساقه نیشکر در جدول ۱ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقاومت برشی در قسمت های مختلف ساقه و در روی گره تفاوت معنی‌داری دارند و بیشترین مقاومت در قسمت پایین ساقه و روی گره به مقدار ۲/۴۷ مگاپاسکال به دست آمد. این تغییرات در مقاومت برشی می‌تواند به دلیل ساختار سلولی متفاوت گیاه در قسمت های مختلف ساقه باشد. هر چه ساقه کلفت تر باشد، الیاف فیبری آن ضخیم تر شده و در نتیجه نیروی لازم برای برش ساقه نیز بیشتر می‌شود. پراسان (۱۲) تاثیرپذیری خصوصیات مکانیکی گیاهان علوفه ای از ساختار سلولی گیاه و تغییر این خصوصیات در طول ساقه گیاه را نشان دادند. بعلاوه، ایشان ساختار ساقه را از لحاظ مقاومت در مقابل برش در یک مقطع عرضی به چهار بخش الیاف فیبری، پوست،

جدول (۱) نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر ارتفاع روی ساقه و محل برش بر مقاومت برشی و انرژی برشی مخصوص ساقه نیشکر

**Table (1) Analysis of variance results related to the effect of stem height and cutting place on the shear strength and specific shear energy**

انرژی برشی مخصوص (Specific shear energy) (mJ.mm <sup>-2</sup> )	مقاومت برشی (Shear strength) (Mpa)	محل برش (Cutting place)	ارتفاع روی ساقه (Height on the stem)
41.8e	2.47 a	روی گره (On the node)	پائین (Bottom)
47.5d	1.98 bc	بین گره ها (Between nodes)	
44.1c	2.04b	روی گره (On the node)	وسط (Middle)
51.2b	1.86cd	بین گره ها (Between nodes)	
49.4b	1.91c	روی گره (On the node)	بالا (Up)
56.1a	1.53e	بین گره ها (Between nodes)	

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد

In each column, the same letter shows no significant difference at probability level of 5%

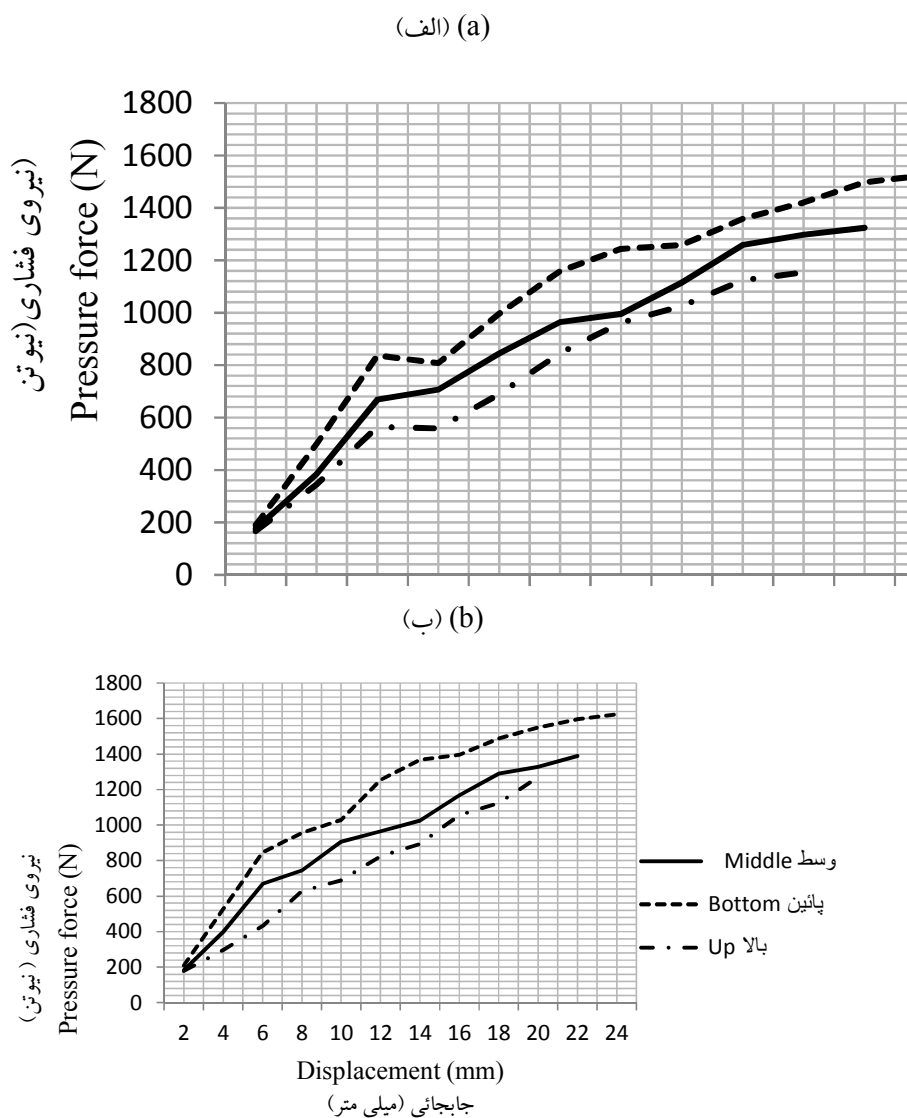
به صورت پیچیده درهم تنیده شده اند و بافتی با ساختار محکم به وجود آورده اند.

با توجه به نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ مدول فشاری و انرژی فشاری در نواحی بالاتر روی ساقه و نیز گره و بین گره کاهش قابل ملاحظه ای پیدا کرده اند. بیشترین مقدار مدول فشاری در روی گره و در پائین ساقه به مقدار ۲۱۵/۳ مگاپاسکال و کمترین آن در بین گره در قسمت بالایی ساقه به مقدار ۸۴/۵ مگاپاسکال به دست آمد. انرژی فشاری نیز دارای رفتار مشابهی در نواحی مختلف روی ساقه بود که بیشترین مقدار آن روی گره در قسمت پایین به مقدار ۱۱۱/۳ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن در قسمت بالا و بین گره به مقدار ۴۴/۱ میلی ژول بر میلیمتر مربع به دست آمد. این امر نشان می دهد که رفتار ساقه در مقابل بارگذاری فشاری با ساختار ساقه در قسمت های مختلف ارتباط دارد. پوست لیفی ضخیم تر در نقاط پایین ساقه و رشته های درهم تنیده در نقاط گره ای موجب می شود که انرژی فشاری بیشتری برای فشرده کردن این نقاط به کار رود. از طرفی، چون

### مدول الاستیسیته و انرژی در فشار

شاخصه هایی که خواص فشاری ساقه نیشکر را بیان می کنند، شامل مدول الاستیسیته و انرژی در فشار می باشند. بررسی خواص فشاری ساقه های نیشکر از این نظر اهمیت دارد که در فرایند استخراج شیره، ساقه باید تحت فشار زیاد قرار گیرد. مطابق شکل ۴ مدول الاستیسیته فشاری از رابطه (۳) و بخش خطی منحنی نیرو- جابه جایی به دست آمد و انرژی فشاری نیز با توجه به رابطه (۳) و از سطح زیر منحنی نیروی فشار - جابه جایی بدست آمد. همانگونه که از شکل ۴ پیداست بین نیروی فشاری در قسمت های مختلف ساقه تفاوت معنی داری وجود دارد. نیروی فشاری کمتر در قسمت بالای ساقه به دلیل وجود حفره های بین سلولی بیشتر نسبت به سلول های تشکیل دهنده بافت است. از طرفی، سلول های بین بافتی در مقابل فشار مقاومت کمتری دارند. در روی گره نیز نیروی فشاری بیشتری برای فشرده کردن ساقه مورد نیاز می باشد؛ زیرا گره ها محل تجمع و تلاقی الیاف بافتی ساقه است که





شکل (۴) نمودار نیروی فشار - جابجایی ساقه نیشکر در وضعیت بارگذاری عرضی در (الف) بین گره و (ب) روی گره  
 Figure (4) Pressure force-displacement diagram of sugarcane stem at lateral loading situation at (a) between nodes and (b) on the nodes

فشرده می شوند و حجم آنها کاهش می یابد (شکل ۴).  
 سرواستوا و همکاران (۱۶) وجود فیبرهای ضخیم و محکم  
 در نقاط نزدیک به زمین در ساقه های گیاهی را دلیل  
 استحکام بیشتر ساقه در این نواحی بیان کردند.

بارگذاری به صورت شبه استاتیکی وارد می شود و ساقه  
 ساختار فیبری-سلولی دارد، لذا در مراحل ابتدایی فشار  
 تغییرات نسبتاً خطی مشاهده می شود. سپس با افزایش فشار  
 بتدریج شکافت بافتی اتفاق می افتد و حفره های بین سلولی

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر محل برش و ارتفاع روی ساقه بر مدول الاستیسیته فشاری و انرژی فشاری ساقه نیشکر

Table (2) Analysis of variance results related to the effect of cutting place and height of stem on the pressure modulus of elasticity and pressure energy of sugarcane stem

انرژی فشاری (Pressure energy) (mJ.mm <sup>-2</sup> )	مدول فشاری (Pressure modulus) (Mpa)	محل برش (Cutting place)	ارتفاع روی ساقه (Height on the stem)
111.3a	215.3 a	روی گره (On the node)	پائین (Bottom)
98.4b	200.5 b	بین گره ها (Between nodes)	
72.5c	139.4c	روی گره (On the node)	وسط (Middle)
60.2d	126.5d	بین گره ها (Between nodes)	
51.3e	98.2e	روی گره (On the node)	بالا (Up)
44.1f	84.5f	بین گره ها (Between nodes)	

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد

In each column, the same letter shows no significant difference at probability level of 5%

### تنش، انرژی و مدول الاستیسیته در خمش

تغییرات نیرو - جابجائی عمودی مربوط به بارگذاری خمشی ساقه نیشکر برای تیر یک سرگیردار در دو حالت روی گره و بین گره در سه قسمت ساقه در شکل ۵ آورده شده است.

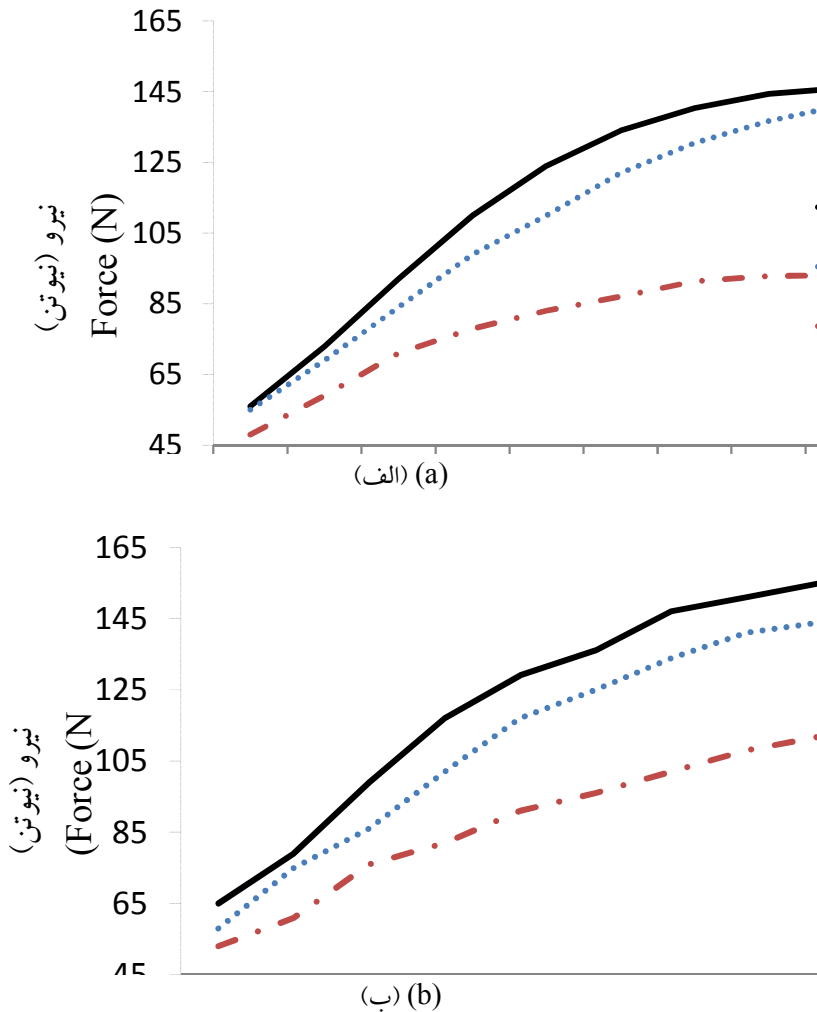
همانگونه که مشاهده می شود، در روی گره برای خمش ماکزیمم ۲۰ میلیمتری انتهای ساقه در هر سه قسمت ساقه به نیروی خمشی بیشتری نیاز است. ساقه در محل گره در مقابل خمش مقاومت بیشتری می کند، زیرا امتداد الیاف در این نقطه به هم پیوسته شده و گره خورده اند و در نتیجه همانند طناب به هم پیچیده عمل می کنند و تکیه گاه محکمی در مقابل خمش ایجاد می کنند. از طرف دیگر، تغییرات نیرو و جابه جایی عمودی در هر دو نقطه روی گره و بین گره ای از روند مشابهی تبعیت می کند که در ابتدا تا حدی به صورت خطی بوده و سپس روند افزایشی و تدریجی پیدا می کند. در محدوده خطی با توجه به خاصیت الاستیکی ماده از این بخش برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده شد. با توجه به شکل ۵

تغییرات نیرو - جابه جایی در نقاط روی گره و فواصل بین گره ای و نیز در قسمت های مختلف ساقه تفاوت معنی داری دارند اما در قسمتهای وسط و پایین ساقه روند تغییرات مشابهت بیشتری با هم دارند و نیروی خمشی بیشتری نسبت به قسمت بالایی ساقه نیاز دارند. در قسمت پایین، ساقه الیاف ضخیم تری دارد و پوست لیف مانند آن به ساقه و سلول های داخلی استحکام می بخشد. راهدار (۱۳) گزارش کردند که ساختار مکانیکی ساقه نیشکر به دلیل وجود پوست لیفی و پوشش موم روی آن که مانع از اتلاف رطوبت می شود در مقابل بارهای وارده استحکام زیادی دارد. نتایج مربوط به مقایسه میانگین های تنش، انرژی و مدول الاستیسیته حاصل از بارگذاری خمشی برای سطوح مختلف ارتفاع روی ساقه و محل برش در جدول ۳ آورده شده است. محدوده تغییرات تنش حاصل از خمش از پایین تا بالای ساقه ۹۳/۴ الی ۷۹/۲ مگاپاسکال می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، مقادیر تنش مربوط به قسمت پایین و وسط ساقه تفاوت معنی داری با هم ندارند؛ ولی با قسمت بالایی ساقه دارای اختلاف معنی دار می باشند. بعلاوه، مقادیر

الاستیسیته خمشی نیز در نواحی مختلف روی ساقه دارای تفاوت معنی داری با هم هستند؛ اما این تفاوت بین گره و روی گره تنها در قسمت پایین ساقه معنی دار است. با وجود آن که مقاومت و انرژی برشی مخصوص ساقه‌ها در قسمت‌های بالاتر ساقه کمتر می‌باشد و با توجه به این که نیشکر ممکن است دارای ساقه‌های فرعی در نواحی پایین باشد؛ ولی مشاهده‌ها نشان می‌دهد که بهتر است برداشت این محصول تا حد ممکن نزدیک به سطح زمین انجام شود و طراحی مکانیزم‌های برشی باید بر اساس مقاومت برشی این نواحی که خشی‌تر هستند صورت پذیرد.

تنش بر روی گره و بین گره‌ها نیز در هیچ یک از قسمت‌های روی ساقه تفاوت معنی داری با هم ندارند. این امر نشان می‌دهد که وجود گره در روی ساقه بر تنش حاصل از خمش تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

مقادیر مربوط به انرژی حاصل از خمش در نواحی مختلف روی ساقه و همچنین بین گره‌ها و روی گره دارای تفاوت معنی داری با هم هستند. انرژی خمشی ساقه نیشکر در نواحی پایین ساقه بطور قابل توجهی بیشتر از نواحی بالاتر بود، به طوری که این مقدار از  $110/2$  به  $72/4$   $(\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2})$  در قسمت بالای ساقه کاهش پیدا کرد. نقاط بالاتر ساقه به دلیل بافت نرم‌تر نیاز به انرژی کمتری برای خم شدن دارند. مدول



شکل (۵) تغییرات نیرو - جابجایی عمودی تیر یکسر گیردار (الف) روی گره و (ب) بین گره‌ها

Figure (5) Force-vertical displacement of cantilever beam at (a) on the node and (b) between nodes

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس مربوط به تاثیر محل برش و ارتفاع روی ساقه بر تنش، انرژی و مدول الاستیسیته در خمش ساقه نیشکر

Table (3) Analysis of variance results related to the effect of cutting place and height of stem on the stress, energy and bending modulus of elasticity of sugarcane stem

مدول الاستیسیته خمشی (Bending modulus of elasticity) (Mpa)	انرژی خمشی (Bending energy) (mJ.mm <sup>-2</sup> )	تنش خمشی (Bending stress) (Mpa)	محل برش (Cutting place)	ارتفاع روی ساقه (Height on the stem)
721.3a	110.2a	93.4a	روی گره (On the node)	پائین (Bottom)
702.9b	101.3b	90.5a	بین گره ها (Between nodes)	
682.5bc	95.2c	89.2ab	روی گره (On the node)	وسط (Middle)
679.8c	90.4d	87.6b	بین گره ها (Between nodes)	
641.5d	78.1d	80.4c	روی گره (On the node)	بالا (Up)
636.7d	72.4e	79.2c	بین گره ها (Between nodes)	

حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ می باشد

In each column, the same letter shows no significant difference at probability level of 5%

### نتیجه گیری

۲- نیروی فشاری با تغییر ارتفاع در نواحی مختلف

روی ساقه تغییر پیدا می کند به طوری که در نواحی پایین-تر نیروی فشاری بیشتری نسبت به نواحی بالاتر نیاز است. بیشترین مقدار مدول فشاری در روی گره و در پایین ساقه به مقدار ۲۱۵/۳ مگاپاسکال و کمترین آن در بین گره در قسمت بالایی ساقه به مقدار ۸۴/۵ مگاپاسکال به دست آمد.

۳- تغییرات تنش حاصل از خمش از پایین تا بالای

ساقه در محدوده ۷۹/۲ تا ۹۳/۴ مگاپاسکال می باشد. مقادیر تنش مربوط به قسمت پایین و وسط ساقه تفاوت معنی داری با هم ندارند؛ ولی با قسمت بالای ساقه دارای اختلاف معنی دار می باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که خصوصیات برشی، فشاری و خمشی ساقه نیشکر تحت تاثیر ارتفاع روی ساقه و وجود یا عدم وجود گره روی ساقه قرار گرفت و به طور کلی نتایج ذیل به دست آمد:

۱- تغییرات مقاومت برشی ساقه در نواحی مختلف

روی ارتفاع ساقه در محدوده ۱/۵۳ تا ۲/۴۷ مگاپاسکال در روی گره و بین گره می باشد. در نقاط بالایی ساقه مقاومت برشی به طور قابل توجهی کمتر از نقاط وسط و پایین دارد بطوریکه در بین گره ها تفاوت معنی داری بین مقادیر مقاومت برشی مشاهده شد.

منابع

1. Anonymous. 2012. Agricultural statistics, Statistics and information technology office, Jihade-e- Agriculture Ministry, Tehran, Iran.
2. Chadtapadhayay, P.K., and Pandey, K.P. 1999. Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi-static deformation, Journal of Agricultural Engineering Research, 73: 199-206.
3. Chen, Y., Luis J., and Liu, J. 2004. Power requirements of hemp cutting and conditioning. Biosystems Engineering, 87(4): 417-424.
4. Ince, A., Ugurluay, S., Guzel, E., and Ozcan, M.T. 2005. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue. Biosystems Engineering, 92(2): 175-18.
5. Eshaghbeigi, A., Hoseinzadeh, B., Khazaei, M., and Masoomi, A. 2009. Bending and shearing properties of Alvand variety of wheat stem. World Applied Sciences Journal, 6(8): 1028-1032
6. Hoseinzadeh, B., Eshaghbeigi, A., and Raghmi, N. 2009. Effects of moisture content, bevel angle and cutting speed on shearing energy of three wheat varieties. World Applied Sciences Journal, 7(9): 1120-1123.
7. Igathinathan, C., Womac, R., and Sokhansanj, S. 2010. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting. Biosystems Engineering, 107: 97-106.
8. Jafari, M., Rajabipor, A., and Mobli, H. 2011. Investigation the effect of blade type and velocity on the cutting force of two sugarcane stems of south Khuzistan. Journal of Agricultural Engineering Research, 11(3):15-26.
9. Kronbergs, E. 2000. Mechanical strength testing of stalk materials and compacting energy evaluation. Industrial Crops and Products, 11: 211-216.
10. Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties and plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
11. Nazari Galedar, M., Jafari, A., Mohtasebi, S.S., Tabatabaefar, A., Sharifi, A., O'Dogherti, M.J., Rafiee, S., and Richard, G. 2008. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems. Biosystems Engineering, 101(2): 199-208.
12. Persson, S. 1987. Mechanics of cutting plant material. ASAE Monograph No. 7. St. Joseph, Michigan, USA.
13. Rahdar, M.R. 2004. Sugarcane. Ahvaz Shahid Chamran University Press.
14. Rahman khan, M., Chen, Y., Lague, C., Landry, H., Peng, Q., and Zhong, W. 2010. Compressive properties of hemp Stalks. Biosystems Engineering, 106: 315-323.
15. Shahbazi, F., Nazarigaledar, M., Taheri-garavand, A., and Mohtasebi, S. 2011. Physical properties of safflower stalk. International Agrophysics, 25: 281-286.

16. Srivastava, A.K., Goering, C.E., and Rohrbach, R.P. 1993. Engineering principal of agricultural machines. ASAE. St. Joseph, Michigan, USA.
17. Summers, M.D., Jenkins, B.M., and Yore, M.W. 2002. Cutting properties of rice straw, Paper No. 026154, An ASAE meeting presentation.
18. Taghinejad, J., Alimardani, R., and Jafari, A. 2013. Effect of moisture content and dimensional size on the shearing characteristic of sugarcane stalks. *Journal of Agricultural Technology*, 9(2): 213-226.
19. Tavakoli, H., Mohtasebi, S., Jafari, A. 2009. Physical and mechanical properties of wheat straw as influenced by moisture content. *International Agrophysics*, 23: 175-181.
20. Womac, A.R., Yu, M., Igathinathane, C., Hayes, P., Narayan, D., Sokhansanj, S., and Wright, L. 2005. Shearing characteristics of biomass for maize reduction, ASAE Paper No. 056058, St. Joseph.