

## طراحی، ساخت و واسنجی استاتیکی یک حسگر نیرو-گشتاور شش درجه آزادی جهت اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی

صدیقه زهری شیل سر و یوسف عباسپور گیلانده\*\*

\* نگارنده مسئول: دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ص. پ: ۱۷۹،  
تلفن: ۰۴۵۱۵۵۱۲۰۸۱ (۰۴۵۱)، پیام‌نگار: abbaspour@uma.ac.ir  
\*\* به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی  
دانشگاه محقق اردبیلی  
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۳۱

### چکیده

در تحقیق حاضر طراحی، ساخت و واسنجی یک حس‌کننده نیرو-گشتاور شش درجه آزادی برای اندازه‌گیری نیروهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی در سه جهت عمود برهم تا محدوده حداکثر ۵ کیلونیوتن در جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی (Y) و حداکثر ۲/۵ کیلونیوتن در راستای عمود بر جهت حرکت (Z) و در راستای عمود بر سطح زمین (X) و همچنین گشتاورهای ایجاد شده حول محورهای مختصات تا محدوده حداکثر ۵ کیلونیوتن متر حول محور Z و ۲/۵ کیلونیوتن متر حول محور Y و X، مورد بررسی قرار گرفت. برای طراحی سازه از نرم‌افزار Solid Works استفاده شد. تحلیل و توزیع کرنش با استفاده از نرم‌افزار مذکور برای مشخص کردن نقاط گرهی و به منظور کاهش اثر متقابل نیروها و گشتاورها انجام گرفت. عنصر ارتجاعی حسگر از جنس فولاد ۱۰۴۵ (AISI 1045 Steel) از نوع سردکاری شده به طریقه ماشین‌کاری ساخته شد. کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی در نقاط گرهی روی حسگر نصب شدند تا بتوان به طور مستقل کرنش‌های مماسی روی سطح حسگر را اندازه‌گیری کرد. برای جمع‌آوری داده‌ها از یک دیتالاگر قابل برنامه‌نویسی مدل DT800 و یک رایانه استفاده شد. آزمون‌های واسنجی استاتیکی حسگر با استفاده از یک سیستم واسنجی اجرا شد که می‌توانست نیروها و ممان‌ها را در جهات مختلف اعمال کند. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد که منحنی‌های واسنجی خطی هستند و اثر متقابل نیروها و گشتاورها بسیار ناچیز است. همچنین حسگر ساخته شده دقت، حساسیت، قدرت تفکیک و قابلیت تکرار مطلوب را دارد.

### واژه‌های کلیدی

حساسیت، خاک‌ورزی، دیتالاگر، دینامومتر، عنصر ارتجاعی، کرنش‌سنج

### مقدمه

طراحی ادوات از نظر استحکام و مقاومت کافی و تعیین بهترین اشکال و تنظیمات برای ادوات ضروری است (Kepner et al., 1982).

در طراحی حس‌کننده‌های نیرو، طراحی قسمت‌های الاستیک نیروسنج اصلی‌ترین موضوع است. اولین معیار تئوری برای حس‌کننده‌ها بر اساس عدد شرطی<sup>۱</sup> ماتریس سختی نیروسنج مطرح شد (Uchiyama

بخش عمده‌ای از انرژی تراکتور برای به کار انداختن ادوات کشاورزی در مزرعه مصرف می‌شود (Macnab et al., 1977). مطالعه و تجزیه و تحلیل نیروهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی برای تعیین توان کل مورد نیاز به منظور تهیه تراکتور مناسب برای به کار گرفتن ادوات، برقراری اتصال صحیح ادوات با تراکتور،

قاب بیرونی، یک هاب مرکزی و چند بازوست که قاب بیرونی و قاب مرکزی از طریق بازوها به هم متصل می‌شوند. ساختار این نیروسنج مشابه ساختار نیروسنج آستک است با این تفاوت که بین این بازوها و قاب خارجی در محل اتصال یک شکاف وجود دارد.

در حوزه کشاورزی نیز گادوین و همکاران (Godwin et al., 1993) برای اندازه‌گیری نیرو و گشتاور در سه جهت اصلی محورهای مختصاتی مبدلی طراحی کردند. سیستم اندازه‌گیری شامل دو مبدل رینگ هشت وجهی و یک لوله است که به صورت یکپارچه توسط ماشین کاری از فولاد آلیاژی کروم- نیکل- مولیبدن ساخته شده است. دو رینگ انتهایی جهت اتصال مبدل به یک فونداسیون و رینگ دیگر جهت اتصال مبدل به بازوی L شکل برای ارتباط با بازوهای هیدرولیکی جهت اعمال نیرو به مبدل تعبیه شده‌اند.

شنگ و هانگ (Sheng & Hung, 2002) یک نیروسنج شش درجه آزادی را طراحی کرده‌اند. این سازه شامل چهار تیر T شکل است که با تیرها نیروها و گشتاورها را اندازه‌گیری می‌کند. عدد حالت یا عدد شرطی این نیروسنج برابر  $1/54$  است که مقدار مناسبی است و نشان می‌دهد که سازه حساسیت یکنواخت دارد و در اندازه‌گیری نیرو در جهت‌های مختلف به یک صورت عمل می‌کند. پارک و کیم (Park & Kim, 2005) یک نیروسنج شش درجه آزادی را طراحی کرده‌اند که در ربات‌های چنگال‌دار برای تشخیص شیء درون چنگال استفاده می‌شود. اساس کار این نیروسنج بر پایه صفحات موازی و تیرهایی است که ۲۴ کرنش‌سنج روی آنها نصب می‌شود و نیروسنج قادر است به کمک آنها نیروها و گشتاورهای با ظرفیت‌های مشابه و غیرمشابه را اندازه‌گیری کند. در طراحی این نیروسنج خطای تداخل نیز کاهش داده شده است.

(Hakomori, 1985). این معیار در واقع مشخصه‌ای از ایزوتروپ بودن سازه در مقابل اعمال نیرو و گشتاور در شش جهت است و حساسیت یکنواخت سازه را در مقابل مؤلفه‌های مختلف بردار نیرو گشتاور و خطای کمتر در اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. معیارهای حساسیت کرنش‌سنج‌ها، حساسیت نیرویی و حداقل سختی برای ارزیابی تئوری نیروسنج‌ها در سال ۱۹۸۶ مطرح شد (Nakamura et al., 1987).

نیروسنج مالتس کراس (Flatau, 1976) در اوایل دهه ۱۹۷۰ ساخته شد و تقریباً جزء اولین نیروسنج‌هایی است که بر اساس خمش اعضای خود، نیروی وارده را اندازه‌گیری می‌کنند. ساختمان این نیروسنج شامل دو قاب و یک قطعه یک تکه صلیبی شکل است. نیروها و گشتاورها از طریق قاب‌های بالایی و پایینی به صلیب داخلی وارد می‌شوند که منجر به تغییر شکل در کرنش‌سنج‌های متصل شده به نقاط مختلف صلیب می‌شود (Flatau, 1976).

نیروسنج آستک (Anon, 1982) را شرکت آستک در دهه ۱۹۸۰ ساخته است. ساختمان این حسگر از ۳ بازو برای اندازه‌گیری کرنش‌ها تشکیل شده است و برای داشتن حساسیت یکنواخت در جهت‌های مختلف، بال‌های سازه در امتداد قطرهای واسط بین حلقه بیرونی و مرکزی نصب شده‌اند.

نیروسنج اسپلتزر (Spletzer, 1998) شامل یک استوانه تو خالی است که ابتدا و انتهای آن، نسبت به قسمت‌های میانی، دارای ضخامت بیشتری است. می‌توان نیروها و گشتاورهای وارده به این نیروسنج را با نصب کرنش‌سنج‌هایی روی سطح استوانه، به صورت کاملاً مستقل از هم اندازه‌گیری کرد.

نیروسنج مییر (Meyer, 2000) در سال ۲۰۰۰ میلادی به ثبت رسید. ساختمان این نیروسنج شامل یک

گره‌های تنش (کرنش) روی مبدل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و روش اجزای محدود شناسایی شدند که به عنوان مبنایی برای اندازه‌گیری مستقل مؤلفه‌های نیروی افقی و قائم به کار گرفته شدند. دو مؤلفه نیروی وارده بر مبدل به گونه‌ای اندازه‌گیری شد که حداقل مقدار اثر متقابل در اندازه‌گیری این نیروها ایجاد شود.

عباسپور گیلاننده و خان‌رمکی (Abbaspour- Gilandeh & Khanramaki, 2013) برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی دینامومتری طراحی کردند که قادر است نیروها و گشتاورها را در هر سه جهت محور مختصات تا محدوده ۲۰ کیلو نیوتن و ۲۰ کیلو نیوتن‌متر اندازه‌گیری کند. واحد اندازه‌گیری نیرو در این مبدل شامل دو عدد مبدل حلقوی نیرو با ساختار هشت وجهی است که به صورت پشت به پشت با زاویه ۹۰ درجه توسط حلقه‌های واسط به هم متصل‌اند و یک گشتاورسنج لوله‌ای نیز به یکی از این مبدل‌ها پیچ شده است. مبدل‌های حلقوی با ساختار هشت وجهی، نیروهای سه‌گانه و گشتاورهای خمشی وارد بر آنها و گشتاورسنج لوله‌ای گشتاور پیچشی وارد بر واحد اندازه‌گیری را اندازه‌گیری می‌کند.

طی تحقیقات انجام شده در خصوص طراحی و ساخت حسگرهای شش درجه آزادی، همواره دو موضوع مورد توجه بوده است یکی یافتن هندسه مناسب برای سازه حس‌کننده به منظور اندازه‌گیری نیرو و دیگری یافتن معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد مکانیکی سازه‌های حس‌کننده. در طراحی حس‌کننده‌های نیرو، طراحی قسمت‌های الاستیک نیروسنج اصلی‌ترین موضوع است که در ابتدا بر پایه تجربه طراحان و محققان بود و ارزیابی تئوری و مبنایی مقایسه‌ای برای آن وجود نداشت. اغلب حسگرهای شش درجه آزادی توسعه یافته در زمینه‌هایی چون علوم بیومکانیک و علوم رباتیک به کار رفته بودند؛ این نوع حسگرها جهت اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارد

گوکانگ (Goo Kang, 2005) به بررسی ساختار بدنه و ساختار الکترونیکی یک حسگر شش درجه آزادی پرداخته است. او معتقد است خطای موجود در کارکرد سنسورهای شش درجه آزادی بستگی دارد به خطای ساختاری با توجه به ساختار عضو الاستیک و عدم دقت در بدنه سنسور و همچنین بستگی دارد به خطای موجود در اندازه‌گیری و استخراج اطلاعات مربوط به نیروها و گشتاورهای اعمالی. بر این اساس، او ساختاری طراحی کرد که شامل دو عضو الاستیک سوراخ‌دار است که به صورت صلیبی قرار گرفته‌اند و این امر باعث بهبود خطای ساختاری شده است و برای کم کردن خطاهای الکترونیکی نیز تمام ولتاژهای آنالوگ به دست آمده از کرنش‌سنج‌ها را ابتدا به ولتاژهای دیجیتال تبدیل کرده و سپس سیگنال‌های دیجیتال را در رایانه مورد پردازش قرار داده است.

لطفی و همکاران (Lotfi et al., 2007) یک نوع دینامومتر نوع قابی را طراحی و ارزیابی کردند. در این دینامومتر اندازه‌گیری نیروهای وارده به دینامومتر با استفاده از سه لودسل مجزا امکان‌پذیر است که روی قابی است با قابلیت نصب روی اتصال سه‌نقطه تراکتور. واسنجی‌ها نشان داد که یک رابطه خطی با ضریب همبستگی بالایی بین نیروهای اعمال شده و ولتاژ خروجی پل‌ها وجود دارد. اثر هیستریزیس بین بارگذاری و باربرداری خیلی کم است. این دینامومتر توانست فقط نیروی افقی را با دقت اندازه‌گیری کند. دلیل اصلی این امر، یکسان نبودن ابعاد مبدل‌های نیرو و حساسیت دو جانبه بالا برای بارهای عمودی و حساسیت کم برای نیروهای جانبی بود.

عباسپور گیلاننده و حقیقت شیشوان (Abbaspour- Gilandeh & Haghghat-Shishvan, 2011) یک مبدل رینگ‌ی نیرو با ساختار هشت وجهی طراحی کردند که قادر است عکس‌العمل‌های وارد از طرف ادوات بر تراکتور را در دو جهت اندازه‌گیری کند. در این مبدل تعدادی از

ترتیب ۵ کیلو نیوتن و ۵ کیلو نیوتن متر در نظر گرفته شد زیرا همواره بخش اعظمی از نیروها و گشتاورها در دو جهت گفته شده به ادوات وارد می‌شود و نیروها در جهت X و Z به مقدار ۲/۵ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد و گشتاورها حول محور عمود بر سطح زمین (X) و حول محور Y به مقدار ۲/۵ کیلو نیوتن متر در نظر گرفته شد. جهت محورهای مختصاتی که در این پژوهش در نظر گرفته شده است در شکل ۱ مشخص شده است.

### مشخصات بدنه حسگر

اساس طراحی این حسگر، تیرهای یک سر درگیر است. در این سازه جهت افزایش حساسیت اندازه‌گیری، محل نصب کرنش‌سنج‌ها توخالی در نظر گرفته می‌شود تا سطح مقطع محل نصب کرنش‌سنج‌ها کم شود و کرنش‌ها در این نقاط افزایش یابد. با توجه به

۲، بلوک‌های ۱ و ۲ شامل چهار عدد تیر با ضخامت ۷ و طول و عرض به ترتیب ۲۰ و ۷۰ میلی‌متر هستند و برای اندازه‌گیری گشتاورها در راستای Z در نظر گرفته شده‌اند و بلوک ۳ شامل دو عدد تیر با ضخامت ۲۲ و طول و عرض به ترتیب ۱۶ و ۳۸ میلی‌متر است که برای اندازه‌گیری نیروها در جهت Z به کار می‌رود. بلوک‌های ۴ و ۵ نیز در کل شامل چهار عدد تیر با ضخامت ۲۰ میلی‌متر هستند و طول و عرض آن‌ها به ترتیب ۲۸ و ۳۸ میلی‌متر است و برای اندازه‌گیری گشتاورها در جهت Y و نیروها در جهت X به کار می‌روند. بلوک‌های ۶ و ۷ نیز که شامل چهار عدد تیر با ضخامت ۱۷ و طول و عرض به ترتیب ۲۰ و ۳۸ میلی‌متر هستند که برای اندازه‌گیری گشتاورها در جهت X و نیروها در جهت Y در نظر گرفته شده‌اند.

طراحی سازه به نحوی صورت گرفته است که بدنه نسبت به محورهای X و Y کاملاً قرینه است و سازه در جهت X دارای ارتفاع ۱۷۳، در جهت Y دارای عرض ۱۸۸ و در جهت Z دارای طول ۳۱۶ میلی‌متر است؛ وزن کل سازه ۹۹۳۴ گرم است.

بر ادوات خاک‌ورزی بسیار محدود، دارای ساختار پیچیده و گران و در برخی موارد ساخت آن بسیار مشکل بود، از این رو هدف اصلی از اجرای این پژوهش طراحی، ساخت و واسنجی استاتیکی یک حسگر نیرو-گشتاور شش درجه آزادی جهت اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی است که با ساختار ساده و متکی بر اصول ساده طراحی بتواند نیروها و گشتاورهای مورد نظر را با دقت قابل قبول اندازه‌گیری کند.

### مواد و روش‌ها

#### طراحی و ساخت حسگر شش محوره نیرو گشتاور

پیش از شرح مراحل طراحی سازه لازم است به این نکته اشاره شود که این حسگر برای اندازه‌گیری نیروهایی به اندازه  $\frac{1}{4}$  نیروهای واقعی طراحی شده است. زیرا این حسگر برای نصب روی مخزن خاک موجود در دانشگاه محقق اردبیلی طراحی و ساخته شده که این مخزن و تمامی ضوابط نصب شده روی آن در ابعاد  $\frac{1}{4}$  ابعاد واقعی ساخته شده‌اند.

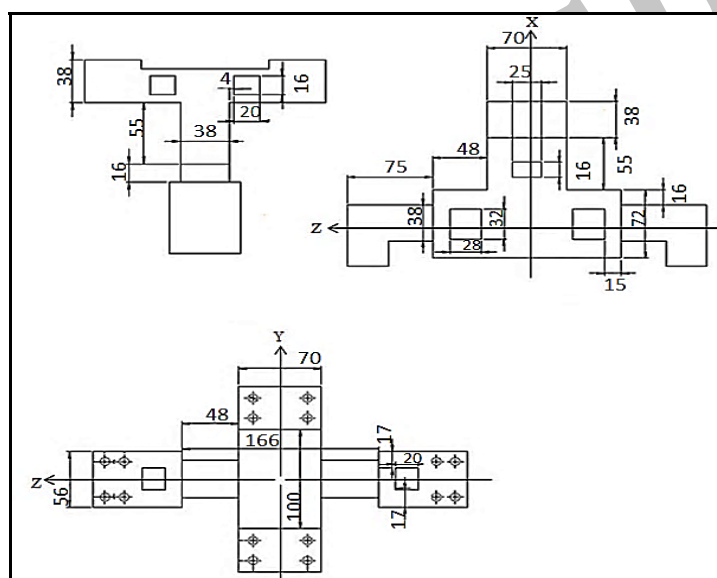
#### تعیین بارهای طراحی

با توجه به گستره‌های مختلفی از خاک‌های کشاورزی و تأثیر پارامترهای مختلف بر بارهای وارد بر ادوات خاک‌ورزی متصل به حسگر، اندازه‌گیری دقیق نیروها و گشتاورها به سختی امکان‌پذیر است. عباسپور گیلاننده و خان‌رمکی & Abbaspour-Gilandeh (2013, Khanramaki)، در پژوهش خود برای ساخت دینامومتر طراحی شده در زمینه ادوات کشاورزی از حداکثر نیرو و گشتاور به ترتیب ۲۰ کیلو نیوتن و ۲۰ کیلو نیوتن متر استفاده کردند. با توجه به اینکه حسگر برای  $\frac{1}{4}$  نیروها و گشتاورها طراحی شده، بنابراین حداکثر نیروی اعمالی به حسگر در جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی (Y) و گشتاور حول محور عمود بر جهت حرکت (Z) به

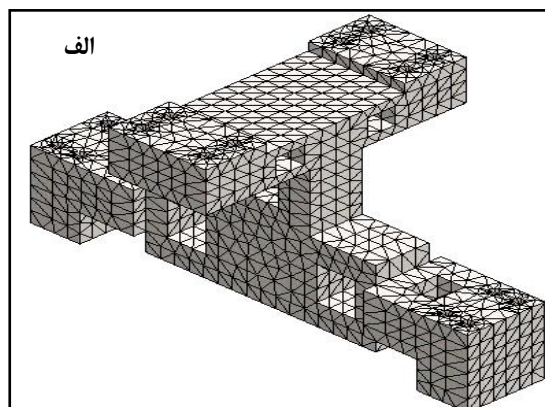
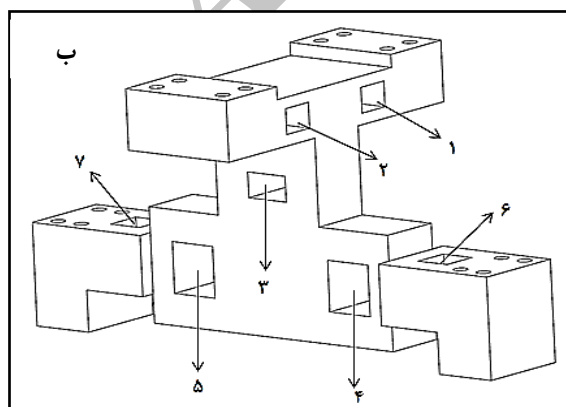
مشخص شدن نتایج این تحلیل، بهترین ابعاد از نظر معیارهای طراحی، به دست آمد.

طراحی حسگر با فولاد ۱۰۴۵ (AISI 1045 Steel) از نوع سردکاری شده صورت گرفت و مش بندی با استفاده از Solid Mesh و با المان چهار نقطه و اندازه المان ۱۰/۵ و تولرانس ۰/۵ میلی متر صورت گرفت. در شکل ۲، نمای سازه حسگر طراحی شده در نرم افزار پس از مش بندی و شماره بلوک های در نظر گرفته شده روی سازه نمایش داده شده است.

برای طراحی و تجزیه و تحلیل تنش ها و کرنش های وارد بر حسگر، از نرم افزار SolidWorks 2013 استفاده شد. برای رسیدن به ابعاد ایده آل، طراحی مکرراً در محیط Part نرم افزار با ابعاد مختلف صورت گرفت و پس از هر بار طراحی در محیط Simulation نرم افزار تحلیل شد تا مشخص شود که آیا ملاک های لازم را برای ساخته شدن دارد یا نه، ملاک هایی مانند: حساسیت کافی در برابر نیروهای کم، مقاومت بالا در برابر بیشینه بار مورد نظر، نداشتن تداخل نیرویی در جهات مختلف و غیره. پس از



شکل ۱- نقشه سه نمای حسگر و جهت محورهای مختصات (ابعاد بر حسب میلی متر)



شکل ۲- تصویر سازه طراحی شده در نرم افزار (الف) نمایش سازه مش بندی شده در نرم افزار Solid Works و (ب) نمایش بلوک های ایجاد شده در سازه

## انتخاب کرنش سنج با ویژگی مناسب برای ساخت حسگر

برای آنکه بتوان مناسب‌ترین انتخاب را در بین کرنش‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها داشت، لازم بود ابتدا میزان بیشترین کرنش‌ها را در نقاط تعیین شده روی بدنه حسگر بررسی کرد. برای یافتن این بیشینه کرنش‌ها از تحلیل سازه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Solid Works کمک گرفته شد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین کرنش در نقاط تعیین شده برای نصب کرنش‌سنج‌ها تقریباً برابر ۱۲۰۰ میکرو کرنش است. بیشینه کرنشی را که می‌توان با استفاده از یک کرنش‌سنج الکتریکی اندازه‌گیری کرد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Figliola & Beasley, 2010):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{S_g} \quad (1)$$

که در آن،

$\varepsilon$  = کرنش قابل تحمل کرنش‌سنج؛  $\Delta R$  = تغییرات مقاومت کرنش‌سنج؛  $R$  = مقاومت کرنش‌سنج؛ و  $S_g$  = ضریب کرنش سنج می‌باشد.

بنابراین از کرنش‌سنج مدل FLA-3-11-1L که مربوط به کمپانی TML ژاپن است برای نصب روی بدنه سازه حسگر استفاده شد که بیشترین کرنش قابل اندازه‌گیری با آن برابر ۱۵۰۰ میکرو کرنش است.

### تعیین مکان نصب کرنش‌سنج‌ها روی بدنه حسگر

- اساس کار اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها در حسگر در هر مدار پل وتستون (شکل ۳- الف) برای آنکه مقدار خطا به حداقل برسد، لازم است تا کرنش‌سنج‌های فرد (۱ و ۳) همزمان تحت کشش یا همزمان تحت فشار باشند و کرنش‌سنج‌های زوج (۲ و ۴) به همان شیوه اما به

عکس کرنش‌سنج‌های فرد باشند یعنی در شکل ۳- الف، اگر کرنش‌سنج‌های ۱ و ۳ تحت کشش باشند لازم است تا کرنش‌سنج‌های ۲ و ۴ تحت فشار باشند و بر عکس. بر این اساس می‌توان برای هر نیرو و گشتاور وارده، بلوک مخصوص آن را تعریف کرد که به شرح زیر است.

نیروی  $F_x$ : بلوک‌های ۴ و ۵ برای اندازه‌گیری نیروی  $F_x$  به کار می‌روند. مطابق شکل ۲، مشاهده می‌شود که این بلوک‌ها نسبت به محور X قرینه هستند لذا هنگامی که نیرو در جهت X به سازه وارد می‌شود؛ تیرهای ۴a و ۵a کشیده و تیرهای ۴b و ۵b فشرده می‌شوند، یا برعکس (شکل ۴). با توجه به توضیحی که داده شد می‌توان نتیجه گرفت که این بلوک‌ها برای نصب چهار کرنش‌سنج به کار برده شده برای مدار پل وتستون نیروی  $F_x$  مناسب هستند.

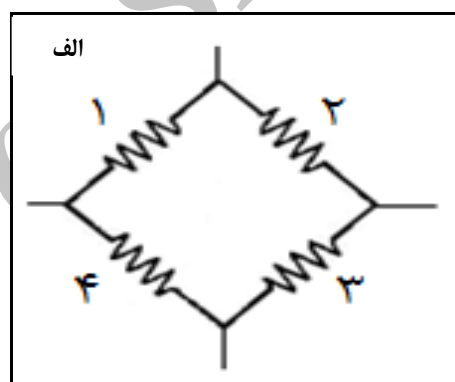
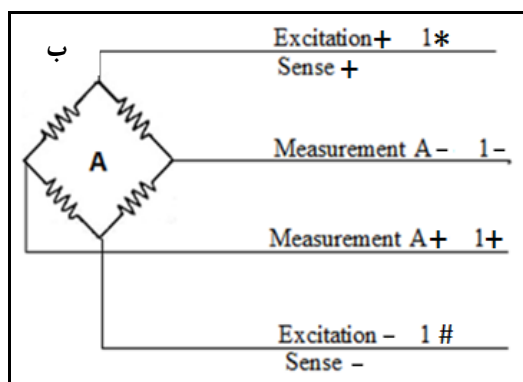
نیروی  $F_y$ : برای این نیرو، بلوک‌های ۶ و ۷ در نظر گرفته شده‌اند زیرا مطابق شکل ۲، نسبت به محور Y قرینه هستند و آنچه برای نیروی  $F_x$  گفته شد در این بلوک‌ها نیز نسبت به محور Y صدق خواهد کرد و مطابق شکل ۴، تیرهای ۶a و ۷a تحت کشش و تیرهای ۶b و ۷b تحت فشار خواهند بود، یا برعکس.

نیروی  $F_z$ : مطابق آنچه از پیش تعیین شده، برای این نیرو بلوک ۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که دو تیر این بلوک نسبت به محور Z قرینه هستند و تحت نیروی Z یکی از تیرهای ۳a و ۳b تحت کشش و تیر دیگر تحت فشار قرار می‌گیرد لذا روی هر یک از این دو تیر دو کرنش‌سنج مربوط به مدار پل وتستون نیروی  $F_z$  نصب می‌شود.

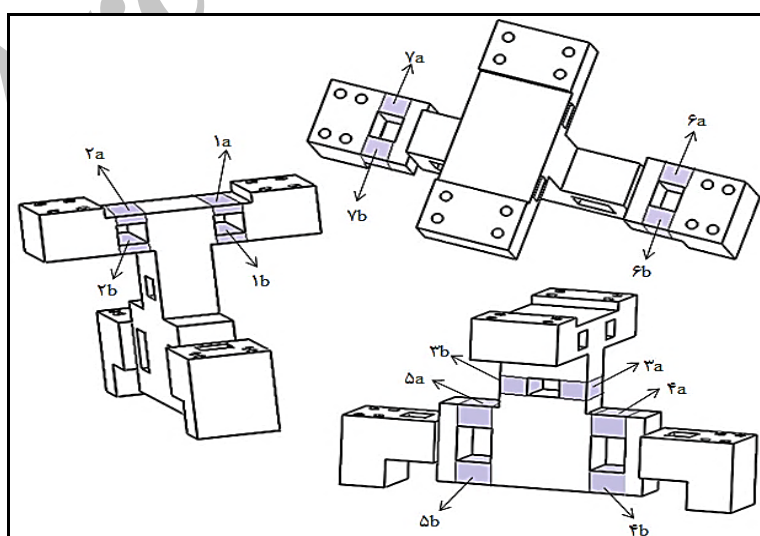
گشتاور  $M_x$ : برای گشتاور  $M_x$  بلوک‌های ۶ و ۷ در نظر گرفته شده‌اند. مطابق شکل ۴، اگر این بلوک‌ها حول محور X تحت گشتاور قرار گیرند؛ تیرهای ۶a و ۷b تحت کشش و تیرهای ۶b و ۷a تحت فشار قرار می‌گیرند و بر

گشتاور  $M_Z$ : آخرین بخشی که برای مکان نصب کرنش سنج‌ها مربوط به نیروها و گشتاورها لازم است بیان شود مربوط به انتخاب بلوک و تیرهای موجود در روی حسگر، برای اندازه‌گیری این گشتاور بلوک‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند زیرا حول محور  $Z$  قرینه‌اند و مطابق شکل ۴ اگر گشتاوری حول این محور وارد شود، تیرهای ۱a و ۲b تحت کشش و تیرهای ۱b و ۲a تحت فشار قرار می‌گیرند، و برعکس؛ و می‌توان از آنها برای نصب کرنش سنج‌های مربوط به این گشتاور استفاده کرد.

عکس، لذا می‌توان از این تیرها برای چسباندن کرنش سنج‌های مدار پل وتستون گشتاور  $M_X$  استفاده کرد. گشتاور  $M_Y$ : با توجه به گفته‌های قبلی، می‌دانیم که بلوک‌های ۴ و ۵ برای گشتاور  $M_Y$  به کار می‌روند زیرا این بلوک‌ها نسبت به محور  $Y$  قرینه‌اند و اگر گشتاوری حول محور  $Y$  به آنها وارد گردد تیرهای ۴a و ۵b تحت کشش و تیرهای دیگر تحت فشار قرار می‌گیرند، و برعکس. از آنچه برای این دو بلوک تحت گشتاور حول محور  $Y$  بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که این بلوک‌ها برای نصب کرنش سنج‌های مدار پل وتستون  $M_Y$  مناسب هستند.



شکل ۳- (الف) مدار پل وتستون و (ب) نقشه پل وتستون و کانال مرتبط آن در نرم‌افزار دیتالاگر



شکل ۴- نمایش مکان و نام هر یک از تیرها

انتهای هر تیر از نظر طولی و در وسط هر تیر از نظر عرضی ایجاد می‌شود؛ از این رو مکان نصب کرنش‌سنج‌ها در تمامی تیرها با فاصله‌ای برابر ۱/۵ میلی‌متر از انتهای هر تیر در جهت طولی و در وسط هر تیر در جهت عرضی تعیین شد. شکل ۵ مکان نصب کرنش‌سنج‌ها را به صورت نمایشی نشان می‌دهد.

### نحوهٔ حصول داده‌های به دست آمده از حسگر

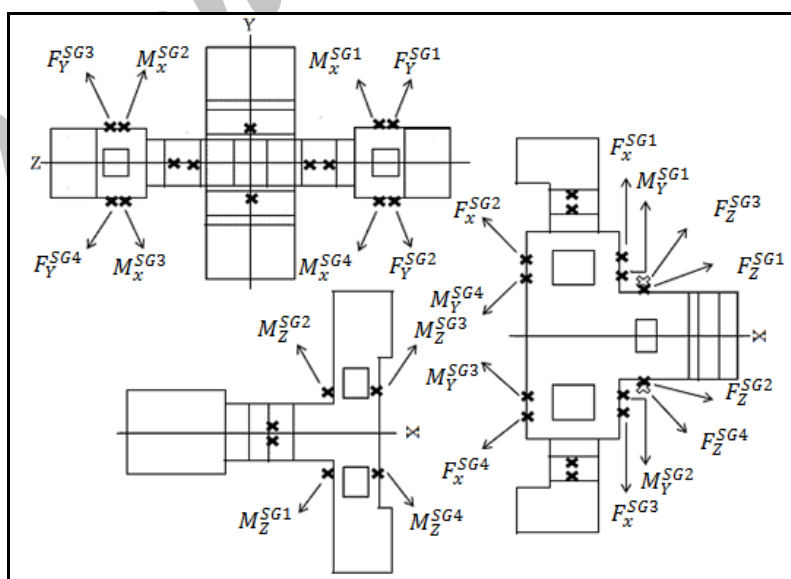
در مواردی که نیاز است تا چندین کمیت همزمان اندازه‌گیری شوند؛ باید از ابزار ثبت دادهٔ چند کاناله استفاده کرد. در چنین مواردی عمدتاً می‌توان از دیتالاگرها و سیستم‌های جمع‌آوری داده استفاده نمود. در این تحقیق برای استخراج داده‌های حاصل از مدارات پل وتستونی، که از طریق کرنش‌سنج‌ها به حسگر متصل‌اند، از یک دیتالاگر مدل DT800، ساخت شرکت Data Taker با قابلیت برنامه‌نویسی استفاده شد.

### تعیین تیرها و بلوک‌های مربوط به چهار کرنش‌سنج هر مدار پل وتستون

با توجه به آنچه که در بخش بالایی تعریف شد می‌توان هر یک از تیرها را برای نصب یک یا دو کرنش‌سنج در نظر گرفت. در جدول ۱ شماره هر تیر و کرنش‌سنج‌هایی که روی آن نصب می‌شود آورده شده است. در این جدول برای مثال عبارت  $F_x^{SG1}$ ، به معنای اولین کرنش‌سنج به کار رفته در مدار پل وتستون مربوط به اندازه‌گیری نیرو در جهت X و عبارت  $M_y^{SG2}$  نیز به معنای دومین کرنش‌سنج به کار رفته در مدار پل وتستون مربوط به اندازه‌گیری گشتاور در جهت Y است.

### محل نصب کرنش‌سنج‌ها روی تیر

حسگر طراحی شده بر اساس تیرهای یک سر گیردار عمل می‌کند؛ از این رو اساس تعیین مکان نصب کرنش‌سنج‌ها را نیز باید بر اساس رفتار تیرها تعریف کنیم. می‌دانیم همواره بیشترین کرنش در نقطه‌ای نزدیک به



شکل ۵- نمایش مکان نصب کرنش‌سنج‌ها



جدول ۱- تعیین مکان نصب کرنش سنج‌ها روی تیرها

شماره هر کرنش سنج	شماره هر تیر	
$F_x^{SG1}$	۴a	نیروی $F_x$
$F_x^{SG2}$	۴b	
$F_x^{SG3}$	۵a	
$F_x^{SG4}$	۵b	
$F_y^{SG1}$	۶a	نیروی $F_y$
$F_y^{SG2}$	۶b	
$F_y^{SG3}$	۷a	
$F_y^{SG4}$	۷b	
$F_z^{SG1}$	۳a	نیروی $F_z$
$F_z^{SG2}$	۳b	
$F_z^{SG3}$	۳a	
$F_z^{SG4}$	۳b	
$M_x^{SG1}$	۶a	گشتاور $M_x$
$M_x^{SG2}$	۷a	
$M_x^{SG3}$	۷b	
$M_x^{SG4}$	۶b	
$M_y^{SG1}$	۴a	گشتاور $M_x$
$M_y^{SG2}$	۵a	
$M_y^{SG3}$	۵b	
$M_y^{SG4}$	۴b	
$M_z^{SG1}$	۱a	گشتاور $M_x$
$M_z^{SG2}$	۲a	
$M_z^{SG3}$	۲b	
$M_z^{SG4}$	۱b	

ابعاد با دقت بالا تعیین شود با استفاده از دستگاه وایرکات، قسمت‌های توخالی برش داده شد. استفاده از دستگاه وایرکات علاوه بر بالا بردن دقت ساخت، باعث می‌شود که تنش‌های پسماند کمتری نیز در قطعه ایجاد شود. جدول ۲ مشخصات ماده به کار رفته شده برای ساخت سازه حسگر را نشان می‌دهد.

نحوه ساخت حسگر شش درجه آزادی نیرو-گشتاور ابتدا با توجه به ابعاد نهایی به دست آمده از نتایج بهینه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار Solid Works، بلوک فولادی از جنس فولاد ۱۰۴۵ سردکاری شده به ابعاد ۱۷۳×۱۸۸×۳۱۶ میلی‌متر ماشین‌کاری شد سپس به دلیل اینکه نیاز بود در ساخت این سازه

جدول ۲- مشخصات فولاد ۱۰۴۵ سردکاری شده

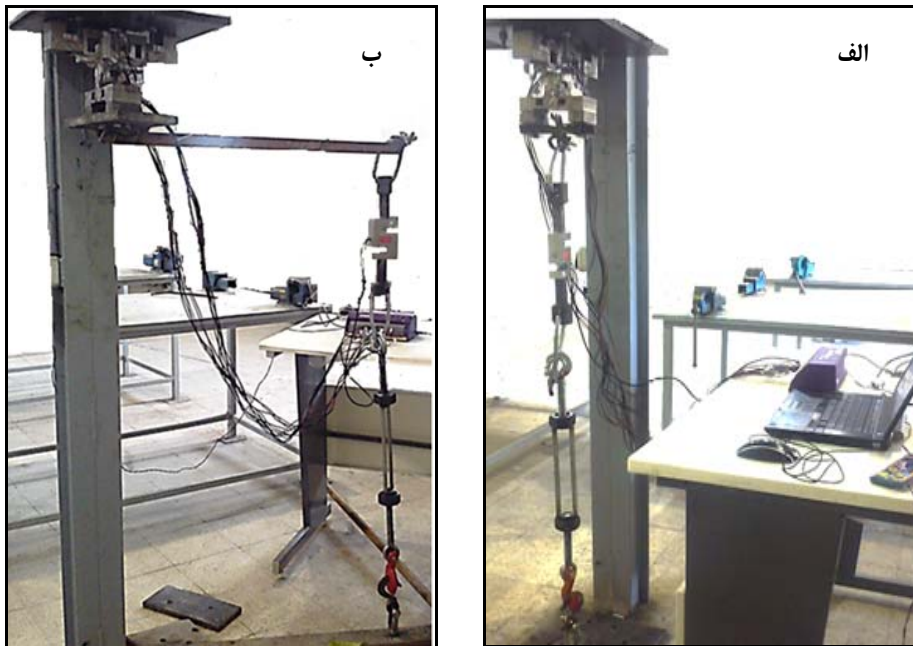
ویژگی ماده	مقدار	واحد
مدول یانگ	۲/۰۵e+۰۱۱	نیوتن بر متر مربع
نسبت پواسن	۰/۲۹	-
چگالی	۷۸۵۰	کیلوگرم بر متر مکعب
تنش تسلیم	۵۳۰۰۰۰۰۰	نیوتن بر متر مربع

### نحوه واسنجی حسگر

واسنجی به معنای تعیین صحت با اندازه‌گیری در مطابقت با مرجع تایید شده است. اهداف اصلی واسنجی، اطمینان از قرائت‌های دستگاه و تعیین درستی مقادیر خوانده شده از دستگاه است. واسنجی لودسل‌ها از طریق اعمال بارهای استاندارد بر لودسل با وزنه‌های استاندارد و یا سیستم‌های اندازه‌گیری استاندارد با دقت قابل قبول می‌باشد (Figliola & Beasley, 2010). در این تحقیق واسنجی لودسل با اعمال وزنه‌های استاندارد از طریق یک لودسل دقیق صورت گرفت (Abbaspour-Gilandeh & Haghightat-Shishvan, 2011; Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013). در واسنجی حسگر باید توجه کرد که حساسیت در حسگر کافی است یعنی نسبت خروجی به ورودی در آنها به اندازه کافی باشد. آنچه در این تحقیق در طراحی حسگر مد نظر قرار گرفت، توانایی حسگر برای تولید خروجی کافی برای اندازه‌گیری حداقل مقدار بار وارده در تمامی جهات به مقدار ۱ کیلوگرم بود. همچنین حسگر باید دارای مقادیر پسماند کمینه باشد و نمودار واسنجی خطی شود یعنی ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) نزدیک به یک شود، حسگر قابلیت تکرارپذیری داشته باشد و خروجی داده‌ها در تکرارهای یکسان نیرو و گشتاور یکی

باشد. برای این کار می‌توان در شرایط آزمایشگاهی ابتدا نیروسنج را روی یک ستون ثابت به ترتیب در سه جهت X و Y و Z قرار داد و سپس با وارد کردن نیروی معلوم توسط یک نیروسنج S شکل (با حداکثر خطای ۰/۱۵ کیلوگرم، قابلیت تکرار ۹۹/۹۷ درصد و پسماند کوچکتر از ۰/۰۳ درصد بر مبنای ماکزیمم مقیاس) دقت نیروها و گشتاورهای مورد نیاز را به نیروسنج اعمال کرد.

به منظور کالیبره کردن هر یک از سه مؤلفه نیرو در حسگر ساخته شده، ابتدا از یک سمت، حسگر در یکی از جهت‌های X و Y و Z به یک ستون از پیش تعبیه شده مطابق شکل ۶ متصل شد پس از آن یک صفحه مقاوم به پایین ستون جوش داده شد و سپس برای اعمال نیرو به حسگر در جهت مورد نظر، از یک پیچ اعمال نیرو دو طرفه استفاده شد به طوری که یک نیروسنج S شکل به صورت سری نسبت به آن پیچ، تعبیه شد تا نیروهای اعمالی به بازو را اندازه‌گیری کند. جهت اتصال نیروسنج به پیچ اعمال نیرو و قلاب نیز، از سیم‌های فلزی محکم و تابیده شده استفاده شد. برای کالیبره کردن سه مؤلفه گشتاور در حسگر نیز همین کار صورت پذیرفت با این تفاوت که سیستم به کار برده شده به جای آنکه به صورت مستقیم به حسگر متصل شود به فاصله یک متر از آن و از طریق یک اهرم به حسگر متصل شد.



شکل ۶- نمای کامل از سیستم واسنجی حسگر: (الف) اعمال نیرو در جهت X، (ب) اعمال گشتاور حول محور Y و (ج) نمایش بخش‌های مختلف سیستم واسنجی حسگر

قرارگیری حسگر شش درجه آزادی در موقعیت‌های مختلف افقی و عمودی روی پایه ثابت است به همین دلیل بهتر است از یک تراز بسیار دقیق برای تعیین سطح افقی استفاده شود. همچنین باید به این نکته دقت شود که داده‌هایی که دیتالاگر در ثبت از پل و تستون کامل نشان می‌دهند نسبت ولتاژ خروجی به ورودی است.

برای اعمال گشتاور می‌توان نیرو را با فاصله یک متری از حسگر و از طریق یک اهرم وارد کرد تا از طریق حاصل ضرب نیرو در فاصله، مقدار گشتاور مورد نیاز تأمین شود و سپس داده‌های حاصل را در دیتالاگر ثبت کرد و با واسنجی، ضرایب هر کدام از جهت‌های نیرو و گشتاور را در برنامه دیتالاگر وارد نمود. البته باید توجه داشت که دقت واسنجی تحت تأثیر مستقیم

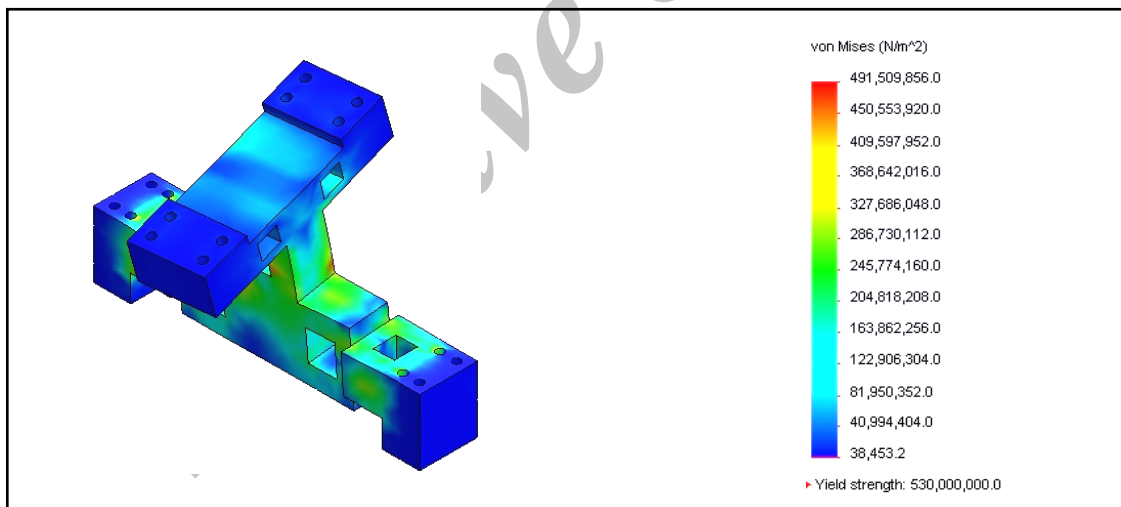
## نتایج و بحث

### تحلیل نرم‌افزاری حسگر، تحت بیشینه نیروها و

#### گشتاورها در هر سه جهت X و Y و Z

یک زوج نیرو<sup>۱</sup> شامل دو نیروی متقابل و موازی ولی غیر متلاقی است. این زوج نیرو ممکن است تمایل به ایجاد دوران حول هر نقطه‌ای در صفحه دو نیرو داشته باشد. بنابراین، گشتاور حالت خاصی است از زوج نیرو که مرکز دوران آن در مسیر یکی از نیروها قرار گرفته است (Kepner et al., 1982). یک خیش راست برگردان عموماً به خودی خود در معرض زوج نیرو قرار می‌گیرد. بالاترین مقدار گزارش شده این زوج نیرو حدود ۲۲۵ نیوتن‌متر است (Kepner et al., 1982). با توجه به آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که در یک وسیله خاک‌ورزی همواره ترکیبی از نیروها و گشتاورها به وجود خواهد آمد و لذا

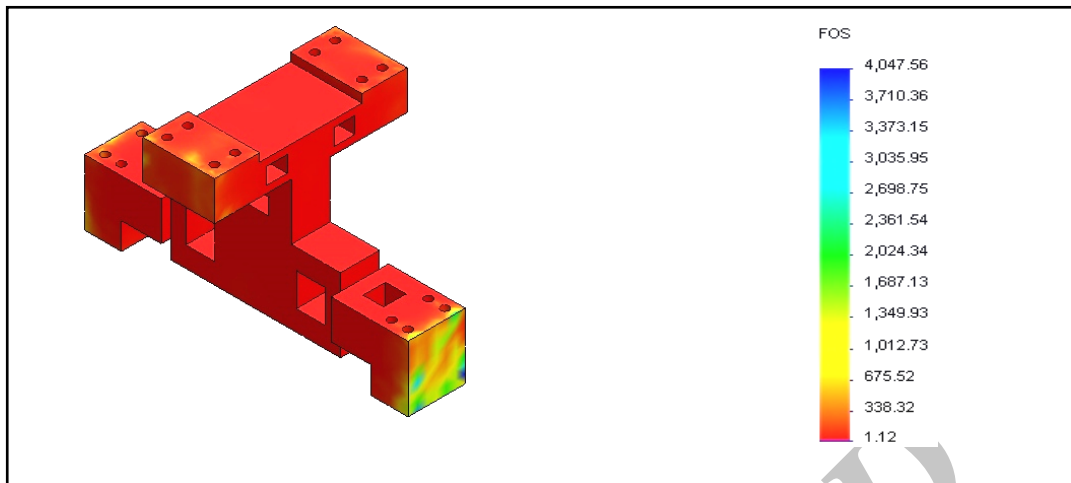
برای ساخت حسگری که قادر باشد این نیروها و گشتاورها را به صورت همزمان اندازه‌گیری کند، لازم است ابتدا در مرحله طراحی به بررسی ترکیب این نیروها پرداخته شود. شکل ۷ مقادیر تنش در نقاط مختلف سازه طراحی شده را با استفاده از نرم‌افزار Solid Works در حالتی نشان می‌دهد که تمامی نیروها و گشتاورها در بیشترین مقدار خود و در هر سه جهت محورهای مختصات به صورت همزمان توسط نرم‌افزار به سازه وارد شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار بیشینه تنش در سازه برابر تقریباً ۴۹۲ مگاپاسکال است که از بیشینه تنش فولاد به کار رفته در قطعه کمتر است. این نتایج بیانگر آن است که سازه طراحی شده در مرحله نرم‌افزاری کاملاً صحیح طراحی شده و سازه در سخت‌ترین شرایط نیز مقاوم است و دچار تنش پلاستیک نمی‌شود.



شکل ۷- تحلیل نرم‌افزاری تنش در حالت اعمال بیشینه نیروها و گشتاورها در هر سه جهت X، Y و Z به سازه

ضریب اطمینان برای این حالت برابر ۱/۱۲ است و از آنجایی که این مقدار بیشتر از یک است می‌توان نتیجه گرفت که طراحی قطعه صحیح است و طراحی نرم‌افزاری امکان ساخته شدن حسگر با اطمینان بالایی را تضمین می‌کند.

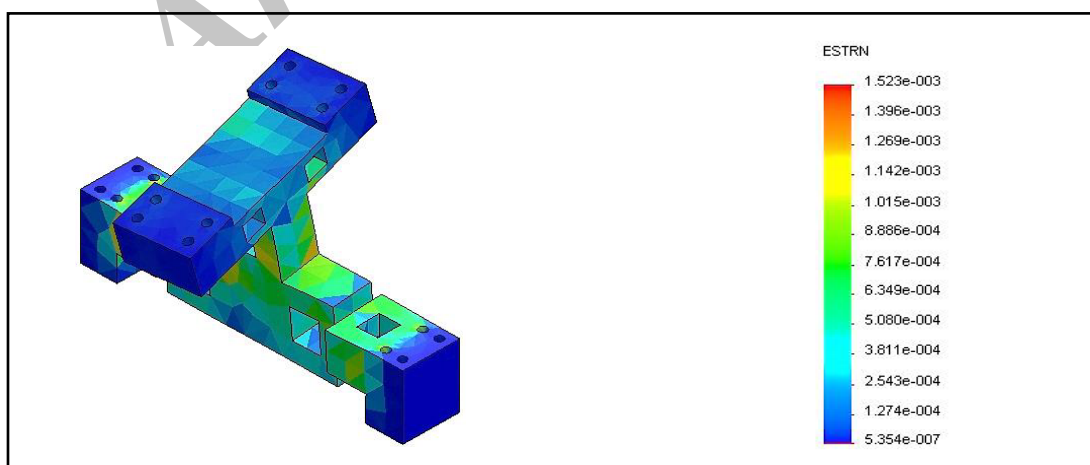
شکل ۸ مقادیر ضریب شکست را برای سازه طراحی شده در نرم‌افزار در حالتی نمایش می‌دهد که تمامی نیروها و گشتاورها در هر سه جهت محورهای مختصات به صورت بیشینه به قطعه وارد شده باشند. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود کمترین مقدار



شکل ۸- تحلیل نرم‌افزاری ضریب شکست در حالت اعمال بیشینه نیروها و گشتاورها در هر سه جهت X، Y و Z به سازه

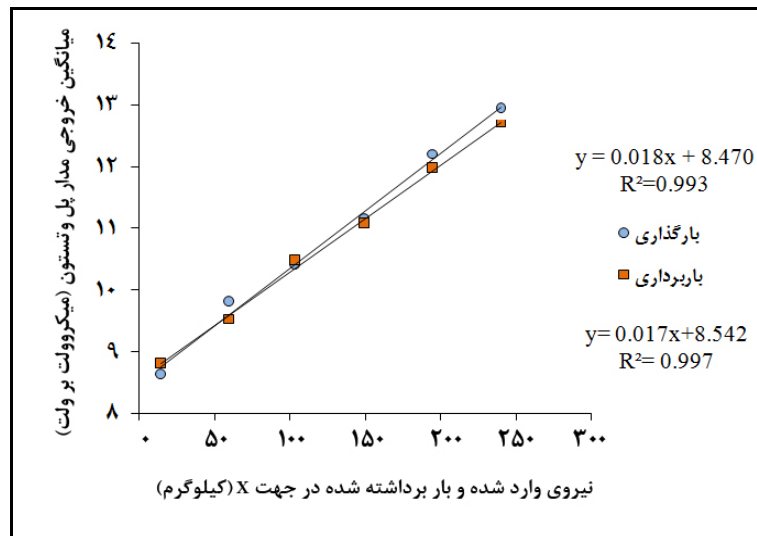
را تحت تأثیر قرار می‌دهد یا خیر. همچنین می‌توان با بررسی کمینه و بیشینه مقدار کرنش ایجاد شده در مکان‌های گرهی، تحت اعمال تمام نیروها و گشتاورها به صورت مجزا و همزمان، مناسب‌ترین مدل کرنش‌سنج را برای استفاده و چسباندن به سازه انتخاب کرد تا قابلیت اندازه‌گیری کمترین و نیز بیشترین کرنش مورد نظر را داشته باشد. شکل ۹ تحلیل نرم‌افزاری مقادیر کرنش در نقاط مختلف قطعه در حالت اعمال بیشینه نیروها و گشتاورها در هر سه جهت X، Y و Z به سازه را نشان می‌دهد.

در نرم‌افزار SolidWorks این قابلیت وجود دارد تا میزان کرنش‌های وارد بر هر نقطه دلخواه سازه طراحی شده را تحت بارگذاری‌های مختلف، به طور تقریبی اندازه‌گیری کند. از این امکان می‌توان برای اندازه‌گیری کرنش در نقاط گرهی استفاده کرد و به تحلیل مدار پل وتستون مربوط به هر یک از شش جهت نیرو و گشتاور در زمان اعمال نیرو و گشتاور پرداخت. با این بررسی می‌توان علاوه بر تعیین دقیق مکان نیروسنج‌ها، موضوع تداخل را نیز بررسی کرد و سنجید که آیا اعمال نیرو یا گشتاور در یک جهت معین، مدار پل وتستون دیگر جهات

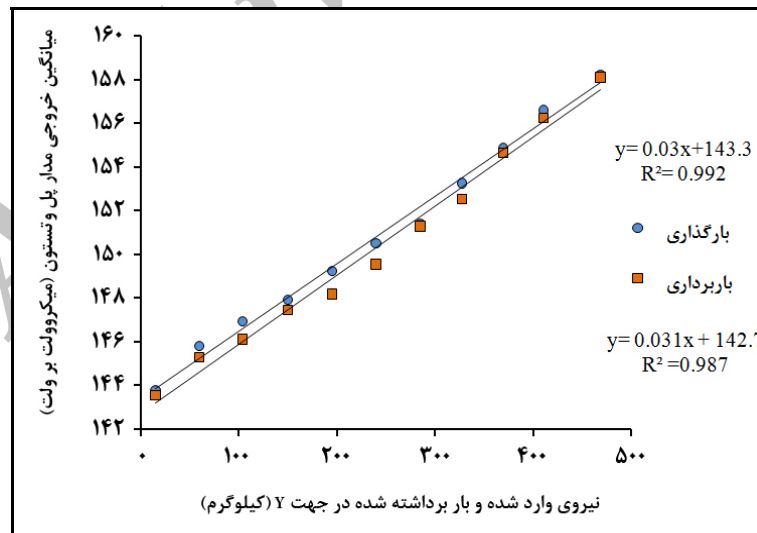


شکل ۹- تحلیل نرم‌افزاری مقادیر کرنش در نقاط مختلف قطعه در حالت اعمال بیشینه نیروها و گشتاورها در هر سه جهت X، Y و Z به سازه

نتایج واسنجی مربوط به سازه حسگر طراحی شده برای بررسی دقیق سازه، واسنجی برای هر شش درجه آزادی، در ۵ تکرار صورت گرفت و داده‌های مربوطه در هر دو زمان باربرداری‌ها و بارگذاری ثابت شد. برای این منظور ابتدا بارگذاری به سازه در هر سری اعمال شد و بعد گذشت زمان یک دقیقه، باربرداری از سازه بارگذاری شده صورت گرفت. نمودارهای واسنجی برای هر کدام از جهت‌های نیرو و گشتاور در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نشان داده شده است.

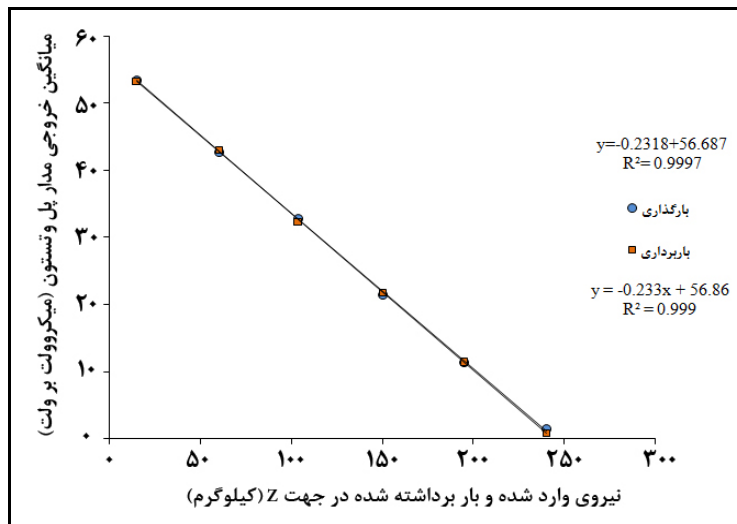


شکل ۱۰- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری نیرو در جهت X

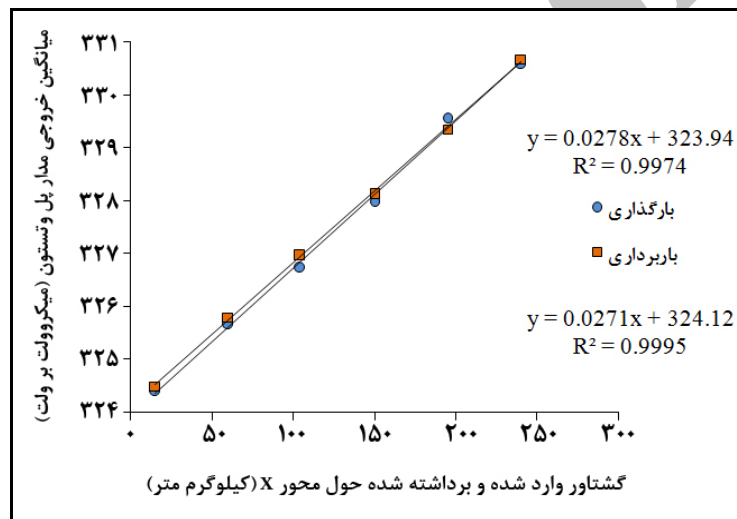


شکل ۱۱- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری نیرو در جهت Y

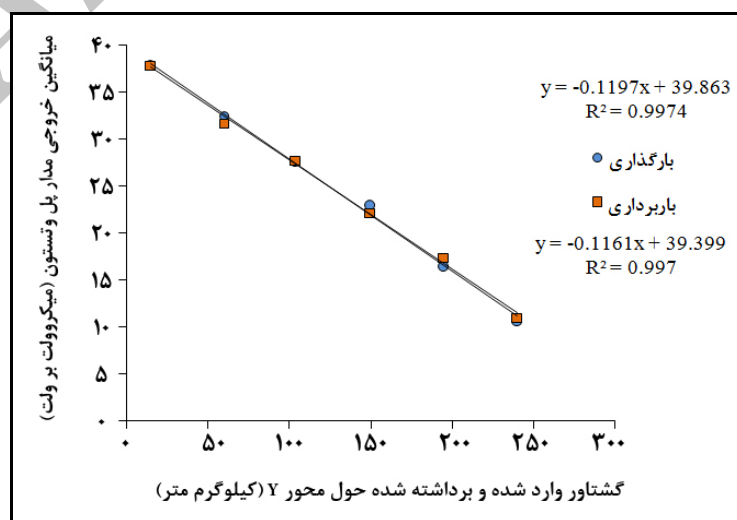
طراحی، ساخت و واسنجی استاتیکی یک حسگر نیرو...



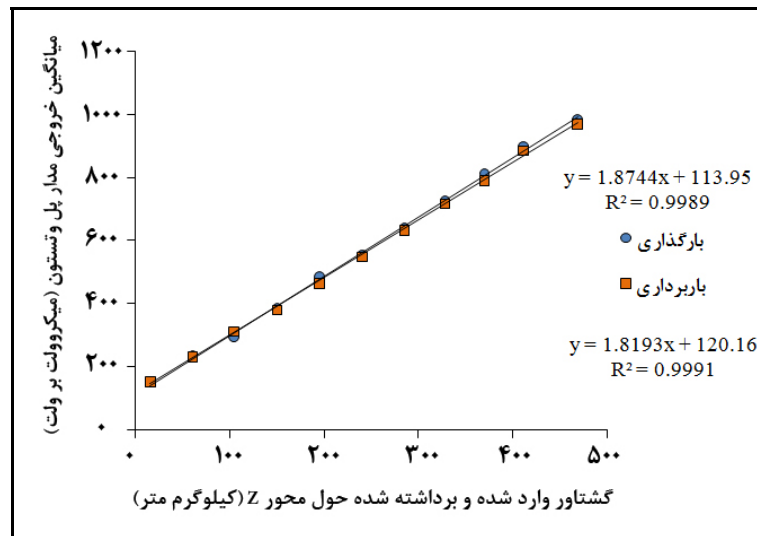
شکل ۱۲- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری نیرو در جهت Z



شکل ۱۳- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری گشتاور حول محور X



شکل ۱۴- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری گشتاور حول محور Y



شکل ۱۵- نمودار واسنجی حسگر در حالت بارگذاری و باربرداری گشتاور حول محور Z

آن در معادله آورده شد. برای به دست آوردن بازه کامل نیز بیشینه مقدار حاصل از تفریق بیشترین و کمترین مقادیر، انتخاب و در معادله جاگذاری شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بین تکرارها تفاوت چندانی وجود ندارد و مقادیر تکرارپذیری از ۹۹/۹۴ درصد تا ۹۷/۸۴ درصد متغیر است، به همین دلیل تکرارپذیری واسنجی تایید و از میانگین داده‌ها برای استفاده از نمودارهای واسنجی استفاده شد. جدول ۳ مقادیر تکرار پذیری را برای پارامترهای مختلف نیرو و گشتاور نشان می‌دهد.

### قابلیت تکرارپذیری حسگر شش درجه آزادی

برای محاسبه قابلیت تکرارپذیری، از رابطه ۲ استفاده شد (Figliola & Beasley, 2010):

$$(۲) \quad \text{تکرارپذیری} = 100 - \left[ \frac{\text{کمترین} - \text{بیشترین}}{\text{بازده کامل}} \right] \times 100$$

در این معادله برای به دست آوردن کمترین و بیشترین مقدار، ابتدا مقادیر ۵ تکرار برای هر یک از شش حالت با هم مقایسه شدند و پس از آن بیشترین و کمترین

جدول ۳- مقادیر قابلیت تکرارپذیری برای شش مؤلفه نیرو و گشتاور در حالت بارگذاری و باربرداری

باربرداری	بارگذاری	قابلیت تکرارپذیری (درصد)
۹۷/۸۴	۹۷/۹۲	نیرو در جهت X
۹۹/۵۳	۹۹/۵۶	نیرو در جهت Y
۹۸	۹۸/۳۵	نیرو در جهت Z
۹۹/۹۴	۹۹/۹۱	گشتاور حول محور X
۹۹/۰۳	۹۸/۷۷	گشتاور حول محور Y
۹۸/۷	۹۸/۱۱	گشتاور حول محور Z



بسیار ساده و با حساسیت کافی دارند اما بدنه آنها ضعیف است و مناسب برای عملیات سنگین و صنعتی نیستند در حالی که حسگر طراحی شده در این پژوهش ساختمانی با مقاومت بالا دارد که قادر است نیروها و گشتاورهای بالایی را که از طرف ادوات خاک‌ورزی و در حین عملیات کشاورزی بر آن وارد می‌شود تحمل کند؛ و با این همه، به گونه‌ای طراحی شده است که دارای حساسیت بالا نیز باشد. جدول ۴ مقادیر داده‌های به دست آمده برای حساسیت سازه را نشان می‌دهد.

**نتایج بررسی میزان حساسیت حسگر طراحی شده**  
حساسیت، بر حسب خروجی پل وتستون بر واحد نیروی اعمال شده بیان می‌شود (Figliola & Beasley, 2010). با دانستن مقدار خروجی پل وتستون، می‌توان حساسیت سازه حسگر را به ترتیب برای همه پارامترها بر حسب میکروولت بر کیلوگرم به دست آورد. اگرچه نیروسنج‌هایی نظیر واتستون و دریک (Watson & Drake, 1975)، مالتس کراس (Flatau, 1976)، و آستک (Anon, 1982) ساختمانی

جدول ۴- میزان حساسیت هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده

پارامتر مورد بررسی	میزان حساسیت (میکرو ولت بر کیلوگرم)
نیرو در جهت X	۰/۱
نیرو در جهت Y	۰/۹
نیرو در جهت Z	۰/۲۸
گشتاور حول محور X	۲/۹۹
گشتاور حول محور Y	۰/۲۴
گشتاور حول محور Z	۲/۵۴

تولید کند. نیروسنج‌های استوارت (Stewart, 1965)، مییر (Meyer, 2000)، سامر (Sommer, 2011) و تمامی نیروسنج‌هایی که ساختمانی با اجزای جدا از هم و مفصل‌دار دارند اگرچه ممکن است ساخت قطعه را آسان‌تر کنند اما به علت لقی در ابتدا و انتهای اعضای خود، میزان پسماند را در سازه بالا می‌برند؛ در حالی که حسگر مورد بررسی در این پژوهش با ساختاری یکپارچه و مقاوم‌ترین پسماند را در ساختمان خود دارد. نتایج بررسی‌ها در جدول ۵ آمده است. از مقادیر به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در هیچ یک از پارامترهای نیرو و گشتاور، پسماند قابل توجهی وجود ندارد و سازه از این نظر به درستی عمل می‌کند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این جدول بیشترین حساسیت (برابر ۲/۹۹ میکرو ولت بر کیلوگرم) مربوط به گشتاور حول محور X و کمترین حساسیت (برابر ۰/۱ میکرو ولت بر کیلوگرم) نیز مربوط به نیرو در جهت X است. به گونه‌ای که مشاهده می‌شود حسگر طراحی و ساخته شده توانایی اندازه‌گیری حداقل ۱ کیلوگرم را در تمامی جهات داراست.

#### نتایج بررسی پسماند در حسگر

پسماند نشانه‌ای از قابلیت تکرار مشابه برای خروجی داده‌ها در هنگام بارگذاری و باربرداری حسگر است. ممکن است ورودی در روند افزایشی، نسبت به وقتی که روند کاهش‌ی طی می‌کند، خروجی متفاوتی

جدول ۵- داده‌های مربوط به بررسی پسماند

مقدار پسماند (درصد)	پارامتر مورد بررسی
۲/۰۸	نیرو در جهت X
۰/۴۲	نیرو در جهت Y
۲/۵۶	نیرو در جهت Z
۰/۱۶	گشتاور حول محور X
۲/۵۴	گشتاور حول محور Y
۰/۱۷	گشتاور حول محور Z

### تداخل نیروها و گشتاورها

نیرو-گشتاور، نشان‌دهنده این مطلب است که حسگر دارای قابلیت تکرارپذیری برای واسنجی است و با توجه به محاسبات انجام گرفته روی داده‌های واسنجی، سازه حساسیت مناسب را برای اندازه‌گیری نیرو دارد. منحنی‌های واسنجی برای تمامی پارامترها دارای ضریب تبیین بسیار بالایی هستند، بنابراین خطی بودن منحنی‌های واسنجی برای سازه طراحی شده مورد تایید است. استفاده از ۲۴ کرنش‌سنج روی سازه منجر گشت به اینکه دقت اندازه‌گیری‌ها بسیار بالا رود و با ایجاد پل‌های و تستون کامل نیز هرگونه خطای دمایی از بین برود.

تحلیل روی سازه حسگر طراحی شده نشان می‌دهد که تنش در تمامی المان‌های انتخاب شده در قطعه کمتر از تنش تسلیم و حسگر مورد نظر بدون هیچ گونه خطایی عملیات اندازه‌گیری نیرو و گشتاور را در هر سه جهت محورهای مختصات تا محدوده حداکثر ۵ کیلو نیوتن در جهت Y و حداکثر ۲/۵ کیلو نیوتن در جهت X و Z و حداکثر ۵ کیلو نیوتن متر حول محور Z و ۲/۵ کیلو نیوتن متر حول محور Y و X، انجام می‌دهد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هنگام اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها به صورت هم‌زمان، نیروها در هر ۳ محور X، Y و Z کاملاً مستقل از هم هستند و با یکدیگر تداخل ندارند و گشتاورها نیز حول این ۳ محور مستقل از هم عمل می‌کنند و مقدار آنها بر دیگری اثر نمی‌گذارد و تنها زمانی که نیرو در جهت Y به صورت هم‌زمان با گشتاور حول محور Z به سازه وارد می‌شود، روی همدیگر کمی تأثیر می‌گذارند.

یکی از مهم‌ترین مباحث در طراحی حسگرهای شش درجه آزادی، تداخل است (Godwin *et al.*, 1993; Abbaspour-Gilandeh & Haghghat-Shishvan, 2011; Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki, 2013). حسگری مفید و کارآمد خواهد بود که نیرو یا گشتاور وقتی در یک جهت وارد می‌شود، در جهت‌های دیگر تأثیری نداشته باشد و اگر در آن جهت‌ها نیرو یا گشتاوری وارد نشود، حسگر هیچ مقداری را برای آنها نشان ندهد. در بررسی این حسگر و مطابق داده‌های به دست آمده از دستگاه دیتالاگر، مشخص شد که هیچ یک از نیروها با یکدیگر و هیچ یک از گشتاورها با یکدیگر تداخل ندارند و تنها در حالتی که نیرو در جهت Y به سازه وارد شود، به مقدار جزئی روی گشتاور حول محور Z اثر می‌گذارد و برعکس.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک حسگر شش درجه آزادی نیرو-گشتاور با ساختار ساده برای اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های وارد بر ادوات خاک‌ورزی طراحی و ساخته شده است. این سیستم در عین سادگی، داشتن وزن کم و پایین بودن هزینه ساخت آن دارای مقاومت و پایداری احتمالی در برابر تمام نیروها و ممان‌های اعمالی از طرف ادوات خاک‌ورزی نیز هست. طراحی حسگر به گونه‌ای است که قابلیت اتصال به انواع ادوات خاک‌ورزی را دارد. نتایج آزمون‌های واسنجی حسگر شش درجه آزادی

## مراجع

- Abbaspour-Gilandeh, Y. and Khanramaki, M. 2013. Design, construction and calibration of a triaxial dynamometer for measuring forces and moments applied on tillage implements in field conditions. *J. Metro. Soc. India Sci.* 28(2):119-127.
- Abbaspour-Gilandeh, Y. and Haghghat-Shishvan, S. 2011. Extended Octagonal Ring Transducers for Measurement of Tractor-Implement Forces. *Instruments and Experimental Techniques. Sci.* 54(1): 137-141.
- Al-janobi, A. 2000. A data-acquisition system to monitor performance of fully mounted implements. *J. Agric. Eng. Res.* 75, 167-175.
- Anon. 1982. Operation & Technical Manual of 6-Axis Force Sensor. Model FS6-120A, Astek Engineering, Inc.
- Figliola, R. S. and Beasley, D. E. 2010. *Theory and Design for Mechanical Measurements.* John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Flatau, C. R. 1976. Force sensing in robots and manipulators. *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International CISM-IFTToMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators.* Sep. 14-17. Warsaw. 294-306.
- Godwin, R. J., Reynolds, A. J., O Dogherty, M. J. and Al-Ghazal, A. A. 1993. A triaxial dynamometer for force and management measurement on tillage implements. *J. Agric. Eng. Res.* 55, 189-205.
- Goo Kang, Ch. 2005. Performance improvement of a 6-axis force torque sensor via novel electronics and cross-shaped double-hole structure. *Int. J. Control. Autom. Sys. Sci.* 3(3): 469-476.
- Kepner, R. A., Bainer, R. and Barger, E. L. 1982. *Principles of Farm Machinery.* 3<sup>rd</sup> Ed. The AVI Publishing Company. UK.
- Lotfi, D., Hemmat, A. and Akhavan Sarraf, M. R. 2007. Development and evaluation of a three-point hitch dynamometer and a fifth wheel for mounted implement draft and tractor speed measurements. *J. Sci. Technol. Agric. Natural Resour.* 11 (1): 147-162. (in Farsi)
- Macnab, J. E., Robert, B. W. and Dean, E. B. 1977. Modeling wheel traction energy requirements and tractive performance. *J. Trans. ASAE. Sci.* 20(2): 602-609.
- Meyer, C. 2000. Multi-axis Load cell. U. S. Patent. *Sci.* 6, 038-933.
- Nakamura, Y., Yoshikawa, T. and Futamata, I. 1987. Design and signal processing of six-axis force sensors. *Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Symposium of Robotic Research.* 75-81.
- Park, J. J. and Kim, G. S. 2005. Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper. *Sensors Actuators. Sci.* 118, 127-134.
- Sheng, A. L. and Hung, L. T. 2002. A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities. *Sensors Actuators. Sci.* 100, 223-230.
- Sommer, N. 2011. Design and integration of a multi- axis force/moment sensor for mobile quadruped platform. Semester Project Report. EPFL Biorobotics laboratory.
- Spletzer, J. 1998. Load cell. U.S. Patent. *Sci.* 5, 850-044.
- Stewart, D. 1965. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part 1. Sci.* 180(15): 371-386.
- Uchiyama, M. and Hakomori, K. 1985. A few considerations on structure design of force sensors. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Conference of the Robotics Society of Japan.* 17-19.
- Watson, P. C. and Drake, H. 1975. Pedestal and wrist force sensors for automatic assembly. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium Industrial Robots.* 501-511.

## Design, Construction and Calibration of 6 DOF Force Torque Sensor for Measurement of Force and Moment of Tillage Implements

S. Zohari-Shilsar and Y. Abbaspour-Gilandeh \*

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, P. O. Box: 179. Ardabil, Iran. Email: [abbaspour@uma.ac.ir](mailto:abbaspour@uma.ac.ir)

Received: 28 January 2015, Accepted: 22 August 2015

The presents study designed, constructed, and statically calibrated a 6DOF force torque sensor to measure forces and moments acting on a tillage implement. The instrument could measure the three orthogonal forces acting on the implement and the three moments acting around the orthogonal axes up to a maximum force of 5 kN and a maximum moment of 5 kNm. For mechanical design of the 6DOF force torque sensor, the finite element method and Solid Works software were used. The sensing element was constructed from AISI 1045 cold-drawn steel by machining. Strain distributions were analyzed to find the optimal strain node positions in the sensor to minimize cross-sensitivity between horizontal and vertical force measurement. The forces and moments acting on the sensor were measured using strain gauge bridges. A data logger (model DT800; DataTaker) was used for logging and saving data. Calibration of the measurement system was conducted by a calibration system designed for static calibration of a 6DOF force torque sensor. The calibration results showed that the sensor had appropriate precision, sensitivity, and good repeatability for measuring forces and moments. The results showed a high degree of linearity between bridge output voltage and applied force. The interaction of the applied forces and moments was not significant.

**Keywords:** Data Logger, Dynamometer, Resilient Element, Sensitivity, Strain Gauge, Tillage