

## بررسی عوامل مکانیکی موثر بر مقاومت برشی ساقه‌های نشای گوجه‌فرنگی و بادنجان در مرحله پیوندزنی

میثم لسانی<sup>۱</sup>، سعید مینایی<sup>۲\*</sup>، جعفر مساح<sup>۳</sup> و رضا صالحی<sup>۴</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استاد؛ گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
۳- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ابوریحان، تهران، ایران  
۴- استادیار گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۷

### چکیده

امروزه یکی از راه‌های مهم توسعه کشت سبزی‌ها، گسترش دانش و تجهیزات تولید گیاهان پیوندی است. این بخش در حوزه مهندسی تجهیزات کشاورزی قرار گرفته و بررسی مکانیک برش این گونه گیاهان از ابتدایی‌ترین گام‌ها در این زمینه است. در این پژوهش، با انتخاب دو گیاه گوجه‌فرنگی و بادنجان، دو سبزی مهم و پر تولید، اثر عواملی مانند نوع تیغه، سرعت بارگذاری، زاویه تمایل و زاویه اریب برش بر دو شاخص مهم برش یعنی بیشینه نیروی برش و انرژی برش ساقه گیاه در مرحله پیوندزنی بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد بیشینه نیروی ویژه برش ساقه در محدوده ۰/۲ تا ۵/۵ نیوتن بر میلی‌متر قطر ساقه و انرژی ویژه برش در محدوده ۰/۲ تا ۵ میلی‌ژول بر میلی‌متر مربع از سطح مقطع ساقه است. همچنین مشخص شد که از میان عوامل مورد بررسی، فقط نوع تیغه و زاویه تمایل آن بر نیرو و انرژی برش تأثیرگذار هستند. از میان انواع تیغه رایج در پیوندزنی سبزی‌ها، تیغه اصلاح صورت نیازمند کمترین نیروی برش است و افزایش زاویه تمایل در یکنواخت‌تر کردن برش مفید است.

### واژه‌های کلیدی

پیوند سبزیجات، تیغه برش، مکانیک برش، نیروی برشی

### مقدمه

آفات و بیماری‌های خاک‌زی و بدون کاربرد سموم. افزون بر مقاوم بودن گیاه پیوندی به آفات و بیماری‌ها، اهداف دیگری چون افزایش عملکرد و افزایش مقاومت به تنش‌های شوری و خشکی را می‌توان با انتخاب پایه مناسب دنبال کرد. کاربرد این روش را می‌توان در متون قدیمی ژاپنی، چینی و کره‌ای یافت ولی توسعه تجاری پیوند سبزی‌ها با توسعه کشت‌های گلخانه‌ای از دهه ۱۹۵۰ همراه بوده است. کاربرد تجاری این روش در کشورهای جنوب شرقی آسیا مانند ژاپن، چین و کره از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و کشورهای غربی از دهه ۱۹۹۰ به آن روی آوردند.

سبزی‌ها از عناصر با اهمیت تغذیه‌ای برای انسان‌ها محسوب می‌شوند. این محصولات چربی و انرژی اندک و بافت فیبری دارند، شکم‌پرکن هستند و منابعی غنی برای تأمین مواد معدنی و ویتامین‌های ضروری شامل ویتامین‌های آنتی‌اکسیدان مانند A، C و E هستند. سطح تولید جهانی گوجه‌فرنگی ۱۷۱ میلیون تن بوده که در صدر سبزی‌های میوه‌دار است؛ در رتبه‌های بعدی به ترتیب هندوانه، خیار، بادمجان و خربزه قرار گرفته‌اند (Anon, 2017; Anon, 2014). پیوندزنی سبزی‌ها، روش دوستدار محیط زیست است برای مقاوم‌سازی گیاهان، مقابله با

بیش از ۹۰ درصد هندوانه کشت شده در ژاپن و کره را نشاهای پیوندی تشکیل می‌دهند؛ در چین، ۲۰ درصد از دو میلیون هکتار تحت کشت این محصول با نشاهای پیوندی کاشته می‌شود. با این حال کاربرد سبزی‌های پیوندی در غرب بسیار کمتر و محدود به محصولات موردی است. در آمریکا، نشای پیوندی مورد استفاده گوجه‌فرنگی است و برای کشت هیدروپونیک در ۷۰ درصد مساحت تحت این روش (۳۳۰ هکتار) کاربرد تجاری یافته است (Lee et al., 2010).

سه محصول هندوانه، خیار و خربزه از خانواده کدویان و سه محصول گوجه‌فرنگی، بادنجان و فلفل از خانواده بادنجانیان به صورت تجاری پیوند زده می‌شوند. در پیوند سبزی‌ها نیز مانند پیوند درختان، یکی از گیاهان نقش پایه را دارد و ریشه گیاه پیوندی را تشکیل می‌دهد و گیاه دیگر بخش هوایی آن را تشکیل می‌دهد و محصول نهایی را تولید می‌کند. پیوند سبزی‌ها در زمان تولید نشا صورت می‌پذیرد و عمر گیاه در آن زمان حدود ۳ هفته است. ساقه نشا در زمان پیوند زدن انعطاف‌پذیر و نرم است و در خانواده کدویان برگ‌های لپه‌ای کاملاً رشد کرده‌اند و تنها اولین برگ اصلی شروع به رشد کرده است اما در خانواده بادنجانیان، دو تا سه برگ اصلی تشکیل شده و رشد کرده‌اند. برای پیوند زدن، ساقه نشای پایه و پیوندک از محل مناسب بریده می‌شود و این دو سطح برش خورده بعداً به صورت دقیق و هم‌محور روی یکدیگر قرار می‌گیرند و معمولاً با ابزاری، اتصال این دو سطح تا پایان دوره تیمار روی یکدیگر حفظ و این دو فشرده می‌شوند. عملیات برش ساقه پایه و محل برش آن اهمیت ویژه‌ای دارد به گونه‌ای که هیچ جوانه‌ای روی نشای پایه باقی نماند تا جلو هرگونه رشد هوایی پایه گرفته شود. در زمان تیمار پس از پیوند زنی، شرایط محیطی کاملاً کنترل می‌شود تا بافت‌های آسیب‌دیده ترمیم شوند و اتصالات آوندی بین دو گیاه تشکیل گردد. پس از برش، دیواره سلول‌های سطح

برش پاره می‌شوند و می‌میرند. سلول‌های پاراننشیمی زیر این سلول‌ها به سرعت تکثیر می‌شوند و فضای بین دو سطح پیوند را پر می‌کنند و در محل پیوند بافت پینه‌ای تشکیل می‌شود. در ادامه فرآیند تیمار این سلول‌های مرستمی به سلول‌های پاراننشیمی و آوندی تمایز می‌یابند و اتصالات آوندی بین پایه و پیوندک را ایجاد می‌کنند. هم‌زمان با افزایش تقاضا و گرایش به نشاهای پیوندی، در کنار روش دستی تولید پیوند، ربات‌های پیوندزن سبزی‌ها به دلایلی مانند پیری نیروی کار، فصلی بودن عملیات پیوند و کوتاه‌بودن زمان برای تولید نشاهای پیوندی در حجم زیاد، توسعه یافته‌اند. برش صحیح نشا و برآورد نیرو و انرژی مورد نیاز برای این کار، بخشی از ملزومات طراحی و مکانیزه کردن پیوندزنی با ربات‌های پیوندزن است. طبق گزارش پژوهشگران، برش با دیسک دوار<sup>۱</sup> و کیفیت سطوح برش ایجاد شده در سرعت‌های مختلف بر نشاهای خانواده کدویان مناسب ارزیابی نگردید در حالی که روش برش ضربه‌ای به کمک تیغه ثابت نصب‌شده بر بازوی دوار<sup>۲</sup> نتایج بهتری نشان داده است (Suzuki et al., 1995; Kobayashi & Suzuki, 1996). در پژوهشی دیگر در حوزه ابزارهای برش در پیوند زدن، ابزاری دستی به منظور سهولت در برش و نیز برش صحیح و دقیق پایه و پیوندک در پیوند اسکنه‌ای<sup>۳</sup> سبزی‌ها توسعه داده شد (Morikawa et al., 2004). بیشینه نیروی برش نشای بادنجان در این روش پیوند زدن با ابزار دستی ساخته‌شده در سطوح مختلف سرعت برش کمتر از ۲۵ نیوتن اندازه‌گیری شد. برش صحیح و دقیق نشای پیوندی اهمیت فراوانی دارد به گونه‌ای که در ثبت اختراع ربات پیوندزن تمام‌خودکار سبزی‌های خانواده کدویان به مشکل ناپایداری سطوح برش ایجادشده با سیستم برش ربات اشاره شده است که باعث اشکال در اتصال نشاها می‌شود (Okoshi, 2011).

در پژوهش‌های صورت گرفته برای برش ساقه گیاهان مختلف، عواملی مانند میزان رطوبت، سرعت برش،

1- Disk Type Cutter  
3- Cleft Grafting

2- Rotating Arm Type

ثانیه را سرعت بهینه نشان داده است (Yiljep & Mohammed, 2005). همچنین، برش ساقه ذرت در محدوده سرعت ۱/۵ تا ۴ متر بر ثانیه صورت پذیرفته و نقطه بهینه انرژی برش از ترکیب پارامترهای تیغه با سرعت برش ۲/۶۵ متر بر ثانیه به دست آمد (Prasad & Gupta, 1975).

پرسون (Persson, 1987) در کتاب مکانیک برش مواد گیاهی به پژوهش‌هایی در زمینه اثر سرعت بر نیرو و انرژی برش اشاره می‌کند. پژوهش‌هایی که اثر کم سرعت بر نیرو و انرژی برش را نشان می‌دهند و بعضی از آنها رابطه مستقیم و برخی نیز رابطه عکس پارامترهای مکانیکی با سرعت برش را گزارش کرده‌اند. همچنین معنی‌دار نبودن این رابطه در محدوده سرعت برش کم نیز گزارش شده است. برای جمع‌بندی می‌توان گفت که اثر سرعت بر مکانیک برش بستگی دارد به محدوده سرعت مورد بررسی و روش و چگونگی برش. برای مثال، در برش‌های ضربه‌ای<sup>۳</sup> به‌رغم انرژی موردنیاز برای بریدن ساقه، نیروهایی از جمله نیروی لازم برای شتاب دادن به ساقه و غلبه بر نیروی اینرسی آن برای انتقال، به نیرو اصلی اضافه می‌گردد.

با توجه به اهمیت پیوند سبزی‌ها و کیفیت برش نشا در گرفتن پیوند و از طرفی بررسی مکانیک برش در طراحی ربات‌های پیوندزن، در این پژوهش به مطالعه مکانیک برش و عوامل مؤثر بر آن با مطالعه موردی دو گیاه اصلی خانواده بادنجانیان (گوجه‌فرنگی و بادنجان) پرداخته شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل نوع تیغه، زاویه تمایل، زاویه اریب و سرعت برش و اثر آنها بر نیرو و انرژی برش است.

### مواد و روش‌ها

زمان مناسب برای پیوندزنی نشاهای گوجه و بادنجان حدود سه هفته پس از کشت بذر آنها در سینی نشاست. تمامی اندازه‌گیری‌های مکانیکی و هندسی نشاهای با عمر

زاویه‌های تیغه و گیاه و موقعیت برش بر ساقه بررسی شده اند. میزان رطوبت ساقه اثر مستقیمی بر استحکام برشی و انرژی ویژه برش ساقه آفتابگردان و یونجه داشته به گونه‌ای که با افزایش رطوبت ساقه، مقادیر استحکام و انرژی ویژه برش افزایش یافته است (Ince *et al.*, 2005; Galedar *et al.*, 2008).

نتایج به دست آمده از برش ساقه ذرت نشان داد که با افزایش زاویه اریب<sup>۱</sup>، مقاومت برشی و انرژی ویژه برش کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش زاویه اریب از صفر به ۹۰ درجه، انرژی ویژه برش به یک‌دهم کاهش یافته که این مقدار کاهش قابل توجه است (Prasad & Gupta, 1975; Iqbal *et al.*, 2010). زاویه تمایل تیغه<sup>۲</sup> در مطالعه موردی روی ساقه نیشکر و ذرت رابطه معکوس با نیرو و انرژی ویژه برش را نشان می‌دهد (Prasad & Gupta, 1975; Mathanker *et al.*, 2015). اثر عامل سرعت بر مکانیک برش ساقه در پژوهش‌های مختلف، متفاوت بیان شده است.

نتایج برش با دستگاه آزمون مواد در محدوده سرعت ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه برای برش ساقه سورگوم نشان داده است که بین نیرو و انرژی ویژه برش با سرعت برش رابطه معکوس وجود دارد به گونه‌ای که با افزایش سرعت، نیرو و انرژی بر واحد سطح برش کاهش می‌یابد (Chattopadhyay & Pandey, 1999). در پژوهشی دیگر، نتایج حاصل از برش ساقه ذرت وجود رابطه مستقیم بین سرعت در محدوده ۸ تا ۱۶ متر بر ثانیه و انرژی برش را نشان داده است (Mathanker *et al.*, 2015). انرژی برش اندازه‌گیری شده با دستگاه آزمون برش ضربه‌ای پاندولی در دو پژوهش جداگانه پیرامون ساقه سورگوم و ذرت وجود رابطه درجه دوم میان سرعت و انرژی برش را نشان داده است که یک نقطه کمینه دارد.

نتیجه آزمایش‌های برش ساقه سورگوم در محدوده سرعت ۱ تا ۹ متر بر ثانیه، سرعت برش ۲/۹-۳/۵ متر بر

1- Tilt Angle  
3- Free of Impact Cut

2- Oblique or Knife Approach Angle

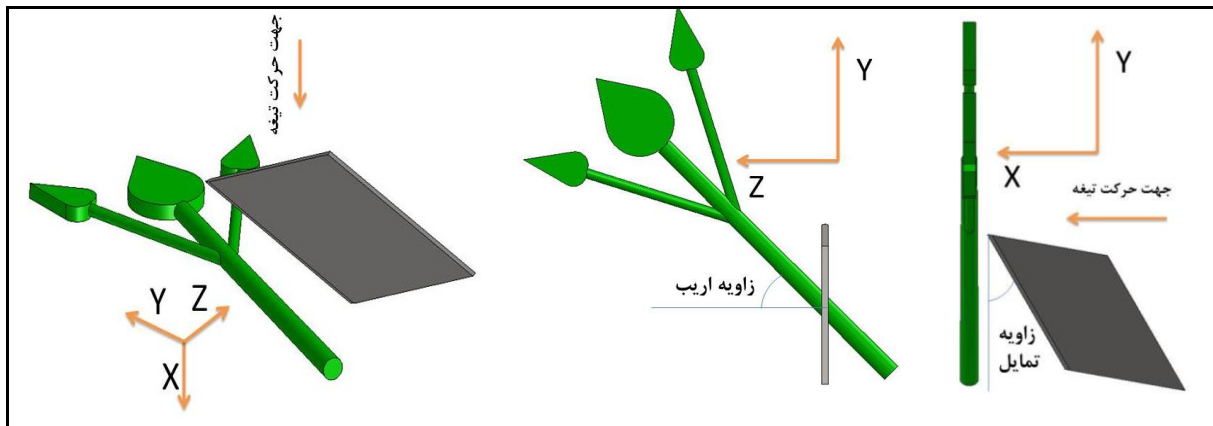
سه هفته صورت پذیرفت (شکل ۱). ابعاد هندسی نشا طول کلی ساقه نشا و تعداد برگ‌های اصلی قبل از آغاز شامل قطر ساقه در فاصله گره اول، طول ساقه در گره اول، آزمایش‌های مکانیکی اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- نمونه‌ای از نشاهای گوجه‌فرنگی و بادنجان سه هفته پس از کشت درون سینی نشا و آماده برای پیوندزنی (بعضی از نشاها به دلیل نداشتن رشد کافی و نامناسب بودن برای پیوندزنی، از آزمایش‌های بعدی حذف شدند)

محور  $X$  را تعیین می‌کند، صفحه‌ای که تیغه در آن قرار دارد صفحه  $XY$  است و در نتیجه جهت محور  $Y$  نیز مشخص می‌شود. جهت محور  $Z$  عمود بر دو جهت قبلی است. زاویه بین لبه تیغه با جهت مثبت محور  $Y$  را زاویه تمایل می‌گویند؛ زاویه بین ساقه گیاه با جهت مثبت محور  $Z$  زاویه اریب نامیده می‌شود. زاویه تمایل، با تنظیم زاویه نصب تیغه روی دستگاه آزمون مواد و زاویه اریب با تغییر زاویه ساقه روی گیره گیاه قابل تنظیم هستند (شکل ۲).

برای برش، از دو نوع تیغه ریش‌تراشی<sup>۱</sup> و جراحی (اسکالپل)<sup>۲</sup> که در پیوندزنی (دستی و ماشینی) مرسوم هستند به همراه تیغه موکت‌بری<sup>۳</sup> استفاده گردید. ضخامت تیغه‌ها به ترتیب ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر است. زاویه‌های تمایل و اریب بسته به جهت حرکت تیغه و وضعیت قرارگیری ساقه تعریف می‌شوند. برای تعیین محورهای مختصات برای تعیین زاویه‌های تمایل و اریب از روش قراردادی استفاده می‌کنیم. جهت حرکت تیغه، جهت



شکل ۲- زاویه‌های تمایل و اریب برای برش گیاه با تیغه

1- Razor Blade  
3- Utility Knife

2- Surgical Blade or Scalpel

فاصله ۵ میلی‌متر از هم مهار می‌شود که تیغه برش در بین آنها حرکت می‌کند. خمش ساقه در اثر تماس تیغه برش اتفاق می‌افتد.

دستگاه آزمون مواد<sup>۱</sup> SANTAM STM-20 برای اندازه‌گیری و ثبت نمودارهای نیرو-جاب‌جایی به کار گرفته شد (شکل ۳). نیروسنج ۳۰ نیوتنی Zemic با کلاس دقت C3 (استاندارد OMIL) برای اندازه‌گیری نیروی برش ساقه نشا روی دستگاه اینستران نصب گردید.

نیروی عکس‌العمل برای حفظ ساقه در جلو تیغه را ضد تیغه تامین می‌کند و گاهی با اینرسی خود گیاه تامین می‌شود. هر اندازه این نیروی عکس‌العمل بتواند جلو خمش ساقه را بیشتر بگیرد، نیرو و انرژی کمتری برای برش نیاز خواهد بود. این موضوع در ضد تیغه‌سندانی<sup>۱</sup> دیده می‌شود که ساقه به‌طور کامل بر آن تکیه می‌کند و مهار می‌شود؛ این ضد تیغه از هرگونه خمش ساقه جلوگیری می‌کند. در این تحقیق، ساقه با دو گیره به



شکل ۳- الف) دستگاه آزمون مواد SANTAM STM-20 برای اندازه‌گیری نیروی برش ساقه نشا با سه نوع تیغه، ب) تیغه موکت‌بر، پ) تیغه ریش تراش و ت) تیغه جراحی (اسکالپل) که با فیکسچر روی دستگاه اینستران نصب گردید.

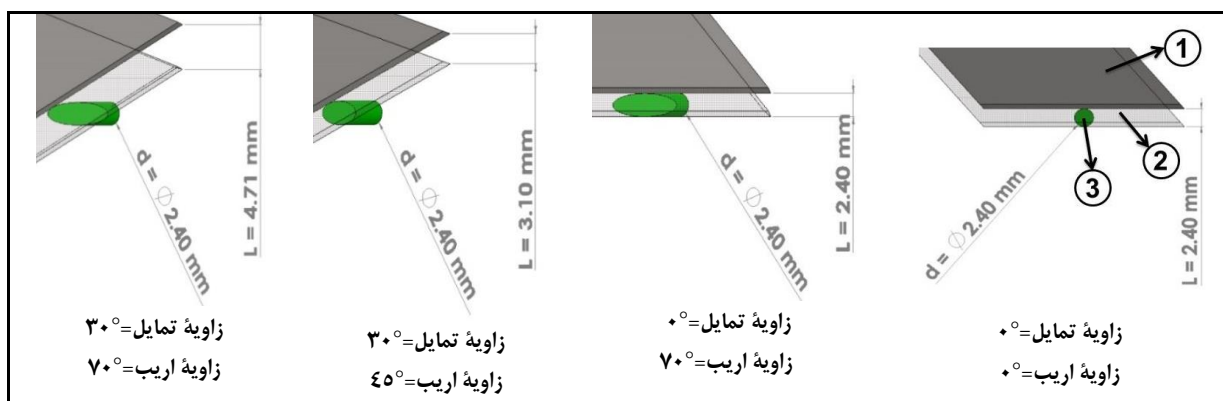
$$F_{s \max} = \frac{F_{\max}}{d} \quad (1)$$

$$E_{sc} = \frac{E_c}{A} = \frac{\int_0^L F dx}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (2)$$

داده‌های خروجی این دستگاه نیرو-جاب‌جایی است. با انتگرال‌گیری عددی روی این داده‌ها مقادیر انرژی برش استخراج گردید. مقادیر بیشینه نیروی برش ویژه و انرژی برش ویژه بر اساس روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند (Persson, 1987).

اریب وابسته نیست و برابر با قطر ساقه نشاست. ولی اگر زاویه تمایل تیغه غیر صفر شد، هر دو زاویه بر مسافت برش تأثیر می‌گذارند. به‌منظور محاسبه طول برش هر ساقه با قطر مشخص، از نرم‌افزارهای ترسیمی هندسی بهره‌گیری شد. با افزایش زاویه اریب از صفر درجه، سطح برش ساقه از دایره به بیضی‌گون تبدیل می‌شود. نقطه شروع تماس لبه تیغه با لبه بیضی‌گون و نقطه خروج لبه تیغه از لبه بیضی‌گون، نقاط شروع و پایان برش را مشخص می‌کنند و فاصله این دو نقطه در جهت محور x (جهت حرکت)، همان طول برش است. مثالی عددی از تأثیر زاویه‌های تمایل و اریب بر طول برش (L) برای برش ساقه‌ای به قطر ۲/۴ میلی‌متر در شکل ۴ آمده است.

که در آنها،  
 $F_{smax}$  = بیشینه نیروی ویژه برش (نیوتن بر میلی‌متر)؛  
 $F_{max}$  = بیشینه نیروی برش (نیوتن)؛  $E_c$  = انرژی برش (میلی‌ژول)؛  
 $E_{sc}$  = انرژی ویژه برش (میلی‌ژول بر میلی‌متر مربع)؛  
 $F$  = نیروی برش (نیوتن)؛  $A$  = سطح مقطع برش (میلی‌متر مربع)؛  
 $L$  = طول برش (میلی‌متر)؛ و  $d$  = قطر ساقه در محل برش (میلی‌متر) است.  
 علت استفاده از نیرو و انرژی ویژه به‌جای نیرو و انرژی، بی‌بعدسازی و حذف اثر تغییرات قطر ساقه نشا بر این دو شاخص است. منظور از پارامتر طول برش که در محاسبه انرژی دخیل است، میزان پیشروی تیغه از زمان تماس با گیاه تا برش کامل آن است. این طول در صورتی که زاویه تمایل تیغه برابر با صفر باشد، به زاویه



شکل ۴- مدل هندسی برش ساقه گیاه نمونه ( $d=2.4 \text{ mm}$ ) با تیغه موکت‌بری در زاویه‌های مختلف تمایل و اریب و اثر آن بر طول برش (L).  
 (۱) موقعیت تیغه در نقطه شروع برش، (۲) موقعیت تیغه در انتهای برش و (۳) سطح مقطع ساقه برش خورده نشا

وابسته مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. در این پژوهش، از طرح کاملاً تصادفی در قالب آزمایش فاکتوریل با سه تکرار استفاده شد. نیروی برش ۲۱۶ ساقه نشای گوجه‌فرنگی و بادنجان اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری و محاسبات و انتگرال‌گیری عددی برای محاسبه انرژی، داده‌ها در نرم‌افزار SPSS وارد شدند و تجزیه واریانس طرح و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد صورت پذیرفت.

نشاهای گوجه‌فرنگی و بادنجان پس از گذشت سه هفته از کشت درون سینی نشا برای پیوندزنی آماده هستند و آزمایش‌های برش این نشاها در این دوره صورت پذیرفت. نشاها پس از اندازه‌گیری‌های هندسی و ابعادی روی فیکسچر تهیه شده برای گرفتن ساقه نشا نصب می‌شدند و تنظیمات هر آزمایش از جمله زاویه‌های گیاه و تیغه به همراه تنظیم سرعت حرکت فک اینستران تنظیم می‌شد. سطوح متغیرهای مستقل و اثر آن بر مقادیر

جدول ۱- متغیرهای مستقل و وابسته مورد بررسی در این پژوهش برای دو نشای گوجه‌فرنگی و بادنجان در مرحله پیوندزنی

متغیرهای وابسته	متغیرهای مستقل	سطوح متغیر مستقل
بیشینه نیروی ویژه برش	نوع تیغه	تیغ جراحی، تیغ ریش تراش و تیغ موکت‌بری
انرژی ویژه برش	زاویه تمایل	۰°، ۳۰°، ۴۵°، ۷۰°
	زاویه اریب	۰°، ۴۵°، ۷۰°
	سرعت بارگذاری	۶۰، ۶۰۰ میلی‌متر در دقیقه

## نتایج و بحث

ربات پیوندزن بر مبنای ویژگی‌های هندسی نشاها تعریف و مشخص می‌شود. برای مثال، قطر دهانه گریپر بر مبنای قطر ساقه نشا در محل پیوند تعیین می‌گردد و پراکنش داده‌های قطر در انتخاب روش گرفتن ساقه و کنترل نیروی اعمالی به ساقه اهمیت دارد. همچنین، بیشینه فاصله مجاز بین مکانیسم برش یا نصب گیره با گریپر بر اساس طول گیاه و طول ساقه تا گره اول مشخص می‌شود.

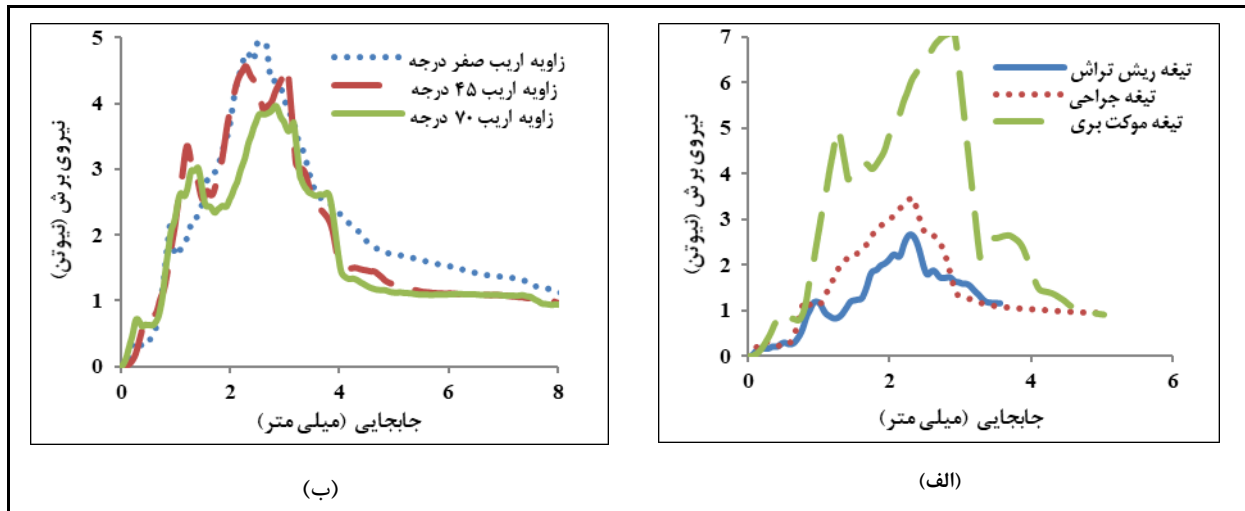
نتایج حاصل از اندازه‌گیری هندسی نشاهای گوجه‌فرنگی و بادنجان مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۲ گزارش شده است. در خصوص اهمیت ویژگی‌های هندسی نشاها باید گفت هم‌قطر بودن پایه و پیوندک در محل پیوند، عاملی مهم در موفقیت پیوندزنی است. در ضمن، بخشی از قیود هندسی در طراحی مکانیسم‌های

جدول ۲- ویژگی‌های هندسی نشاهای بادنجان و گوجه‌فرنگی در مرحله پیوندزنی در بررسی ۵۰ نمونه نشا

ویژگی هندسی	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
<b>نشای بادنجان</b>				
قطر ساقه در گره اول (میلی‌متر)	۱/۹	۲/۶	۲/۲	۰/۲
طول ساقه تا گره اول (میلی‌متر)	۱۴	۲۷	۱۹/۴	۲/۹
طول گیاه (میلی‌متر)	۳۵	۱۰۰	۶۴	۱۴
<b>نشای گوجه‌فرنگی</b>				
قطر ساقه در گره اول (میلی‌متر)	۱/۹	۲/۴	۲/۲	۰/۲
طول ساقه تا گره اول (میلی‌متر)	۳۰	۳۵	۳۱/۲	۲/۲
طول گیاه (میلی‌متر)	۵۵	۷۵	۶۴	۸/۹

فاصله گره اول با تغییر زاویه اریب در شکل ۵-ب آمده است. نتایج بررسی آماری اثر چهار عامل اصلی (نوع تیغه، زاویه اریب، سرعت و زاویه تمایل) بر ویژگی‌های بیشینه نیروی برش و انرژی برش در جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) مشاهده می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، عامل سرعت (در دو سطح ۶۰ و ۶۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) اثر معنی‌دار مستقیم و متقابل بر دو شاخص مقاومت برش نداشته است.

پس از تعیین محدوده ابعاد هندسی، نشاها با قرار گرفتن در گیره مخصوص (شکل ۳) به کمک تیغه‌های مختلف از محل مورد نظر بریده می‌شوند و مقدار نیروی برش را دستگاه آزمون مواد ثبت می‌کند. نمونه‌ای از نمودارهای نیروی برش-جابه‌جایی در شکل ۵ نشان داده شده است. برش ساقه سه نشای متفاوت گوجه‌فرنگی ولی با قطر یکسان که سه نوع تیغه برای آنها به کار گرفته شده است، در شکل ۵-الف رسم شده است. نمونه‌ای از نمودار نیروی برش-جابه‌جایی برای برش یک ساقه نشا در



شکل ۵- الف) نمونه‌ای از نمودار نیروی برش-جابه‌جایی برای سه نشای گوجه‌فرنگی با قطر ساقه یکسان و تأثیر نوع تیغه بر نیروی برش و ب) نمونه‌ای از نمودار نیروی برش-جابه‌جایی برای برش ساقه نشای گوجه‌فرنگی با تیغه ریش تراش و تأثیر تغییر زاویه اریب بر نیروی برش

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس داده‌های برش دو نشای گوجه‌فرنگی و بادنجان

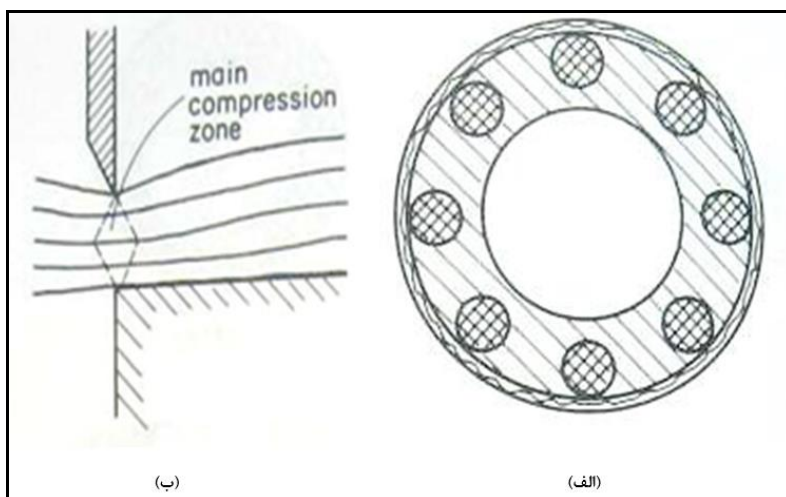
فاکتور	درجه آزادی	میانگین مربعات بیشینه نیروی ویژه برش (نیوتن بر میلی‌متر)		میانگین مربعات انرژی ویژه برش (میلی ژول بر میلی‌متر مربع)	
		بادنجان	گوجه‌فرنگی	بادنجان	گوجه‌فرنگی
نوع تیغه	۲	۴۴/۴۱۵**	۱۲/۴۷۷**	۴۳/۰۸۱**	۱۳/۶۸۱**
زاویه تمایل	۱	۱۴/۴۸۴**	۲/۳۱۴**	۰/۵۴۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۳۳ <sup>ns</sup>
زاویه اریب	۲	۰/۳۳۷ <sup>ns</sup>	۰/۳۱۳ <sup>ns</sup>	۰/۱۷۳ <sup>ns</sup>	۱/۲۵۹**
سرعت برش	۱	۰/۶۱۸ <sup>ns</sup>	۰/۰۹۹ <sup>ns</sup>	۰/۰۱۱ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۹ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه تمایل	۲	۰/۷۱۵ <sup>ns</sup>	۱/۱۸۸**	۲/۹۸۵**	۰/۲۹۸ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه اریب	۴	۰/۸۲۶ <sup>ns</sup>	۰/۴۲۰ <sup>ns</sup>	۰/۵۵۳ <sup>ns</sup>	۰/۶۳۳**
نوع تیغه × سرعت برش	۲	۰/۱۹۸ <sup>ns</sup>	۰/۵۵۱ <sup>ns</sup>	۰/۷۸۳ <sup>ns</sup>	۰/۴۸۶ <sup>ns</sup>
زاویه تمایل × زاویه اریب	۲	۱/۵۷۸*	۰/۵۶۵ <sup>ns</sup>	۰/۸۴۷ <sup>ns</sup>	۰/۰۱۰ <sup>ns</sup>
زاویه تمایل × سرعت برش	۱	۰/۰۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۵۵۸ <sup>ns</sup>	۰/۹۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۲۰۶ <sup>ns</sup>
زاویه اریب × سرعت برش	۲	۰/۱۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۱۱۹ <sup>ns</sup>	۰/۳۳۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۴۹ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه تمایل × زاویه اریب	۴	۰/۱۸۰ <sup>ns</sup>	۰/۱۲۳ <sup>ns</sup>	۰/۱۸۸ <sup>ns</sup>	۰/۱۴۹ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه تمایل × سرعت برش	۲	۱/۲۳۰ <sup>ns</sup>	۰/۵۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۹۲۹ <sup>ns</sup>	۰/۱۵۳ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه اریب × سرعت برش	۴	۰/۶۹۸ <sup>ns</sup>	۰/۰۹۲ <sup>ns</sup>	۰/۲۶۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۸۸ <sup>ns</sup>
زاویه تمایل × زاویه اریب × سرعت برش	۲	۰/۴۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۸۸ <sup>ns</sup>	۰/۰۲۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۳۵ <sup>ns</sup>
نوع تیغه × زاویه تمایل × زاویه اریب × سرعت	۴	۰/۴۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۱۴۸ <sup>ns</sup>	۰/۰۵۹ <sup>ns</sup>	۰/۰۸۹ <sup>ns</sup>
برش					
خطا	۷۲				
کل	۱۰۷				

<sup>ns</sup>: نبود تفاوت معنی‌دار، \* تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، \*\* تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.



میان این بافت نرم قرار دارند و استحکام کششی بالایی به آن می‌بخشند (شکل ۶-الف). در اثر تماس تیغه برش با ساقه، بافت‌های زمینه که استحکام مکانیکی کمتری دارند دچار لهیدگی و تخریب مکانیکی می‌شوند و بافت‌های آوندی مانند کابل‌های تحت کشش، دچار دو تنش کششی ناشی از خمش ساقه در جلو تیغه و تنش فشاری ناشی از نوک تیغه وارد به بافت‌ها می‌شوند (۶-ب). باید توجه داشت در خانواده کدویان وسط ساقه توخالی است (ماده‌ای وجود ندارد) ولی در خانواده بادنجانیان (گیاهانی که در این پژوهش مطالعه شده‌اند) وسط ساقه توپر است.

در توضیح برخی از نتایج لازم است مدل مکانیکی ساقه نشا مورد توجه قرار گیرد. ساقه نشا از بافت‌های مختلفی تشکیل شده که استحکام مکانیکی آنها متفاوت است. آوندها و پوست ساقه اصلی‌ترین عناصر استحکام‌بخشی به ساقه‌اند. سلول‌های فیبری درون بافت‌های آوندی استحکام کششی بالایی دارند و از نظر گسیختگی، رفتار ماده نرم را نشان می‌دهند که به سهولت در جهت تنش برشی بیشینه دچار گسیختگی می‌شوند. از نظر مکانیکی، ساقه گیاه را می‌توان مانند ماده‌ای مرکب (کامپوزیت) در نظر گرفت که دارای بافت زمینه نرم با مقاومت مکانیکی کم است و آوندها مانند کابل‌هایی در

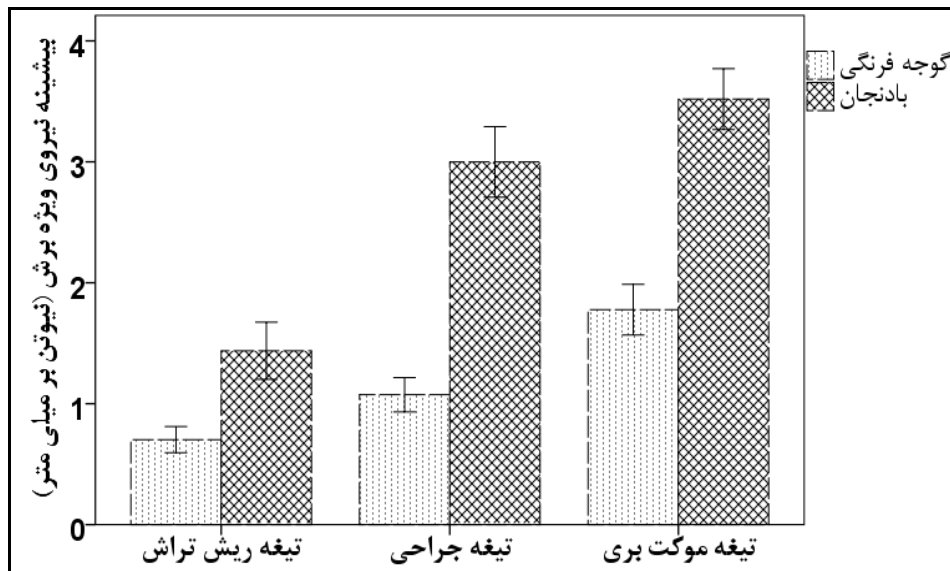


شکل ۶- معادل مکانیکی یک مقطع از ساقه. الف) بافت‌های ساختاری (آوندهای فیبری) مانند تعدادی میله استحکام‌بخش که به صورت محیطی قرار گرفته‌اند و ب) فیبرهای آوندی در زیر تیغه تحت فشار قرار گرفته‌اند (Persson, 1987)

انتظار نبود و نشان داد که با افزایش ضخامت تیغه، نیروی ویژه برش افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که به طور تقریب بیشینه نیروی ویژه برش تیغه جراحی و موکت‌بری برای نشای بادنجان به ترتیب ۲ و ۲/۳ برابر تیغه ریش تراش و در نشای گوجه‌فرنگی ۱/۵ و ۳ برابر آن است.

### بیشینه نیروی ویژه برش

محدوده تغییرات بیشینه نیروی ویژه برش در آزمایش‌ها به ترتیب ۰/۵ تا ۵/۵ و ۰/۲ تا ۳ نیوتن بر میلی‌متر برای نشاهای بادنجان و گوجه‌فرنگی به دست آمده است. تیغه ریش تراش کمترین و تیغه موکت‌بر بیشترین نیروی ویژه برش را دارند (شکل ۷). نتایج آزمایش‌ها دور از



شکل ۷- بیشینه نیروی ویژه برش دو نشای گوجه‌فرنگی و بادنجان با سه نوع تیغ برش

$$CROWS = \frac{LWC * \tan ANO}{LTS} \quad (3)$$

که در آن،

$CROWS$  = ثابت بی‌بعد تأثیر زاویه تمایل بر نیروی برش؛  
 $LWC$  = پهنای لایه برش در زیر تیغه؛  $LTS$  = ضخامت لایه  
 برش؛ و  $ANO$  = زاویه تمایل تیغه (Persson, 1987).

افزایش زاویه اریب برش ساقه ذرت از صفر به ۴۵ درجه، باعث کاهش نیروی برش بیشینه به میزان ۴۰ درصد شده است (Igathinathane et al., 2010). استحکام برشی ساقه ذرت، با افزایش زاویه تمایل از صفر تا ۶۰ درجه کاهش پیدا می‌کند (Prasad & Gupta, 1975). نتایج منتشر شده روند یکسانی را نشان نمی‌دهند. بررسی دقیق‌تر فرآیند برش ابعاد پدیده را روشن‌تر می‌سازد، از جمله توجه به این نکته که ساقه نشا انعطاف‌پذیر و نرم است در حالی که ساقه ذرت خشبی و ترد<sup>۱</sup> را دارد. آوندها در ساقه نرم نشا حالت ارتجاعی دارد در حالی که در ساقه رسیده یا خشکیده ذرت احتمال جابه‌جا شدن بافت‌های فیبری وجود ندارد و رفتار مواد ترد را از خود نشان می‌دهند.

اثر زاویه تمایل بر بیشینه نیروی ویژه برش دو نشا متفاوت است و بستگی دارد به سطوح دو متغیر مستقل دیگر. افزایش زاویه تمایل در نشای گوجه‌فرنگی فقط برای تیغه موکت‌بری باعث کاهش بیشینه نیروی ویژه برش شده است در حالی که در دو تیغه جراحی و ریش‌تراش این افزایش زاویه تمایل، باعث کاهش معنی‌دار این پارامتر نگردید (جدول ۴). در نشای بادنجان اثر افزایش زاویه تمایل تیغه فقط در سطح زاویه اریب ۴۵ درجه باعث کاهش معنی‌دار بیشینه نیروی ویژه برش گردید ولی در زاویه اریب صفر و ۷۰ درجه کاهش اندکی مشاهده شد که این تغییر از نظر آماری معنی‌دار نیست.

دلیل اصلی افزایش زاویه تمایل، کاهش بیشینه نیروی برش است. این کاهش به پهنای لایه مواد زیر تیغه وابسته است. پژوهشگران با ارائه مدل ریاضی برش جسمی ستطیل شکل، رفتار نیروی برش تیغه با افزایش زاویه تمایل را تحلیل کردند (Persson, 1987). در این مدل، یک ثابت بی‌بعد تعریف شد (رابطه ۳). با افزایش مقدار این ثابت به بیش از ۱/۵، مقدار بیشینه نیروی برش کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۴- نتایج آزمون مقایسه میانگین‌های دو متغیر وابسته (بیشینه نیروی ویژه برش و انرژی ویژه برش) برای نشاهای گوجه‌فرنگی و بادنجان به صورت جداگانه با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد

نشای گوجه‌فرنگی		نشای بادنجان		زاویه انحراف (درجه)	زاویه تمایل (درجه)	نوع تیغه
انرژی ویژه برش (میلی‌ژول بر میلی‌متر مربع)	بیشینه نیروی ویژه برش (نیوتن بر میلی‌متر)	انرژی ویژه برش (میلی‌ژول بر میلی‌متر مربع)	بیشینه نیروی ویژه برش (نیوتن بر میلی‌متر)			
۰/۳۸ <sup>a</sup>	۰/۵۶ <sup>a</sup>	۱/۷۵ <sup>bc</sup>	۲/۰۵ <sup>c*</sup>	۰		تیغه ریش تراش
۰/۴۳ <sup>a</sup>	۰/۶۱ <sup>a</sup>	۱/۷۱ <sup>bc</sup>	۲/۰۹ <sup>c</sup>	۴۵	۰	
۰/۸۶ <sup>abcd</sup>	۱/۰۶ <sup>abc</sup>	۱/۵۱ <sup>ab</sup>	۱/۷۶ <sup>bc</sup>	۷۰		
۰/۵۴ <sup>ab</sup>	۰/۶۶ <sup>ab</sup>	۱/۱۰ <sup>ab</sup>	۱/۲۱ <sup>ab</sup>	۰		
۰/۶۳ <sup>abc</sup>	۰/۷۳ <sup>ab</sup>	۰/۷۶ <sup>a</sup>	۰/۸۱ <sup>a</sup>	۴۵	۳۰	
۰/۶۱ <sup>abc</sup>	۰/۶۰ <sup>a</sup>	۰/۶۸ <sup>a</sup>	۰/۷۰ <sup>a</sup>	۷۰		
۱/۰۹ <sup>cde</sup>	۱/۳۰ <sup>bcd</sup>	۲/۸۵ <sup>de</sup>	۳/۲۵ <sup>de</sup>	۰		تیغه جراحی
۰/۸۹ <sup>abcd</sup>	۰/۹۹ <sup>abc</sup>	۲/۹۹ <sup>def</sup>	۳/۳۵ <sup>de</sup>	۴۵	۰	
۰/۸۷ <sup>abcd</sup>	۱/۰۶ <sup>abc</sup>	۲/۴۶ <sup>cd</sup>	۳/۱۷ <sup>de</sup>	۷۰		
۱/۲۴ <sup>def</sup>	۱/۳۹ <sup>cd</sup>	۳/۳۲ <sup>def</sup>	۳/۴۱ <sup>de</sup>	۰		
۱/۰۴ <sup>bcde</sup>	۰/۹۷ <sup>abc</sup>	۲/۸۵ <sup>de</sup>	۲/۵۴ <sup>cd</sup>	۴۵	۳۰	
۱/۲۳ <sup>def</sup>	۰/۷۳ <sup>ab</sup>	۲/۸۹ <sup>de</sup>	۲/۲۹ <sup>c</sup>	۷۰		
۱/۶۶ <sup>f</sup>	۲/۳۶ <sup>ef</sup>	۳/۱۲ <sup>def</sup>	۳/۴۸ <sup>e</sup>	۰		تیغه موکت‌بری
۱/۶۵ <sup>f</sup>	۱/۸۴ <sup>de</sup>	۳/۷۶ <sup>ef</sup>	۴/۰۳ <sup>ef</sup>	۴۵	۰	
۲/۳۰ <sup>g</sup>	۲/۴۴ <sup>f</sup>	۳/۱۳ <sup>def</sup>	۴/۴۱ <sup>f</sup>	۷۰		
۱/۴۰ <sup>def</sup>	۱/۴۶ <sup>cd</sup>	۳/۲۰ <sup>def</sup>	۳/۳۷ <sup>de</sup>	۰		
۱/۵۰ <sup>ef</sup>	۱/۵۱ <sup>cd</sup>	۳/۳۳ <sup>def</sup>	۳/۲۷ <sup>de</sup>	۴۵	۳۰	
۲/۳۱ <sup>g</sup>	۱/۵۳ <sup>cd</sup>	۳/۸۸ <sup>f</sup>	۳/۲۷ <sup>de</sup>	۷۰		

\*: در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

برش دیده نمی‌شود. نیروهای وارد به تیغه شامل دو بخش می‌شود: نیروهایی وارد بر لبه برنده تیغه و نیروهای گوه‌ای که به سطح جانبی تیغه وارد می‌شوند. نیروهای لبه برنده باعث ایجاد تنش موضعی بزرگ در مواد می‌شوند در حالی که نیروی گوه‌ای پس از گسیختگی سلول‌ها، شیار برش را باز و فضای کافی را برای عبور تیغه ایجاد می‌کند

با قرار دادن پهنا و ضخامت لایه برش برابر با قطر ساقه نشا در رابطه ۳، کمینه زاویه تیغه برای کاهش بیشینه نیروی ویژه برش، مقدار ۵۶ درجه به دست می‌آید. بیشینه نیروی ویژه برش در این پژوهش در بیشتر موارد این مدل ریاضی را تأیید کرده است و با افزایش زاویه تمایل تا ۳۰ درجه، کاهش معنی‌دار در بیشینه نیروی ویژه

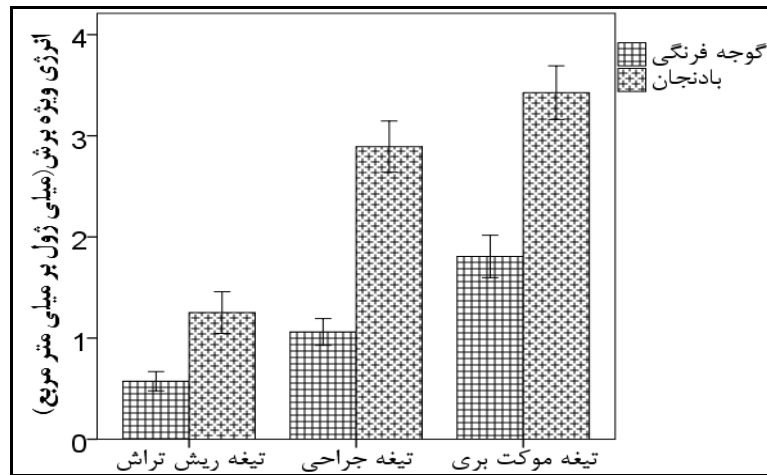
(Persson, 1987). نیروی وارد به تیغه با تیزی و ضخامت لبه رابطه عکس دارد و نیروی گوه‌ای با ضخامت تیغه برش رابطه مستقیم (یعنی با افزایش ضخامت تیغه، افزایش پیدا می‌کند). در خصوص تیغه‌های آزمایشی می‌توان گفت که با فرض یکسان بودن تیزی لبه هر سه، نیرو و انرژی برش تیغه ریش‌تراش کمتر از نیرو و انرژی برش تیغه جراحی و هر دو کمتر از نیرو و انرژی برش تیغه موکت‌بری است که نتایج آزمایش نیز این موضوع را تأیید می‌کند در حالی که باید توجه داشت تیزی تیغه موکت‌بری کمتر از دو تیغه دیگر است.

اثر ترکیبی نوع نشا، نوع تیغه، زاویه تمایل و زاویه اریب بر بیشینه نیروی ویژه برش را بر اساس مدل مکانیکی ماده مرکب می‌توان این‌گونه تعبیر کرد. بر پایه مدل مکانیکی پیشنهادی می‌توان گفت که با شروع درگیری لبه تیغه با ساقه، الیاف نزدیک‌تر به لبه تیغه تحت فشار و خمش بیشتری قرار می‌گیرند. الیاف نشای گوجه‌فرنگی استحکام کمتر و الیاف نشای بادنجان استحکام بیشتری دارند و در نتیجه خمش بیشتر و تغییر شکل بیشتری را پیش از گسیختگی تحمل می‌کنند. بر اساس این مدل، در انتهای مسیر برش ساقه، تعدادی از الیاف که تعیین‌کننده بیشینه نیروی برش هستند باقی می‌مانند و در انتهای جریان برش به یک‌باره از هم گسیخته می‌شوند و در این لحظه نمودار نیرو بیشترین مقدار را دارد؛ پس از آن، نمودار دچار افت شدید و نهایی خود می‌شود (شکل ۵). این پدیده در تمامی نمودارهای برش مشاهده می‌شود. از این‌رو می‌توان گفت که بیشینه نیروی ویژه برش به تعداد آوندهای باقیمانده در انتهای جریان برش بستگی دارد. برابر نتایج به‌دست آمده، بیشینه نیروی ویژه برش نشای گوجه‌فرنگی برای تیغه‌های جراحی و ریش‌تراش با تغییر زاویه تمایل و اریب تغییرات چندانی نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر به دلیل تیزی تیغه‌ها، الیاف نزدیک به لبه تیغه سریعاً و با خمش کم بریده می‌شوند و

در انتهای ساقه جمع نمی‌شوند. اما در مورد تیغه موکت‌بری، از آنجا که نیاز به نیروی بیشتری برای برش الیاف ساقه گوجه‌فرنگی است، تعداد بیشتری از الیاف در انتهای مسیر برش در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و در نتیجه نیروی بیشینه برش با افزایش زاویه‌های برش افزایش می‌یابد. در عین حال، در نشای بادنجان که استحکام الیاف آن بیشتر است، هر سه تیغه رفتار یکسانی دارند و الیاف خمش بیشتری را تحمل می‌کنند. افزایش زاویه اریب به ۴۵ و ۷۰ درجه همزمان با افزایش زاویه تمایل تیغه به ۳۰ درجه، موجب می‌شود که تیغه برای برش ساقه طول بیشتری طی کند در نتیجه تعداد کمتری از الیاف در انتهای ساقه جمع شوند و بیشینه نیروی ویژه برش کاهش می‌یابد.

#### انرژی ویژه برش

محدوده تغییرات انرژی ویژه برش در تمامی سطوح متغیرهای مستقل برای دو نشای بادنجان و گوجه‌فرنگی به ترتیب ۰/۵ تا ۵ و ۰/۲ تا ۳ میلی‌ژول بر میلی‌متر مربع به‌دست آمد. تأثیر نوع تیغه بر انرژی ویژه برش در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و مطابق با انتظار می‌بینیم تیغه‌های با ضخامت کمتر به انرژی ویژه برش کمتری نیاز دارند. انرژی ویژه برش مورد نیاز برای برش ساقه دو نشا با تیغه جراحی و تیغه موکت‌بری تقریباً دو و سه برابر انرژی ویژه برش مورد نیاز برای برش با تیغه ریش‌تراش است (شکل ۸). افزایش زاویه تمایل در نشای بادنجان تأثیر معنی‌داری بر انرژی ویژه برش تیغه‌های جراحی و موکت‌بری نداشته ولی باعث شده است تا انرژی برش به نصف مقداری برسد که با کاربرد تیغه ریش‌تراش به آن نیاز بود (جدول ۴). افزایش زاویه اریب به محدوده ۷۰ درجه در نشای گوجه‌فرنگی تنها در تیغه موکت‌بری باعث افزایش معنی‌دار انرژی ویژه برش شده ولی در بقیه تیغه‌ها این عامل تأثیر معنی‌داری بر انرژی ویژه برش نداشته است.



شکل ۸- انرژی ویژه برش دو نشای بادنجان و گوجه‌فرنگی برای سه نوع تیغه برش

گزارش‌ها نشان می‌دهد با افزایش زاویه تمایل تیغه دندان‌اره‌ای از صفر تا ۶۰ درجه، انرژی ویژه برش ساقه نیشکر کاهش می‌یابد (Mathanker *et al.*, 2015). هر دو زاویه اریب و تمایل بر انرژی ویژه برش ساقه ذرت تأثیر معنی‌داری داشته‌اند. روند تغییرات انرژی ویژه برش با افزایش این دو عامل مستقل نزولی و بعداً صعودی می‌شود به گونه‌ای که یک نقطه کمینه انرژی ویژه به دست آمده است. نقطه کمینه انرژی ویژه در زاویه‌های تمایل و اریب ۳۲ و ۵۵ درجه دیده شده است (Prasad & Gupta, 1975). کاهش شدید انرژی ویژه بر ساقه ذرت در زاویه اریب ۹۰- به یک دهم، نسبت به انرژی ویژه بر ساقه ذرت در زاویه اریب صفر- به دلیل موازی شدن تیغه برش با رشته‌های آوندی است. کاربرد این زاویه اریب که به موازات آوندها و نه در جهت قطع ساقه است، برای قطعه قطعه کردن ساقه به منظور تعلیف دام است (Igathinathane *et al.*, 2010). در تیغه‌های لبه‌صاف، افزایش زاویه تمایل تأثیر کمی بر انرژی برش ساقه با ضد تیغه می‌گذارد. ولی در تیغه‌های لبه‌مضرس، افزایش ۳۰ درصد در انرژی برش تیغه مضرس با افزایش زاویه تمایل از صفر تا ۴۵ درجه گزارش شده است (Persson, 1987). نوع تیغه تعیین‌کننده اثرگذاری زاویه‌های مورد نظر است. همان‌گونه که در این آزمایش اثر

زاویه‌ها برای تیغه جراحی بر انرژی برش معنی‌دار نشد ولی در تیغه موکت‌بری و ریش‌تراش تأثیرگذار بود. تیغه‌های لبه‌صاف و لبه‌مضرس نیز رفتار متفاوتی در گزارش‌ها نشان داده‌اند. عامل موثر دیگر که در مقایسه نتایج باید مد نظر قرار بگیرد، نوع برش و فرآیند برش است. دو نتیجه گزارش شده اول برش به صورت ضربه‌ای بوده و ضد تیغه وجود ندارد و بخشی از انرژی صرف شتاب دادن به گیاه و غلبه بر نیروی اینرسی آن پس از برش می‌شود. در حالی که در دو تحقیق بعدی و همچنین آزمایش پژوهش حاضر، از برش تیغه و ضد تیغه استفاده شده و عامل اینرسی در محاسبه انرژی ویژه برش دخیل نیست.

برابر نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در مورد انرژی ویژه برش، نوع تیغه اثرگذارترین عامل بر انرژی ویژه برش بوده است و اثر زاویه‌های اریب و تمایل در محدوده مورد آزمایش فقط در برخی موارد بر انرژی ویژه برش تأثیر معنی‌داری داشته‌اند. برای تیغه جراحی، چه در نشای گوجه‌فرنگی و چه در نشای بادنجان، تغییر زاویه اریب و زاویه تمایل تأثیر معنی‌داری بر انرژی ویژه برش نداشته است. یعنی به‌رغم اینکه با افزایش زاویه اریب به ۷۰ درجه، سطح واقعی برش (و نه سطح مورد استفاده در بی‌بعدسازی) سه برابر می‌شد و با افزایش زاویه تمایل به

برش و انرژی ویژه برش بررسی و میزان اثرگذاری عوامل مورد بررسی بر این دو مشخصه برش (بیشینه نیرو و انرژی) گزارش شد. استفاده از این داده‌ها به‌عنوان پارامترهای مورد نیاز در طراحی ماشین‌ها و ربات‌های پیوندن و طراحی ابزارهای دستی پیوند نشای سبزی‌ها می‌تواند یکی از مهم‌ترین کاربردهای این مجموعه داده‌ها باشد. انرژی لازم برای راه‌اندازی مکانیزم برش این‌گونه از ماشین‌ها از مجموع انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک و اینرسی مکانیزم‌های آن به علاوه انرژی لازم برای برش ساقه نشا به دست می‌آید. این مقدار، تعیین‌کننده مقادیر کمینه نیرو و توان لازم عملگر برای راه‌اندازی مکانیزم برش است. یکی از روش‌های پیوندنی با ربات، پیوندن به‌طور مستقیم درون سینی نشای پایه<sup>۱</sup> است (Suzuki *et al.*, 1998). در این روش پیوندنی، فضایی کوچک برای نصب مکانیزم‌ها باقی می‌ماند، از این‌رو مقدار بیشینه این نیرو تعیین‌کننده کوچک‌ترین ابعاد مکانیزم برش ممکن برای پیوندنی است. در این پژوهش از رایج‌ترین تیغه‌های مورد استفاده در پیوند زدن استفاده شد اما پیشنهاد می‌شود که چنین مطالعه‌ای برای تیغه‌ها با سطوح تیزی مختلف (سطوحی بیش از سه سطح مورد مطالعه در این پژوهش) نیز دنبال شود. بررسی کیفیت سطح برش به کمک ابزارهای دقیق می‌تواند نتایجی مکمل دستاوردهای این تحقیق در اختیار پژوهشگران قرار دهد.

۳۰ درجه که به ترتیب موجب افزایش سطح و طول برش می‌گردند، اما این افزایش همزمان سطح و مسافت برش تأثیر معنی‌داری بر انرژی برش نداشته است. علت اصلی این پدیده را می‌توان در مدل مکانیکی ماده مرکب دنبال کرد. اصلی‌ترین عامل اتلاف انرژی برش، بافت‌های فیبردار درون ساقه هستند و می‌دانیم که این بافت مانند کابل‌هایی به تعداد یکسان در سراسر طول ساقه وجود دارند. زمانی که زاویه اریب تغییر کرده، با اینکه سطح برش افزایش می‌یابد، تعداد کابل تغییر نمی‌کند. بافت‌های زمینه به دلیل استحکام کمتری که دارند و با تغییر زاویه مقدارشان بیشتر می‌شود، چون بخشی کوچک از انرژی برش را مصرف می‌کنند بر کل انرژی برش تأثیر معنی‌داری ندارند. پس در مجموع، انرژی برش که اصلی‌ترین بخش آن صرف برش تعداد مشخصی کابل می‌شود، با تغییر زاویه‌های تمایل و اریب افزایش معنی‌داری پیدا نمی‌کند.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نوع تیغه، زاویه تمایل برش، زاویه اریب و سرعت برش ساقه دو گیاه از خانواده بادنجانیان به‌عنوان گامی مهم در پیوند زدن بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، محدوده تغییرات دو مشخصه مهم برش یعنی بیشینه نیروی ویژه

### مراجع

- Anon. 2014. Statistical Pocket Book. FAO. Available at: <http://www.fao.org>.
- Anon. 2017. Global production of vegetables in 2014 by type (in million metric tons). Available at: <https://www.statista.com>.
- Chattopadhyay, P. S. and Pandey, K. P. 1999. Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi-static deformation. *J. Agric. Eng. Res.* 73(2): 199-206.
- Galedar, M. N., Jafari, A., Mohtasebi, S. S., Tabatabaeefar, A., Sharifi, A., O'Dogherty, M. J., Rafiee, S. and Richard, G. 2008. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems. *Biosyst. Eng.* 101(2): 199-208.

- Igathinathane, C., Womac, A. R. and Sokhansanj, S. 2010. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting. *Biosyst. Eng.* 107(2): 97-106 .
- Ince, A., Uğurluay, S., Güzel, E. and Özcan, M. T. 2005. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue. *Biosyst. Eng.* 92(2): 175-181.
- Kobayashi, K. and Suzuki, M. 1996. Development of grafting robot for cucurbitaceous vegetables (Part 3). *Jap. Agric. Mach.* 58(2): 83-93 .
- Lee, J. M., Kubota, C., Tsao, S. J., Bie, Z., Echevarria, P. H., Morra, L. and Oda, M. 2010. Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. *Sci. Hortic.* 127(2): 93-105.
- Mathanker, S. K., Grift, T. E. and Hansen, A. C. 2015. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems. *Biosyst. Eng.* 133, 64-70.
- Morikawa, S., Nishiura, Y., Fujiura, T. and Takaura, Y. 2004. Development of simple grafting devices for fruit vegetables (Part 1). *Jap. Agric. Mach.* 66(1): 82-89.
- Okoshi, T. Grafted seedling producing device. 2011. Matsuyama-Shi, Assignee. ISEKI & CO., LTD. United States patent office.
- Persson, S. 1987. Mechanics of cutting plant material. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI.
- Prasad, J. and Gupta, C. P. 1975. Mechanical properties of maize stalk as related to harvesting. *J. Agric. Eng. Res.* 20(1): 79-87.
- Suzuki, M., Kobayashi, K., Inooku, K. and Miura, K. 1995. Development of grafting robot for cucurbitaceous vegetables (Part 2). *Jap. Agric. Mach.* 57(3): 103-110.
- Suzuki, M., Sasaya, S. and Kobayashi, K. 1998. Present status of vegetable grafting systems. *Jap. Agric. Res. Q.* 32, 105-112.
- Yiljep, Y. D. and Mohammed, U. S. 2005. Effect of knife velocity on cutting energy and efficiency during impact cutting of sorghum stalk. *Agric. Eng. Int. CIGR J. Manuscript PM 05 004. Vol. VII.*



## **Investigation of the Mechanical Factors Affecting Cutting Resistance of Tomato and Eggplant Seedling Stems at the Grafting Stage**

**M. Lesani, S. Minaei\*, J. Massah and R. Salehi**

\* Corresponding Author: Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: minae@modares.ac.ir

Received: 8 October 2017 2018, Accepted: 26 February 2018

Today, development of vegetable farming is involved with the development of knowledge and equipment for production of grafted plants. This area is classified in the field of biosystems engineering and mechanics of cutting should be investigated as the first steps in this field. In this research, effects of the type of cutting blade, loading rate, oblique angle, and tilt angle were studied on two important parameters in cutting including cutting energy and maximum cutting force of tomato and eggplant seedlings. The results showed that the maximum specific cutting force and the specific cutting energy were in the range of 0.2-5.5 N per millimeter of stem diameter and 0.2-5 mJ per square millimeter of stem cross section, respectively. Statistical analysis of the data revealed that only blade type and oblique angle significantly affected the cutting parameters. Among prevalent blade types in vegetable grafting operations, razor blade requires the minimum cutting force and increasing the blade oblique angle is useful in making a smooth cut.

**Keywords:** Cutting Blade, Cutting Force, Cutting Mechanics, Vegetable Grafting