

Design, Construction and Evaluation of an Automatic Wire-bending Machine for Plant Supports

HAMIDREZA BAKHSHI¹, GHOLAMREZA CHEGINI^{2*}, PAYAM ZARAFSHAN³, AKBAR ARABHOSSEINI⁴

1. Ms.c Graduated, Department of Agrotecnology, Aburayhan Compus, Univercity of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate professor, Department of Agrotecnology, Aburayhan Compus, Univercity of Tehran, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Agrotecnology, Aburayhan Compus, Univercity of Tehran, Tehran, Iran.
4. Associate professor, Department of Agrotecnology, Aburayhan Compus, Univercity of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: Nov. 11, 2018- Revised: May. 6, 2019- Accepted: May. 20, 2019)

ABSTRACT

Nowadays, the vertical cultivation method is considered because of its high productivity per unit area and improvement of greenhouse products quality. Conventional and manual methods are currently being used to produce a variety of plant support forms in vertical planting for greenhouse products. Therefore, construction of the various plant supporting forms using computer numerical control (CNC) technology is very important. In this study, design, construction and evaluation of an automatic wire bending machine is provided to create various plant supporting forms. This machine is including three units such as mechanical, electrical and control-programing units. In the mechanical unit, the rotational-to-linear wire conversion mechanism along with stepper motor and eccentric offset vertical shaft mounted gear were used for transferring and bending of the wires, respectively. Also, the new coordinates were created in the bending process by holding of wire and rotating working plate around the transferring axis for 3-D wire bending. In the electronic unit were used an Arduino board, three stepper motors, three drivers and a DC motor. Subsequently, the machine was controlled by an operator through connecting the electronic unit to a computer followed by sending a move command which this process carried out in Arduino medium. The machine parameters such as frequency at four levels (31, 42, 50 and 61 Hz), the distance of bender to plant support at two levels (1.7 and 2.3 mm), and process time at four levels (5, 7, 8 and 10 second) as independent variables were evaluated on linear and angular displacement as the dependent variables and the performance of constructed machine was compared with a software models. The results showed that in the modeling of various plant supporting forms there was not a significant difference between constructed machine and software models through variation of independent parameters. In general, in this study, the constructed automatic wire bending machine was created the high-precision, high-speed and applicable of the different plant supporting forms, and thereby, it provided optimizing the complex designs for plant growth.

Keywords: Plant Supports; 3-D Wire Bending; Automatic Wire Bending Machine; Vertical Framing; CNC.

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه سیم خم کن اتومات پشتیبان گیاه

حمیدرضا بخشی^۱، غلامرضا چگینی^۲، پیام زرافشان^۳، اکبر عرب حسینی^۴

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴. دانشیار، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۳۰)

چکیده

امروزه روش کشت عمودی به دلیل بهره‌وری بالا در واحد سطح و بهبود کیفیت محصولات گلخانه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. در حال حاضر برای ساخت انواع فرم‌های پشتیبان گیاه در کشت عمودی برای محصولات گلخانه‌ای از روش‌های مرسوم و دستی استفاده می‌شود. بنابراین ساخت فرم‌های مختلف پشتیبان گیاه با استفاده از فناوری کنترل عددی رایانه‌ای (CNC) از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی یک سیم خم‌کن اتومات به منظور ایجاد فرم‌های مختلف پشتیبان گیاه ارائه شده است. این دستگاه، از سه واحد مکانیکی، الکترونیکی و کنترل- برنامه نویسی تشکیل شده است. در واحد مکانیکی به ترتیب برای انتقال و خم کردن سیم از مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی به همراه یک موتور پله‌ای و شفت عمودی خارج از مرکز چرخنده استفاده شد. همچنین به منظور خم کردن سه‌بعدی سیم، با ثابت نگه‌داشتن سیم و چرخش صفحه کاری حول محور انتقال، فرآیند خم‌کاری در مختصات جدیدی انجام گرفت. در بخش الکترونیکی دستگاه، از برد آردوینو، سه عدد موتور پله‌ای و سه عدد درایور و یک موتور DC استفاده گردید. در ادامه با ارتباط مجموعه الکترونیکی با کامپیوتر و سپس با ارسال فرمان حرکتی، دستگاه توسط اپراتور کنترل گشته که این فرآیند در محیط آردوینو انجام می‌شود. در این دستگاه اثر پارامترهای فرکانس در چهار سطح (۳۱، ۴۲، ۵۰ و ۶۱ هرتز)، فاصله خم کن تا تکیه گیاه در دو سطح (۱/۷ و ۲/۳ میلی متر) و زمان در چهار سطح (۵، ۷، ۸ و ۱۰ ثانیه) به عنوان متغیرهای مستقل بر روی تغییر مکان خطی و زاویه‌ای سیم به عنوان متغیرهای وابسته ارزیابی گردید و عملکرد ماشین ساخته شده با مدل‌های نرم افزاری مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تغییرات پارامترهای مستقل، در مدل‌سازی انواع فرم‌های پشتیبان گیاه با نرم افزار و دستگاه ساخته شده تفاوت معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. به طور کلی، دستگاه سیم خم‌کن اتومات ساخته شده در این پژوهش فرم‌های مختلف، پیچیده و کاربردی پشتیبان گیاه را با دقت و سرعت بالایی ایجاد کرده و بهینه‌سازی هر کدام از فرم‌ها را برای رشد گیاه فراهم می‌کند.






واژه‌های کلیدی: پشتیبان گیاه؛ خم‌کاری سه بعدی؛ سیم خم‌کن اتومات؛ کشت عمودی؛ CNC.

مقدمه

گیاهان زمینی و کیفیت مناسب گیاهان کاشته شده بر روی سیستم عمودی متحرک می‌تواند راهی برای افزایش کمیت و کیفیت تولید محصولات گلخانه‌ای باشد (Calders et al., 2014). علاوه بر این تولید برخی از گونه‌های گیاهان (گوجه فرنگی، انگور، خیار و غیره) که رشد محصولات نسبت به شاخه بیشتر می‌باشد، سبب ضعیف شدن شاخه‌ها می‌شوند. در این مواقع اگر شکستگی نیز رخ ندهد، هنگامی که شاخه‌ها خم می‌شوند، در اثر تماس محصول با زمین، منجر به خراب شدن و آفت زدگی آنان می‌گردد (Glamos, 1992). پشتیبان گیاه^۱ می‌تواند برای هدایت

یکی از مشکلات تولیدات گلخانه‌ای حداکثر نبودن تولید و بازده اقتصادی گلخانه نسبت به سرمایه‌گذاری اولیه است. کشت عمودی یکی از راه‌های افزایش راندمان تولید گلخانه‌هاست (Pérez-Urrestarazu & Urrestarazu, 2018). نوع سامانه اثر معناداری بر تولید برگ گیاه دارد و گیاهان کاشته شده بر سیستم عمودی متحرک از بقیه گیاهان تعداد برگ بیشتری دارند (López-Rodríguez et al., 2016). بالا بودن تعداد گیاه کاشته شده بر روی سیستم عمودی در واحد سطح نسبت به

جدول ۱: انواع گیاهان و پشتیبان های مورد استفاده آنها

انواع گیاهان	محصول	نوع پشتیبان
پیچشی	نخود فرنگی	
	خیار	
	ملون	
	انگور	
بالارونده پیچشی	لوبیا	
	مخروطی	
گیره ای	رازک	
	شبکه ای	
پراکنده	گوجه	
	فلفل	
	بادمجان	
	توماتیلو	
بوته ای	تمشک	
	توت سیاه	

ساختار پشتیبان گیاهان می تواند با هدایت رشد گیاه به سمت بالا و کاهش پراکندگی، باعث افزایش تولید شوند، در نتیجه می توان گیاهان بیشتری را در یک سطح مشخص رشد داد. برخی از گیاهان با تولید محصولات سنگین منجر به ضعیف شدن شاخه ها و فرو رفتن در باتلاقی ها و باران های سنگین می شوند (Fernández-Cañero *et al.*, 2018). در برخی از گونه ها، مانند گوجه فرنگی، حتی اگر شکستگی رخ ندهد، هنگامی که ساقه ها خم شوند و میوه را در تماس با زمین قرار می دهند باعث کاهش عملکرد بوته می گردد (Glamos, 1992). پشتیبان های سیمی که برای تقویت پوشش گیاهان استفاده می شود معمولاً با ترکیب چند رشته و یا شکل دهی یک شاخه سیم، ساخته می شوند تا یک ساختار شبکه ای با اندازه و شکل مورد نیاز ایجاد شود. چنین ساختارهای شبکه ای اغلب تحت تأثیر تنش های ناشی از عوامل طبیعی و وزن محصولات در نقاط اتصال سیم ها شکسته می شوند (Braun, 1983). بسیاری از سازه های پشتیبان گیاهی، ساختار مخروطی شکلی از جنس سیم هستند. استفاده از سیم های با قطر زیاد هزینه های تولید را افزایش می دهد همچنین برای جلوگیری از زنگ زدگی پشتیبان های گیاه از سیم هایی با جنس مسی یا پلاستیکی و یا از روکش گالوانیزه استفاده می شود. (Gunderman *et al.*, 2005). در کشت مخروطی از سازه های پشتیبانی شبکه ای استفاده شده که قسمتی از آنها در زمین فرو برده شده است. با توجه به خاصیت سیم پس از برداشت محصول، ساختار پشتیبان-همچنان حفظ شده است (Geiger & Bruckmann, 1977).

رشد گیاه به صورت یکپارچه و در جهت دلخواه مفید باشد و از تلفات ناشی از شکستگی و خراب شدن در اثر برخورد با زمین جلوگیری کند (Smith, 1951). همچنین برای حمل و نقل و ذخیره سازی مناسب می توان از آن استفاده نمود (Bork, 1989). یکی از مشکلات پشتیبان گیاه تنظیم آنها در مقابل تاثیرات جوی می باشد (Warren & Saralegui, 2013).

پشتیبان های گیاه تاثیر قابل توجهی در یک سیستم کشت عمودی ایجاد می کند و با سازه های متداول علاوه بر بهبود رشد گیاه از نظر زیبایی شناختی باغ نیز تاثیرگذار می باشد. به طور کلی براساس تعریف برخی از محققین در این زمینه پشتیبان های گیاهان را می توان با توجه به شکل (۱) دسته بندی نمود (Lambertini *et al.*, 2007; Fell, 2011; Hart, 2011).



الف) ستونی



ب) قفسه ای



ج) مخروطی



د) شبکه ای



و) خرگوشی



ه) باغی

شکل ۱: انواع پشتیبان گیاه (Hart, 2011)

همچنین با توجه به شناسایی محصولاتی که نیازمند پشتیبانی از آنها می باشد، می توان آنها را برحسب نوع گیاه آن دسته بندی کرد و همچنین نحوه رشد و پشتیبان های رایج آنها را ذکر نمود (جدول ۱).

اهداف

به طور کلی اهداف مورد انتظار از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- بررسی انواع مختلف پشتیبان‌های گیاه برای کشت عمودی
- ۲- طراحی و ساخت دستگاه سیم خم کن اتومات به منظور ایجاد پشتیبان گیاه
- ۳- ارزیابی عملکرد دستگاه
- ۴- طراحی و ساخت مدل پیشنهادی پشتیبان گیاه

مواد و روش‌ها

این بخش شامل پنج مرحله می باشد. مرحله اول شامل اصول و مبانی طراحی و ساخت و ویژگی بخش‌های مختلف دستگاه (قطعات، اندازه ها و ...) می باشد. در مرحله دوم تشریح مکانیزم‌ها و اجزای مکانیکی واحدهای مختلف دستگاه بیان می شود. مرحله سوم واحد الکترونیک و کنترل دستگاه شامل اجزای مختلف، سیم‌کشی‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها تشریح می گردد. در مرحله چهارم مدلسازی و برنامه نویسی با توجه به روابط خمکاری و بوسیله رایانه و ریز-کنترلر رابط توضیح داده می شود. و در مرحله پنجم طراحی سامانه کنترل برای بدست آوردن روابط مکانیزم های مختلف و کالیبراسیون بیان می شود.

اصول علمی دستگاه سیم خم کن سه بعدی

نمونه اولیه دستگاه ساخته شده شامل یک درجه جابجایی خطی در راستای X (جابجایی سیم) و دو درجه حرکت دورانی حول محورهای X و Z می باشد. جابجایی خطی در راستای محور X بدون محدودیت انجام شده و همچنین حرکت دورانی حول محور X نیز بدون محدودیت می باشد. برای جلوگیری از برخورد شفت خم کن با لوله انتقال، حرکت دورانی حول محور Z (خمش) با محدودیت انجام می پذیرد. برای کنترل اتوماتیک هر یک از حرکت های خطی و دورانی دستگاه از نرم افزار آردوینو^۱ استفاده شده است. همچنین ساخت دستگاه سیم خم کن اتومات در سه

بخش صورت گرفته است:

ساخت قاب مکانیکی

پیاده سازی بخش الکترونیکی

نصب سیستم کنترل و محاسبات

بخش مکانیکی

طراحی سینماتیکی خمش

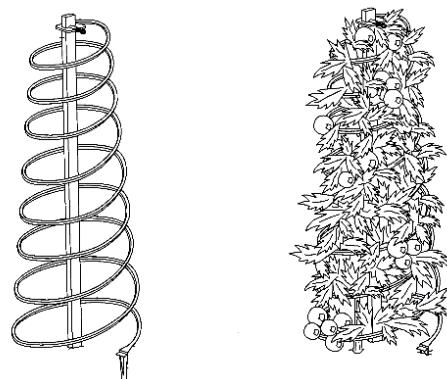
همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، خم شدن پس از متوقف کردن حرکت پیشروی سیم، شفت خارج از مرکز خمش

گلاموس پشتیبان گیاهی را ارائه کرد که می تواند رشد گیاه را در جهت دلخواه مفید هدایت کند و از تلفات ناشی از شکستگی و خراب شدن جلوگیری کند. علاوه بر داشتن یکپارچگی ساختاری خوب می تواند به راحتی با استفاده از ماشین های اتوماتیک تولید شود. طراحی ساده این اجازه را می دهد که با تولید اتوماتیک باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه ها شود. (Glamos, 1992).

فرمن پشتیبانی از یک گیاه دارای ساختار میله ای را پیشنهاد داد که شامل حداقل دو ستون جدا از هم هستند و نقطه اتکا آن در انتهای بالای میله قرار دارد. همچنین از یک یا چند اتصال میله ای متناسب با محفظه پوشش گیاه در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، یک حلقه پایین تر از هر قفس دارای قطر بزرگتر از حلقه بالایی قفس قبل از آن است، به طوری که قفس ها به راحتی در یکدیگر قرار می گیرند و مشکلات موجود در استفاده از پشتیبان گیاهان با توجه به اهداف برطرف می گردد (Foreman, 1997).

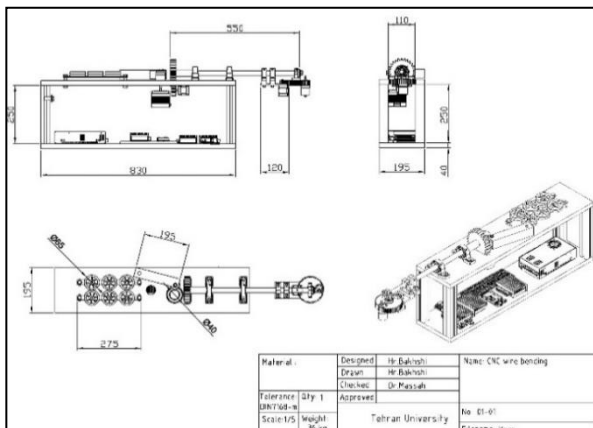
روکا یک سیستم پشتیبانی سیمی برای گیاه ارائه کرد که علاوه بر بهبود رشد و ایجاد حلقه محافظتی برای گیاه شامل یک سیستم آبیاری است که به وسیله حلقه های تعبیه شده علاوه بر آبیاری گیاه به عنوان گرم کننده سیستم نگهداری نیز استفاده می شود (Rocka, 2000).

میدر (Maeder, 2009) یک فرم انعطاف پذیر از یک سیم در اطراف یک ستون بلند قابل تنظیم را که به صورت مارپیچی متصل می شود ارائه کرد. یک گیاه مانند گوجه فرنگی یا فلفل که دارای ساقه شکننده است که در هنگام برخورد با بادهای قوی و تولید میوه سنگین در معرض شکستگی و خم شدن است. از این رو در این مدل که دارای یک ساختار حمایتی خارجی می باشد تا موجب شکستگی و آسیب به ساقه و همچنین میوه آن به دلیل برخورد با زمین نگردد (شکل ۲).



شکل ۲: پشتیبان مارپیچی گیاه (Maeder, 2009)

بعد می‌باشد، طراحی دستگاه مورد نظر براساس ترتیب و ارتباط قسمت‌های مختلف با یکدیگر انجام شده است. همچنین برای ساخت فرم‌های پشتیبان گیاه با توجه به سه بعدی بودن برخی از آن‌ها، باید هنگام طراحی فضای لازم را برای اطراف قسمت خم‌کن فراهم کرد. بنابراین طراحی دستگاه باید به گونه‌ای باشد که انتقال قدرت در حول محورهای مورد نظر با فاصله نسبت به قسمت خم‌کن آن قرار گرفته و برخورد قسمت‌های خم شده با دستگاه به حداقل برسد. در نهایت دستگاه سیم خم‌کن اتومات، در نرم افزار سالیدورک ۲۰۱۶ شبیه سازی شد (شکل ۴).



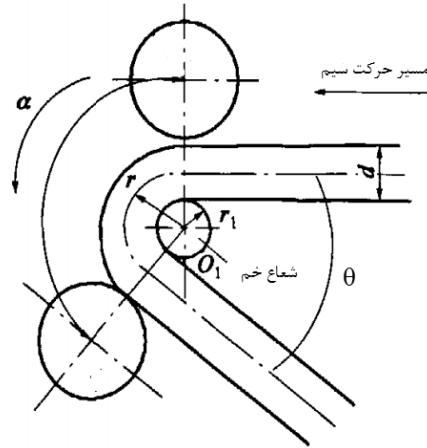
شکل ۴: نقشه فنی دستگاه سیم خم‌کن اتومات در نرم افزار Solidworks

اجزای دستگاه

با توجه به مکانیزم‌های مورد نیاز، ابعاد دستگاه سیم خم‌کن اتومات تعیین شد و برای مرحله ساخت آماده شد. شاسی دستگاه وظیفه ستون فقرات کل سازه را برعهده دارد و تمام اجزاء دستگاه بر روی شاسی نصب شده‌اند. برای طراحی و ساخت نکاتی در نظر گرفته شد که از جمله آنها می‌توان به مواردی همچون تحمل بیشترین میزان وزن و تنش، سبکی، کم حجم بودن و سهولت در پیاده سازی اشاره کرد. در طراحی و ساخت دستگاه سیم خم‌کن اتومات، محل هر یک از اجزاء مکانیکی و الکترونیکی براساس جایگاه هریک از مکانیزم‌ها بر روی دستگاه در نظر گرفته شده است. همچنین تمهیدات لازم برای حفظ تعادل و لرزش کم نیز در این قسمت حائز اهمیت بود. یکی از مهمترین مواردی که پیش از شروع فرآیند طراحی مدنظر بود، طراحی دستگاه با معیارهای ذکر شده بود که نقشی اساسی را در موفقیت مدل ایفا نمود. (شکل ۵).

اجزای تشکیل دهنده دستگاه خم‌کن سه بعدی سیم و توضیحات لازم قسمت‌های مختلف آن به ترتیب شماره گذاری شده در شکل (۵) آورده شده است (جدول ۲).

سیم را به اندازه زاویه چرخش خم می‌کند. در این فرآیند شعاع خم شدن سیم توسط فاصله شفت تا تکیه گاه تعیین می‌شود (Ye et al., 2009).



شکل ۳: مرکز محور خمش

خمش همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، در این حالت خمش، روابط هندسی زیر حاکم می‌باشد:

$$r = r_1 + 0.5d \quad (\text{رابطه ۱})$$

r : شعاع خمش سیم (mm)

r₁ : شعاع محور تکیه گاه (mm)

d : قطر سیم (mm)

$$\theta = 180 - \alpha \quad (\text{رابطه ۲})$$

θ : زاویه خمش

α : زاویه بین سیم و امتداد خم

طراحی دینامیکی خمش

با فرض داشتن یک رفتار الاستیک-پلاستیک کامل، می‌توان ای در هنگام بارگذاری رابطه ریاضی بین گشتاور خمشی و شعاع منحنی را برای مقطع دایره بدست آورد (Baragetti, 2006). بار خمشی که همه قسمت های سیم را به صورت پلاستیک شکل می‌دهد برابر است با:

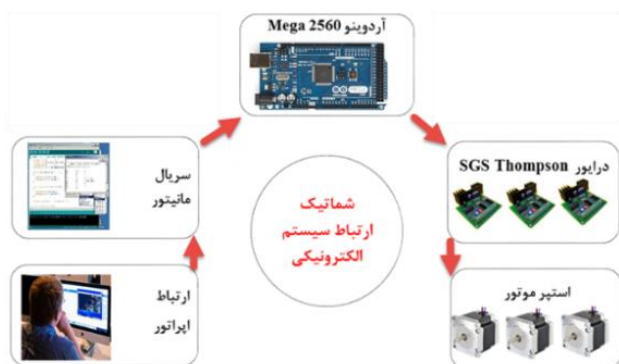
$$M_{pl} = \sigma_s \frac{d^3}{6} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در حالی که بار خمشی که سبب تغییر شکل پلاستیک در فاصله $\frac{d}{2}$ از محور خنثی مقطع برش خورده می‌شود.

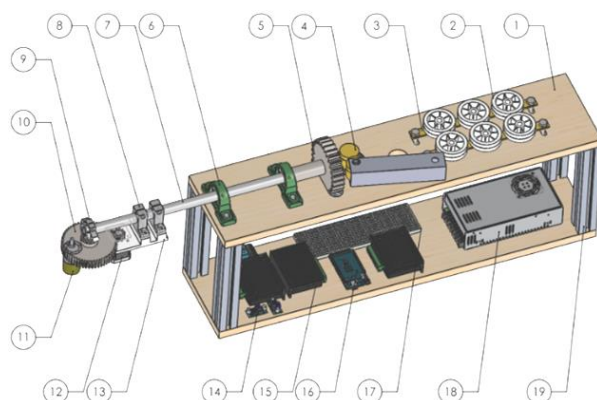
$$M_i = \frac{E}{r} \frac{d^4 \pi}{32 \cdot 2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

طراحی دستگاه سیم خم‌کن اتومات

با توجه به قسمت‌های مختلف دستگاه خم‌کن که شامل مکانیزم صاف کننده، مکانیزم انتقال دهنده و مکانیزم خمش سیم در سه



شکل ۶: نقشه مدار الکترونیکی دستگاه سیم خم کن اتومات



شکل ۵: طرح واره کلی دستگاه سیم خم کن اتومات

با توجه به گشتاور و دقت مورد نیاز در دستگاه طراحی شده، از موتورهای پله‌ای استفاده شده است که مشخصات هر یک از آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است. برای اتصال موتور به کنترل کننده و مدار الکترونیکی اصلی سیستم و ولتاژ و جریان مناسب، از درایور L298 طرح شرکت اس جی اس تامسون^۱ استفاده شده است. همچنین با استفاده از این درایور، دقت موتور تا چهار برابر قابل افزایش است. برای موتور در جهت محور X و دوران حول محورهای X و Z از هر درایور به صورت همزمان استفاده شده است. برای اتصال قطعات الکترونیکی سیستم، شامل رله، کاهنده ولتاژها، منبع تغذیه و ارسال فرمان به مجموعه، از برد الکترونیکی آردوینو مگا ۲۵۶۰ استفاده شد.

جدول ۲: مشخصات اجزاء تشکیل دهنده ی دستگاه خم کن

شماره	قطعه	توضیحات	تعداد
۱	تخته چند لایه	۸۷۰×۱۹۷mm	۲
۲	غلtek صاف کننده	D: ۶۵ mm - pvc	۶
۳	تسمه تنظیم فاصله غلtek	Fe	۲
۴	غلtek انتقال دهنده سیم	D: ۴۰ mm - Brass	۲
۵	چرخنده انتقال قدرت ۱	Steel & Polyamide	۲
۶	یاتاقان غلtekی	۲۰ mm	۲
۷	لوله گوشتی	۶۰۰×۲۰ mm	۱
۸	اتصال SK20-1	D: ۲۰ mm - Al	۱
۹	اتصال SH20 V0.2	D: ۲۰ mm - Al	۲
۱۰	چرخنده انتقال قدرت ۲	Caoutchouc & Steel	۲
۱۱	موتور پله ای	Sanyo Denki & Vexta	۳
۱۲	الکترو موتور	Bohler Co. - ۱۲ V	۱
۱۳	سپورت موتور پله ای	Polyamide	۱
۱۴	کاهنده ولتاژ	Resistor 103 Pack	۲
۱۵	درایور L298	SGS THOMSON	۳
۱۶	برد بورد	GL	۱
۱۷	برد آردوینو	ATMega2560	۱
۱۸	منبع تغذیه	12V - 10A	۱
۱۹	پروفیل آلومینیومی	Profile-Accessories	۴

جدول ۳: مشخصات موتورهای پله‌ای واحدهای مختلف

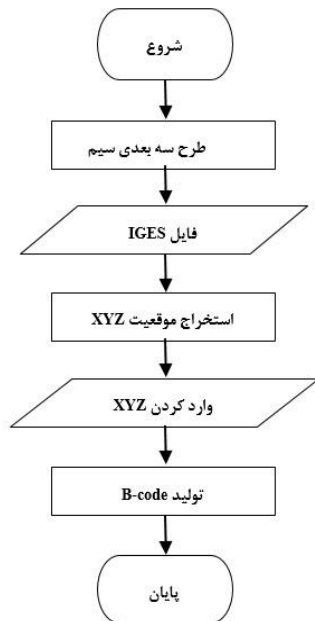
مشخصه	انتقال	چرخش	خم کن
ساخت شرکت	وکستا	وکستا	سروو
ولتاژ تغذیه (Volt)	12	4.5	4.48
تعداد سیم اتصال	6	6	6
زاویه در هر پله (Deg/Step)	1.8	1.8	1.8
گشتاور نامی (Kg.cm)	6	23	7
جریان در هر فاز (A/Phase)	0.6	2	1.4
قطر / پهنای موتور (mm)	57	57	42
طول کل بدنه (mm)	50	78	50
وزن (kg)	0.6	17	0.46

نقشه مدار الکترونیکی

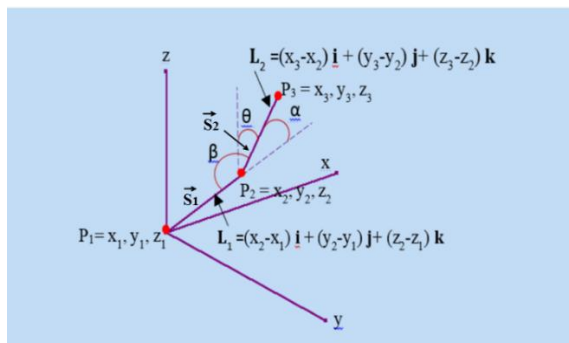
در نقشه مدار الکترونیکی علاوه بر سیم کشی صحیح هر یک از موتورها و همچنین اتصال درست با ریز-کنترلر آردوینو، با توجه به ولتاژ و جریان نامی هر یک از موتورها، مقادیر ولتاژ و جریان با استفاده از کاهنده‌ها و رگولاتورها تنظیم می‌شود. در شکل (۷) نقشه طرح‌واره اتصال سیم موتورها و نحوه ارتباط آن با میکرو کنترلر آردوینو و کامپیوتر نشان داده شده است.

بخش الکترونیکی

طراحی بخش الکترونیکی با توجه به نیاز، امکانات موجود، چیدمان متناسب و بکارگیری ارتباط منطقی قطعات آن انجام شد. این بخش با درایور موتور، برد کنترلی آردوینو و اتصال آنها به یکدیگر طراحی صورت گرفت. ارتباط اجزای مجموعه الکترونیکی استفاده شده، به صورت کلی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار (فلوچارت) فرآیند تولید B کد



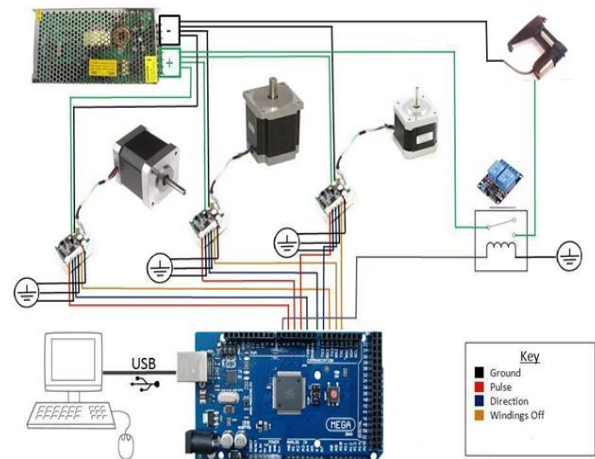
شکل ۹: تعریف پارامترهای خمشی در بین نقاط (P_3, P_2, P_1) ، $L =$ طول، $\alpha =$ زاویه خم، $\theta =$ زاویه قرار و $\beta =$ زاویه دوران صفحه کاری

روابط ریاضی مدلسازی

این بخش نیز در مورد چگونگی استفاده از معادلات ریاضی در فرایند تبدیل را توضیح می‌دهد. همانطور که قبلاً به طور خلاصه ذکر شد، B کد شامل سه پارامتر است که عبارتند از طول خم (L)، زاویه دوران صفحه کاری (β) و زاویه خم (θ). رابطه ۵ برای دریافت اطلاعات L استفاده می‌شود. در این رابطه X ، Y و Z مختصات نقاط شروع و انتهای هر بخش خط را معرفی می‌کند که در آن از محاسبه طول یا مقدار بردار موقعیت استفاده می‌شود (Hamid, 2018).

$$L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در عین حال، رابطه ۶ و ۷ در تولید زاویه دوران صفحه کاری (β) استفاده می‌شود که رابطه ۷ بسط معادله ۶ می‌باشد.



شکل ۷: نقشه مدار الکترونیکی دستگاه سیم خم کن اتومات

بخش کنترل و برنامه نویسی

مدلسازی خمکاری سیم

نرم افزار طراحی (CAD) به عنوان یک اصل برای طراحی فرم های مختلف سیم مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین سایر نرم افزارهای طراحی نیز می‌تواند برای این عملیات استفاده شود (Nasr & Kamrani, 2006). در این بخش یک تئوری تقسیم بندی خطی سه بعدی توسط ژانگ معرفی شده است (Zhang, 2013). در این نظریه، شکل نهایی مورد نظر از سری بخش های ذکر شده، بوسیله حمید و ایتو به دقت تشریح شده است (Hamid & Ito, 2016). بخش های مختلف خطوط توسط اسپیکل و همکاران که به عنوان بخشی از یک خط، شامل هر نقطه و خطوط بین نقاط شروع و پایان می باشد (Liu & Spiegel, 1999). به عنوان مثال، اگر شکل هدف یک منحنی است، بنابراین منحنی از چندین قسمت از خطوط ساخته شده است. دلیل این رویکرد این است که مختصات XYZ برای هر نقطه در این قسمت از خط می‌تواند برای تولید B کد اصلاح شود. در چنین حالتی داده ها باید فیلتر و در نهایت برای فرایند تغییر، بیان شوند (Hamid & Ito, 2016). در این تحقیق، استفاده از روش اول (CAD) به جای آن ارائه و تدوین شده است (شکل ۸).

تولید کد مخصوص خم کاری (B-Code)

در این بخش چارچوب کلی برای تولید داده های B کد بیان می‌شود. در نقطه شروع با تعریف هر پارامتر (L ، β ، θ) آغاز و پس از آن رابطه ریاضی مورد استفاده برای فرایند تبدیل معرفی می‌شود. در این مکانیزم، سه پارامتر کنترل خم کردن برای دستگاه معرفی شده، طول خم (L)، زاویه دوران (β) و زاویه خم (θ) شناخته شده است (Hamid et al., 2018) (شکل ۹).

$$\Delta L = \frac{\pi r f t \varphi}{360} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

ΔL : تغییر مکان انتقال سیم (mm)

r: شعاع غلتک (mm)

f: فرکانس (Hz)

t: زمان (s)

φ : تغییر زاویه در هر پله (درجه).

حرکت دورانی حول محور انتقال سیم

معادله تغییر مکان زاویه‌ای صفحه کاری (سه بعدی) با توجه به ابعاد نسبت چرخنده انتقال قدرت و همچنین میزان فرکانس ورودی درایور در زمان مشخص شده طراحی گردید (رابطه ۱۲).

$$\Delta\beta = \frac{f t \varphi Z_1}{2 Z_2} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$\Delta\beta$: تغییر مکان زاویه ای چرخنده متحرک (درجه)

f: فرکانس (Hz)

t: زمان (s)

φ : مقدار تغییر زاویه در هر step (درجه)

Z_1 : تعداد دندانه های چرخنده محرک

Z_2 : تعداد دندانه های چرخنده متحرک

حرکت دورانی واحد خم کن سیم

معادله تغییر مکان زاویه ای صفحه کاری (سه بعدی) با توجه به ابعاد نسبت چرخنده انتقال قدرت و همچنین میزان فرکانس ورودی درایور در زمان مشخص شده طراحی گردید (رابطه ۱۳).

$$\Delta\psi = \frac{f t \varphi Z_1}{2 Z_2} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$\Delta\psi$: تغییر مکان زاویه ای واحد خم کن سیم (درجه)

f: فرکانس (Hz)

t: زمان (s)

φ : مقدار تغییر زاویه در هر step (درجه)

Z_1 : تعداد دندانه های چرخنده محرک

Z_2 : تعداد دندانه های چرخنده متحرک

حرکت دورانی خم کن سیم نسبت به تکیه گاه

با توجه به اینکه محور خم کن و تکیه گاه سیم، خارج از مرکز دوران قرار دارند بنابراین با استفاده از قانون سینوس ها و کسینوس ها مقدار زاویه بین سیم و امتداد خم (α) نسبت به زاویه دوران چرخنده (ψ) محاسبه می گردد. در شکل ۱۰ چرخنده خم کن حول مرکز O دوران می کند و شفت خم کن نسبت به مرکز دوران چرخنده زاویه (ψ) ایجاد می کند. تکیه گاه سیم برای خم کردن در محدوده مشخصی خارج از مرکز دوران، قابل تنظیم می باشد. مرکز نازل تکیه گاه، نقطه D می باشد که به

طول بردارهای عمود بر سطح انتهایی و صفحه دوران را قبل از خم شدن محاسبه می کند (Masood et al., 2015). اولین زاویه چرخش (β_1) همیشه صفر است، زیرا مکانیزم خمش و دوران در طول عملیات خم شدن اول، هنوز در حالت عادی است.

$$\beta_i = \arccos \left(\frac{P_i \cdot P_{i+1}}{\|P_i\| \|P_{i+1}\|} \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\beta_i = \arccos \left[\frac{A_i A_2 + B_i B_2 + C_i C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

از آنجایی که:

$$A_1 = (y_i - y_{i-2})(z_{i-1} - z_{i-2}) - (y_{i-1} - y_{i-2})(z_i - z_{i-2})$$

$$A_2 = (y_{i+1} - y_{i-1})(z_i - z_{i-1}) - (y_i - y_{i-1})(z_{i+1} - z_{i-1})$$

$$B_1 = (x_{i-1} - x_{i-2})(z_{i+1} - z_{i-1}) - (x_i - x_{i-2})(z_{i-1} - z_{i-2})$$

$$B_2 = (x_i - x_{i-1})(z_{i+1} - z_{i-1}) - (x_{i+1} - x_{i-1})(z_i - z_{i-1})$$

$$C_1 = (x_i - x_{i-2})(y_{i-1} - y_{i-2}) - (x_{i-1} - x_{i-2})(y_i - y_{i-2})$$

$$C_2 = (x_{i+1} - x_{i-1})(y_i - y_{i-1}) - (x_i - x_{i-1})(y_{i+1} - y_{i-1})$$

در نهایت، روابط (۸)، (۹) و (۱۰) برخی از فرمول های

ریاضی در تولید زاویه خم (A) را توصیف می کند. رابطه (۸) و

(۹) از لحاظ شرایط تعریف یکسان هستند، که رابطه (۱۰) نسخه

بسط داده شده رابطه (۸) است. در این برآورد، در ابتدا، طول بردار

در دو بخش بعدی محاسبه شده و زاویه (α) موجود بین این دو

بردار از طریق مجموع نقاط این بردار ها تعیین می شود، همانطور

که در رابطه (۸) نشان داده شده است. معکوس کسینوس رابطه

(۸) زاویه (α) را ایجاد می کند همان گونه که در رابطه (۱۰)

نمایش داده شده است باید از مقدار ۱۸۰ درجه کاسته شود تا

مقدار زاویه خم (θ) بدست آید. در اینجا واحد (β) و (α) درجه

می باشد، نه رادیان.

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{S_i \cdot S_{i+1}}{\|S_i\| \|S_{i+1}\|} \right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\alpha_i = \arccos \left[\frac{m_1 m_2 + n_1 n_2 + q_1 q_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + q_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 + n_2^2 + q_2^2}} \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

از آنجایی که:

$$m_1 = (x_{i+1} - x_i); n_1 = (y_{i+1} - y_i); q_1 = (z_{i+1} - z_i)$$

$$m_2 = (x_{i+2} - x_{i+1}); n_2 = (y_{i+2} - y_{i+1}); q_2 = (z_{i+2} - z_{i+1})$$

در نهایت:

$$\theta_i = 180^\circ - \alpha_i \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

طراحی سامانه کنترلی

حرکت انتقالی سیم

معادله تغییر مکان انتقالی سیم با توجه به ابعاد قطر غلتک

انتقال دهنده و همچنین میزان فرکانس ورودی درایور در زمان

مشخص شده طراحی گردید (رابطه ۱۱).

در عملیات CNC^۱ انجام شد. ابعاد دقیق حرکت مکانیزمها توسط ابزار اندازه گیری (کولیس / زاویه سنج) ثبت می شود. تغییر مکان ابعاد مکانیزمهای کشنده سیم، تغییر صفحه کاری (سه بعدی) و خم کن با توجه به متغیرهای زمان و فرکانس مورد آزمون قرار گرفت. تست ۶ بار در مسیرهای رفت و برگشتی (چپگرد و راستگرد) انجام می شود تا مقدار خطای به وجود آمده نسبت به تغییر مکان طراحی شده به دست آید و سپس کالیبره کردن تنظیمات انجام شود (Ambrizal et al., 2017). با توجه به دقت موتورهای پله ای (۱/۸ درجه در هر step) مقادیر بسامدهای مختلف در محدوده مشخص شده هر موتور داده شد (هر 2Hz معادل یک step). همچنین بدلیل افت فرکانس در مدار، مقدار فرکانس در قسمت ورودی درایور توسط مولتی متر اندازه گیری شد. آزمون کالیبراسیون برای مکانیزمهای زیر انجام شد:

- حرکت انتقالی سیم
- حرکت دورانی حول محور انتقال سیم
- حرکت دورانی واحد خم کن سیم (بدون سیم)
- حرکت دورانی خم کن سیم (با سیم)
- حرکت رفت و برگشت خم کن دو طرفه

برنامه نویسی

برنامه نویسی مربوط به پروژه دستگاه سیم خم کن اتومات به یک بخش اصلی و چهار بخش فرعی تقسیم شده است. بخشهای فرعی هدایت و کنترل موتورهای مختلف را برعهده دارند و بخش اصلی به چهار بخش فرعی اتصال پیدا می کند که باعث به حرکت درآمدن موتورها و در نهایت باعث خمش سیم ها خواهد شد (شکل ۱۱). لازم به ذکر است که در این پروژه از قابلیت های شی گرای (تعریف کلاسها) با زبان ++C در پلتفرم آردوینو استفاده گردید. همچنین در پروژه مذکور از دو نوع موتور پله ای و DC استفاده شد و سعی شد تا با استفاده از کتابخانه ها، محیط مشابهی فراهم شود تا کاربر نهایی که قصد ایجاد خمها را دارد، درگیر پیچیدگی های مربوط به بخشهای فرعی نشود. برای مثال تمامی موتورها، دستوری به نام Run را دارند تا بوسیله آن بتوان موتورها را فاقد از Stepper یا DC بودن به حرکت درآورد.

© WireBender | Arduino 1.8.1
File Edit Sketch Tools Help

```
WireBender BenderMotor.h FeederMotor.h RotatorMotor.h
#include "FeederMotor.h"
#include "RotatorMotor.h"
#include "BenderMotor.h"
#include "BendDirMotor.h"
```

شکل ۱۱: بخش های اصلی و فرعی برنامه نویسی در نرم افزار آردوینو

اندازه b از مرکز دوران فاصله دارد. زاویه سیم خم شده (α) نسبت به نقطه تکیه گاه D تعیین می گردد. با توجه به قضایای سینوس ها و کسینوس ها می توان رابطه دینامیک میان زاویه دوران چرخنده و زاویه خمش سیم نسبت به تکیه گاه را بدست آورد:

با استفاده از قضیه کسینوس ها داریم:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos(\psi) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

همچنین با استفاده از قضیه سینوس ها داریم:

$$\frac{c}{\sin(180-\alpha)} = \frac{a}{\sin(\psi)} \rightarrow \frac{c}{\sin(\alpha)} = \frac{a}{\sin(\psi)}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{c \cdot \sin(\psi)}{a} = \frac{c \cdot \sin(\psi)}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos(\psi)}}$$

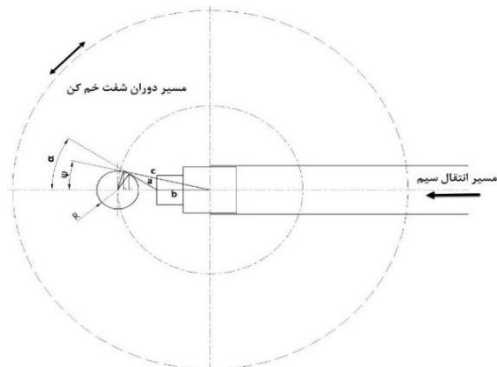
$$\alpha = \arcsin \left[\frac{c \cdot \sin(\psi)}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos(\psi)}} \right] \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

α : تغییر مکان زاویه ای خم کن نسبت به تکیه گاه (درجه)

ψ : تغییر مکان زاویه ای چرخنده متحرک (درجه)

b: فاصله مرکز دوران تا تکیه گاه (mm)

c: فاصله مرکز دوران تا مماس خم کن (mm)



شکل ۱۰: شماتیک واحد خم کن و پارامترهای آن حرکت خم کن دو طرفه

برای بدست آوردن مقدار زمان رفت و برگشت خم کن دو طرفه، از معادله حرکت مقدار تغییر مکان مورد نظر برای قرار گرفتن سیم در مقابل شیار خم کن استفاده شد و کالیبره کردن فاصله و زمان با استفاده از سرعت حرکت بدون بار موتور صورت می گیرد.

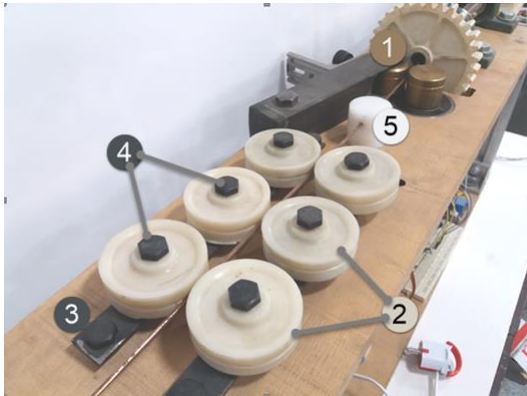
$$\Delta z = V \cdot t \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

همچنین برای یافتن تغییر مکان زاویه ای لازم واحد خم کن به منظور خم کردن از طرف مقابل آن با استفاده از آزمون و خطا مقدار تغییر مکان زاویه ای مورد نیاز بدست آمد. همچنین برای اعمال تغییر مکان زاویه ای با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۵) و با اعمال فرکانس مورد نظر زمان لازم بدست آمد.

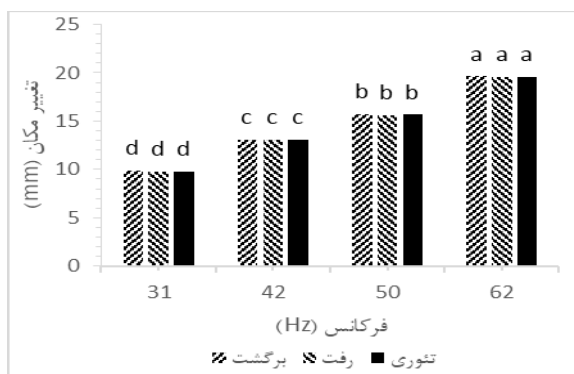
کالیبراسیون

کالیبراسیون برای این آزمایش با اندازه گیری توانایی نرم افزار برای ایجاد خمهای مختلف در اندازه دقیق طراحی اشکال تصادفی

را برای فرکانس‌های دیگر نیز با توجه به رابطه تئوری آن اعمال کرد.



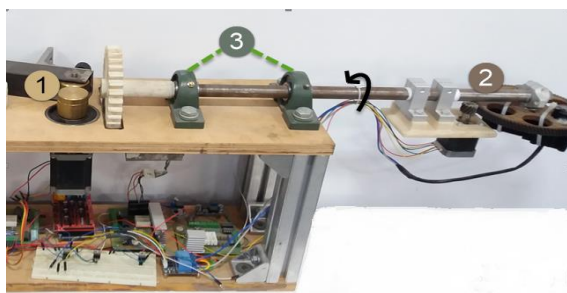
شکل ۱۲: انتقال و صاف کننده سیم؛ (۱) واحد انتقال دهنده، (۲) غلتک، (۳) پیچ تنظیم فاصله، (۴) پیچ تنظیم هرزگرد و (۵) پلی اتیلن



شکل ۱۳: مقایسه تغییر مکان انتقال سیم در فرکانس‌های مختلف (10s)

مکانیزم چرخش سیم

برای ایجاد خم سه بعدی با ثابت کردن چرخش سیم توسط غلتک‌های (۱)، دوران چپگرد و راستگرد بازوی دورانی (۲) بر روی یاتاقان‌ها (۳)، حول سیم صورت می‌گیرد و فرم دهی سیم به منظور خم کاری سه بعدی در مختصات جدید 'XYZ' انجام می‌شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: بازوی دورانی دستگاه برای تغییر مختصات کاری؛ (۱) واحد انتقال دهنده، (۲) واحد خم کن، (۳) بلبرینگ

طرح آماری و تحلیل داده‌ها

اثر پارامترهای فرکانس در چهار سطح (۳۱، ۴۲، ۵۰ و ۶۱ هرتز)، فاصله خم کن تا تکیه گیاه در دو سطح (۱/۷ و ۲/۳ میلی متر) و زمان در چهار سطح (۵، ۷، ۸ و ۱۰ ثانیه) به عنوان متغیرهای مستقل بر روی تغییر مکان خطی و زاویه‌ای سیم به عنوان متغیرهای وابسته ارزیابی گردید و عملکرد ماشین ساخته شده با مدل‌های نرم افزاری مورد مقایسه قرار گرفت. آنالیز آماری بوسیله نرم افزار SAS و در شش تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

طراحی و ساخت سیم خم کن

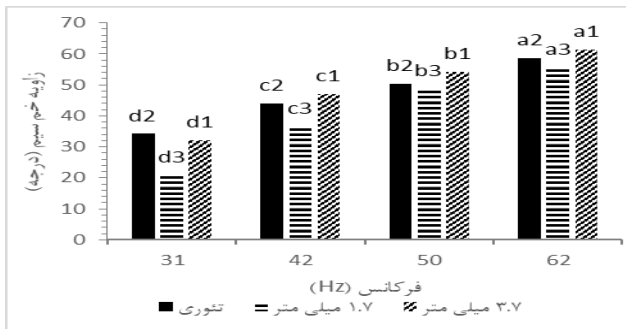
دستگاه سیم خم کن اتوماتیک یک نمونه اولیه از دستگاه خم کن سه بعدی با سرعت بالا و به طور اتوماتیک به منظور عملیات خم کاری سیم‌های فلزی طراحی و ساخته شد که قادر به خمکاری اشکال دو بعدی یا سه بعدی می‌باشد. با توجه به مکانیزم‌های مورد نیاز برای خم کن سه بعدی متناسب با اندازه سیم خم، طراحی و ساخته شد که ابعاد این خم کن بعد از بررسی‌های لازم تعیین شد و برای مرحله ساخت آماده سازی گشت. دستگاه نقش ستون فقرات کل سازه را برعهده داشت و تمام اجزاء دستگاه بر روی شاسی نصب شده‌اند. برای طراحی و ساخت مواردی همچون تحمل بیشترین میزان وزن و تنش، سبکی، کم حجم بودن، سهولت در پیاده سازی، در نظر گرفته شد. همچنین دستگاه خم کن سه بعدی، محل هر یک از اجزاء مکانیکی و الکترونیکی براساس جایگاه هریک از مکانیزم‌ها بر روی دستگاه در نظر گرفته شده است و اقدامات لازم برای حفظ تعادل و لرزش کم نیز در این قسمت حائز اهمیت بوده است.

مکانیزم انتقال و صاف کن سیم

در این مکانیزم، واحد انتقال دهنده سیم (۱) سیم از کلاف کشیده و از میان غلتک‌های (۲) عبور می‌دهد که شیاری بر روی آن‌ها ایجاد شده است. فاصله غلتک‌ها توسط پیچ و مهره (۳) و با استفاده از پیچ و مهره (۴) میزان هرزگردی آنها تنظیم می‌شود (شکل ۱۲).

همانطور که در شکل (۱۳) نمایش داده شده است میانگین تغییرات مکان در چهار سطح فرکانس در زمان ثابت نمایش داده شده است. به دلیل یکسان بودن نتایج مقایسه میانگین تغییر مکان‌های حرکت رفت و برگشتی و تئوری می‌توان معادله تئوری

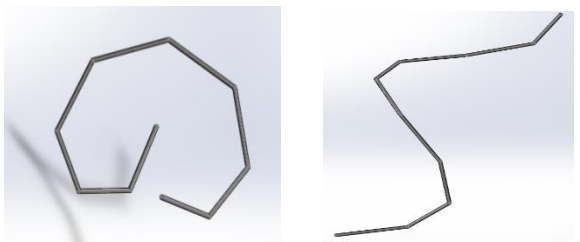
تفاوت معناداری نداشته است. اما نتایج بدست آمده در شکل (۱۷) نشان می‌دهد که با تغییرات فرکانس، اختلاف تغییر مکان زاویه‌ای عملی و تئوری (با سیم) به دلیل پیچیده و حساس بودن رابطه نهایی ۱۵ و کم بودن دقت تنظیمات فواصل مختلف به وجود آمده است و همچنین با افزایش فاصله خم کن تا تکیه گاه که نیروی کمتری اعمال می‌کند، مقدار خطای تاثیرات افت فرکانس اعمالی ایجاد شده کمتر شده است.



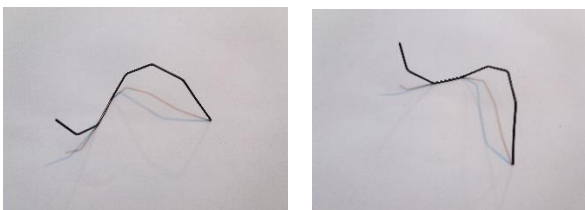
شکل ۱۷: مقایسه تغییرات زاویه خم سیم نسبت به فرکانس در سه سطح زمان و دو سطح فاصله خم با تئوری

مدل پیشنهادی برای پشتیبان گیاه

با بررسی انواع مختلف پشتیبان های گیاه عوامل مختلفی از جمله پیوستگی در طول پشتیبان برای رشد گیاه، عدم استفاده از اتصالات جوشی و جنس مناسب، مدل پیشنهادی برای پشتیبانی کردن از گیاه به منظور نگه داشتن گیاه بر روی پشتیبان ارائه گردید. با الگو گرفتن از طرح پیشنهادی میدر (Maeder, 2009) یک مسیر مارپیچ همراه با زوایای خم در نظر گرفته شد (شکل ۱۸-الف) و الگوریتم‌های مربوط به طراحی و همچنین طول، زاویه دوران و زاویه خمش با استفاده از مختصات نقاط خمش تعریف شد. در نهایت پس از استخراج کدهای مربوط خم کاری مدل نهایی به وسیله دستگاه سیم خم کن اتومات ایجاد شد (شکل ۱۸-ب).



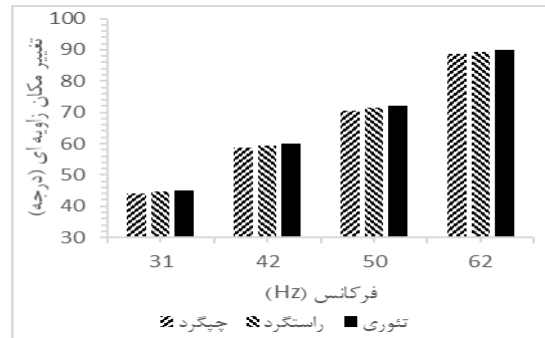
(الف)



(ب)

شکل ۱۸: طراحی مدل نرم افزاری پشتیبان گیاه (الف) و ساخت مدل پشتیبان گیاه با دستگاه سیم خم کن اتومات (ب).

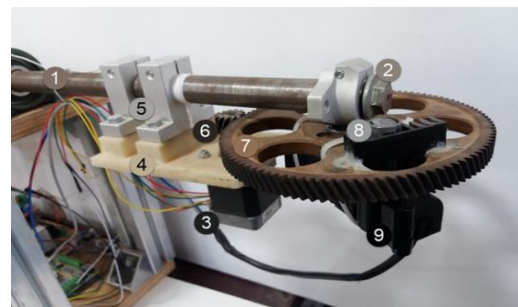
در شکل (۱۵) مقایسه ستونی میانگین تغییر مکان زاویه‌ای حرکت چپگرد و راستگرد و تئوری در چهار سطح فرکانس نمایش داده شده است. با تغییرات فرکانس اختلاف تغییر مکان زاویه‌ای عملی و تئوری تفاوت معنی دار نبوده است. ثابت بودن تغییر مکان زاویه‌ای عملی و تئوری در فرکانس های مختلف یکی از ویژگی های دستگاه‌های CNC به منظور فراهم کردن دقت بالا می باشد.



شکل ۱۵: نمودار مقایسه ای تغییر مکان زاویه ای در فرکانس های مختلف (5s)

مکانیزم خم کن سیم

برای واحد خم کن دستگاه ابتدا سیم از طریق لوله انتقال دهنده (۱) به سمت کلگی دستگاه انتقال یافته و سپس دهانه خروجی (۲) در هنگام عبور سیم به اندازه‌ای که لقی سیم و همچنین نیروی اصطکاکی در دهانه به حداقل برسد تنظیم می‌شود. همچنین علاوه بر اندازه قطر دهانه می‌توان زاویه لبه خروجی را به منظور ایجاد زوایای کلی کار، تنظیم نمود. پس از خروج سیم با استفاده از موتور پله‌ای (۳) که با نگهدارنده موتور (۴) و اتصالات (۵) بر روی لوله انتقال سیم (۱) ثابت نگه داشته شده است، با استفاده از دو چرخنده محرک (۶) و هرزگرد (۷) انتقال نیرو صورت می‌گیرد. همچنین با استفاده از شفت خارج از مرکز (۸) بر روی چرخنده هرزگرد (۷) که با استفاده از موتور DC (۹) حرکت رفت و برگشتی را به منظور برخورد و یا عدم برخورد با سیم ایجاد می کند، خم کاری صورت می‌گیرد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: مکانیزم خم کن سیم: (۱) نازل انتقال دهنده سیم (۲) تکیه گاه، (۳) موتور پله ای، (۴) نگهدارنده موتور، (۵) SKF (۶) چرخنده محرک، (۷) چرخنده محرک (۸) خم کن (۹) موتور DC

در واحد خم کن دستگاه (بدون سیم) تغییر مکان زاویه‌ای مشابه با واحد انتقال و چرخش حول سیم، با مدل طراحی شده

نتیجه‌گیری

بودن رابطه سینماتیکی آن، تفاوت معناداری وجود داشته که با افزایش فرکانس این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله خم کن تا تکیه گاه ($1/7$ و $2/3$ میلی متر) در طول زمان (5 ، 7 ، 8 و 10 ثانیه)، خطای آزمایش افزایش می‌یابد. به طور کلی، دستگاه سیم خم کن اتومات ساخته شده در این پژوهش فرم‌های مختلف، پیچیده و کاربردی پشتیبان گیاه را با دقت و سرعت بالایی ایجاد کرده و بهینه‌سازی هر کدام از فرم‌ها را برای رشد گیاه فراهم می‌کند.

نتایج آزمایش روی دستگاه سیم خم کن اتومات نشان داد که با افزایش فرکانس در چهار سطح (31 ، 42 ، 50 و 61 هرتز) بر روی واحدهای انتقال، چرخش حول سیم (سه بعدی) و خم کن بدون سیم تفاوت معناداری با مدل طراحی شده نداشته است. در واحد خم کن با سیم، میان مدل طراحی شده و خم شده بوسیله دستگاه بدلیل افت فرکانس حاصل از افزایش گشتاور و همچنین پیچیده

REFERENCES

- Ambrizal, N. H. B., A. Farooqi, O. I. Alsultan and N. B. Yusoff (2017). "Design and Development of CNC Robotic Machine Integrate-able with Nd-Yag Laser Device." *Procedia engineering* 184: 145-155.
- Baragetti, S. (2006). "A theoretical study on nonlinear bending of wires." *Meccanica* 41(4): 443-458.
- Bork, S. A. (1989). Adjustable plant support. United States Patents. Patent No: US Patent, 4,860,489 A.
- Braun, P. (1983). Wire basket, apparatus and method. United States Patents. Patent No: US Patent, 4,403,447 A.
- Calders, K., J. Armston, G. Newnham, M. Herold and N. Goodwin (2014). "Implications of sensor configuration and topography on vertical plant profiles derived from terrestrial LiDAR." *Agricultural and Forest Meteorology* 194: 104-117.
- Fell, D. (2011). Vertical gardening: grow up, not out, for more vegetables and flowers in much less space, Rodale.
- Fernández-Cañero, R., L. P. Urrestarazu and K. Perini (2018) ertical Greening Systems: Classifications, Plant Species, Substrates. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability, Elsevier*: 45-54.
- Foreman, H. R. (1997). Plant support, . United States Patents. Patent No: US Patent, 5,595,019 A.
- Geiger, A. and P. Bruckmann (1977). Wire support system for training hop vines. United States Patents. Patent No: US Patent, 4,050,187 A.
- Glamos, J. E. (1992). Plant supports with rigidly attached helically coiled support member. United States Patents. Patent No: US Patent, 5,174,060 A.
- Gunderman, J. E., J. E. Gunderman, J. R. Gunderman and G. W. Hollenbeck (2005). Wire cage for nursery items. United States Patents. Patent No: US Patent, 6,895,712 A.
- Hamid, R. A. and T. Ito (2016). "3D prosthodontics wire bending mechanism with a linear segmentation algorithm." *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*: 33-46.
- Hamid, R. A. and T. Ito (2018). "Integration of CAD/CAM in developing the CNC dental wire bending machine." *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 12(3): JAMDSM0079-JAMDSM0079.
- Hart, R. M. (2011). Vertical Vegetables & Fruit: *Creative Gardening Techniques for Growing Up in Small Spaces*, Storey Publishing.
- Lambertini, A., J. Leenhardt and M. Ciampi (2007). *Vertical gardens*, Verba Volant.
- Liu, J. and M. R. Spiegel (1999). Mathematical handbook of formulas and tables, McGraw-Hill.
- López-Rodríguez, G., J. Pérez-Esteban, J. Ruiz-Fernández and A. Masaguer (2016). "Behavior and evolution of sustainable organic substrates in a vertical garden." *Ecological engineering* 93: 129-134.
- Maeder, P. (2009). Spiral plant support. United States Patents. Patent No: US Patent, 7,624,534 A.
- Masood, A., R. Siddiqui, M. Pinto, H. Rehman and M. A. Khan (2015). "Tool path generation, for complex surface machining, using point cloud data." *Procedia CIRP* 26: 397-402.
- Nasr, E. A. and A. Kamrani (2006). IGES standard protocol for feature recognition CAD system. Rapid Prototyping, Springer: 25-62.
- Pérez-Urrestarazu, L. and M. Urrestarazu (2018). Vertical Greening Systems: Irrigation and Maintenance. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability, Elsevier*: 55-63.
- Rocka, A. J. (2000). Foldable plant support structure and system. United States Patents. Patent No: US Patent, 6,088,956 A.
- Warren, C. C. and A. Saralegui (2013). Plant support system United States Patents. Patent No: US Patent, 13/681,070 A
- YE, Z.-j., M.-h. CHEN, R.-s. LU, Q. YANG and B. YAO (2009). "Research on wire bending technique [J]." *Forging & Stamping Technology* 2.
- Zhang, W. (2013). "Research of 3D virtual design and automated bending of oral orthodontic archwire." *Int. J. Adv. Comput. Technol* 5(8): 741-749.