

# بهینه سازی نیروی گیره بندی در سیستم قطعه کار - فیکسچر تحت فرآیند ماشینکاری با استفاده از شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک

محسن حامدی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

طاہر از دست

دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۱/۷/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۸/۱۶، تاریخ تصویب ۸۴/۱۰/۱۰)

## چکیده

در طراحی فیکسچر برای عملیات ماشینکاری، برنامه گیره بندی یک مساله پیچیده و غیر خطی است که مواردی چون تماس اصطکاکی قطعه کار و کلمپها را در بر می گیرد. در این میان پارامترهایی چون سطح تماس، وضعیت تماس، نیروی گیره بندی، سایش و صدمه دیدن قطعه کار، وضعیت تماس و تغییر شکل قطعه کار از موارد قابل بررسی است. یافتن نیروی بهینه گیره بندی یکی از مسائل بسیار مطرح در زمینه طراحی و تحلیل فیکسچر ها است که نیاز به تحقیق و بررسی دارد. نیروی بهینه گیره بندی مقدار نیرویی است که ضمن آسیب نرساندن به قطعه کار و اجزاء فیکسچر تماس بین این دو را در وضعیت مناسبی نگهداشته و باعث خنثی سازی نیروی ماشینکاری می شود. به عبارت دیگر تغییر شکل و تنش بیش از حد در قطعه کار ایجاد ننماید. در این مقاله یک سیستم ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک که از روش تحلیل اجزاء محدود نیز بهره می گیرد به بحث گذاشته شده است. یک مدل اصطکاکی از سیستم قطعه کار- فیکسچر تحت اثر نیروهای ماشینکاری و گیره بندی با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل شده است. نتایج این تحلیل برای آموزش و تست یک شبکه عصبی به کار گرفته شده است. کار شبکه عصبی شناسایی الگوی موجود بین نیروهای گیره بندی و وضعیت تماس و حداکثر تغییر شکل کشسانی قطعه کار است. با استفاده از رابطه شناسایی شده توسط شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک برای تعیین میزان بهینه نیروی گیره بندی به کار رفته است. مزیت این مطالعه نسبت به سایر پژوهشهای انجام شده تعیین و نمایش وضعیت دقیق تماس بین قطعه کار و اجزاء فیکسچر است. نتایج به دست آمده از این مطالعه در اتوماسیون طراحی فیکسچرها به کمک کامپیوتر و برنامه ریزی فرآیند به کمک کامپیوتر کاربرد دارد.

**واژه های کلیدی:** فیکسچر، نیروی گیره بندی، بهینه سازی، شبکه های عصبی، الگوریتمهای ژنتیک

## مقدمه

فیکسچرها برای نگهداری قطعه کار و حمایت آن در برابر نیروهای ماشینکاری، از موقعیت دهنده ها و کلمپها استفاده می شود. موقعیت دهنده ها بیشتر درجات آزادی قطعه کار را می گیرند و بقیه درجات آزادی توسط اعمال نیروی گیره بندی مهار می گردد. معمولاً و به ویژه در محیط های سنتی، اعمال نیروی گیره بندی بر اساس تجربه بوده و احتمال دارد که ماشینکارها برای اطمینان بیشتر، نیروی بیش از حد نیاز وارد نمایند. اعمال نیروی اضافی به خصوص در قطعاتی که تolerانس دقیقی دارند می تواند دقت اندازه نهایی قطعه کار را از بین ببرد. از سوی دیگر اگر نیروی گیره بندی کمتر از حد مورد نیاز باشد ممکن است قطعه کار از جای خود لغزیده و فیکسچر کار اصلی خود را انجام ندهد. بنا براین تعیین نیروی بهینه گیره بندی برای نگهداری قطعه کار امری ضروری است.

فیکسچر ابزاری است که قطعه کار را در موقعیت صحیح قرار داده و در حین عملیات ماشینکاری، مونتاژ، بازرسی و یا عملیات حرارتی آن را در مقابل نیروهای وارده حمایت می کند. در نتیجه باعث می شود تکرار پذیری همراه با دقت در تولید محصول فراهم شود. در فرآیند تولید محصول جدید، طرح ریزی برنامه نگهداری قطعه کار یا طراحی فیکسچر پس از برنامه ریزی فرآیند ساخت و تولید انجام می شود. در برنامه ریزی فرآیند، مشخصات هندسی، خواص مواد، ماشینهای مورد استفاده، ابزار، پارامترهای ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری و مشخصات مواد اولیه مشخص شده است. برنامه های نگهداری قطعه کار شامل طراحی فیکسچر اگر نامناسب یا ناقص باشند می توانند موجب تغییر شکل پلاستیک و یا الاستیک (بیش از حد) در قطعه کار شده و با افزایش ضایعات هزینه های تولید را افزایش دهند. در

Hamedi و همکاران همچنین [۱۰] روش اجزاء محدود را برای آنالیز و طراحی سیستم فیکسچر-قطعه کار به کار برده اند. آنها برای مدلسازی تماس بین اجزای فیکسچر و قطعه کار از المانهای Point-to-Point (گره به گره) استفاده کرده اند. همچنین بر روی اثر اصطکاک بین کلمپها و قطعه کار بر پایداری قطعه کار و تغییر شکل آن تحقیق کرده اند.

در این مقاله برای مدلسازی و تحلیل تماس سیستم قطعه کار- فیکسچر نرم افزار ANSYS 5.4 به کار رفته است و وضعیت تماس اجزای فیکسچر با قطعه کار تحت اثر نیروهای ماشینکاری و نیروی گیره بندی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه برای تعیین کمترین نیروی گیره بندی، شبکه های عصبی (نرم افزار Easy NN) و الگوریتم ژنتیک (نرم افزار GOAL) به کار رفته است تا ضمن تامین پایداری قطعه کار، تغییر شکل در قطعه کار نیز حداقل گردد.

### مدلسازی قطعه کار و اجزای فیکسچر

از آنجا که در مدلسازی تعامل بین اجزای فیکسچر و قطعه کار به دست آوردن تغییر شکل اجزای مختلف سیستم قطعه کار- فیکسچر مد نظر است، روش اجزای محدود (FEM) ابزار مناسب و قدرتمندی برای این امر به شمار می رود. از طرفی چون ناحیه تماس بین قطعه کار و اجزای فیکسچر معمولاً کوچک است، برای افزایش دقت بررسی، ناحیه تماس را به صورت نقطه ای در نظر می گیرند [۸]. بنا براین در این پژوهش برای مدلسازی تماس بین قطعه کار و اجزای فیکسچر از المان گره به گره استفاده می شود. به کار گیری این المان نسبت به دیگر المانهای تماسی از جمله سطح به سطح بار محاسباتی کمتری دارد و همگرایی سریعتر و سهل تر مساله را به همراه دارد. ضمناً بررسی پاسخها با سرعت و سهولت بیشتری قابل انجام است که باعث می شود رفتار ناحیه تماس با دقت بیشتری قابل مطالعه باشد.

### متغیرهای المان گره-به-گره

متغیرهای المان تماسی گره به گره عبارتند از:  
۱- سختی نرمال ( $K_n$ )<sup>۳</sup> که سختی المان تماسی را در جهت عمود بر سطح تماس نشان می دهد و مقدار تخمینی آن از رابطه (۱) محاسبه می شود [۱]:

$$K_n = \frac{3EI}{L^3} \quad (1)$$

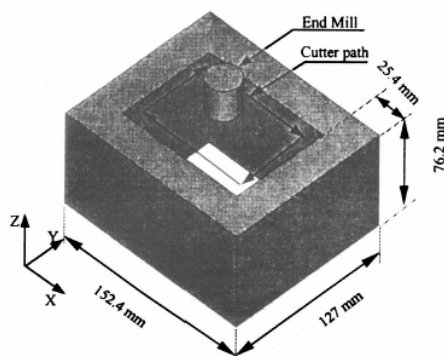
برای بهینه سازی نیروی کلمپ و همچنین مدلسازی تعامل بین قطعه کار و اجزای فیکسچر، تاکنون تحقیقات و پژوهشهای زیادی صورت گرفته است. Hamedi [۱] روشی را برای بررسی کیفیت تماس قطعه کار و اجزای فیکسچر ارائه داده است که در آن میزان سختی کلمپها و اثر آن بر روی سیستم فیکسچرینگ را مدلسازی کرده است. Wang و همکاران [۲] روشهای تحلیلی و تکنیکهایی را برای توسعه برنامه هوشمند نگهداری قطعه کار (IFS)<sup>۱</sup> ارائه دادند. در این برنامه نیروهای گیره بندی متناسب با نیروهای برشی و موقعیت ابزارهای برشی به منظور داشتن حداقل تغییر شکل قطعه کار تنظیم می شود. Li و Melkote [۳] یک الگوریتم بهینه سازی نیروی گیره بندی و چیدمان فیکسچر را برای قطعه کار درحین عملیات ماشینکاری ارائه داده اند. این مدل بر پایه معادلات نیوتن- اوایلر استوار است که در آن خطای بیشینه موقعیتی در نقطه ماشینکاری را حین عملیات ماشینکاری مینیمم میکند. Jeng و همکاران [۴] الگوریتمی بر این اساس که در سطوح کلمپینگ نباید حرکت مرکز جرم اتفاق بیفتد ارائه نمودند که این روش از رابطه بین نیروهای برشی و گشتاورهای نیروهای کلمپ کمک می گیرد.

برای ارزیابی یک سیستم فیکسچر- قطعه کار ابتدا باید مدل اجزاء محدود آن را حل نمود تا تغییر شکل، تنش و وضعیت تماس قطعه کار و اجزای فیکسچر برای فرآیند بهینه سازی در اختیار باشد. دیگر مطالعات انجام شده نشان می دهد الگوریتمهای ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) برای چنین مسائلی می توانند به کار روند. Chan و Wu [۵] این الگوریتم را برای تعیین پایداریترین چیدمان فیکسچرینگ به کار برده اند. Aoyama و Ishikawa [۶] برای تعیین شرایط گیره بندی بهینه قطعه کار از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده اند.

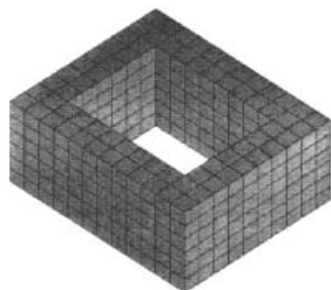
Melkote و Krishnakumar [۷] از GA برای بهینه سازی چیدمان فیکسچر در مسائل دو بعدی استفاده کرده اند. آنها بهینه سازی نیروی گیره بندی را در کار خود در نظر نگرفته اند. De Meter و همکاران [۸] یک GA جدید را برای بهینه سازی به کار برده اند که در آن مختصات فضایی برای موقعیت دهی اجزای فیکسچر به کار برده می شود. Kulankara و همکاران [۹] به کمک GA چیدمان فیکسچر و نیروی گیره بندی را برای یک قطعه کار به طور همزمان، بهینه سازی کرده اند. بهینه سازی آنها بر مبنای کمترین تغییر شکل در قطعه کار بوده است.

### مدل اجزاء محدود

مثالی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است برگرفته از کار Kulankara و همکارانش [۹] است که در شکل (۱) مدل هندسی و مشخصات آن و در شکل (۲) مدل اجزاء محدود آن نشان داده شده است. در جدول (۱) نیز مشخصات مدل اجزاء محدود آن آمده است. در این مثال دیواره های داخلی قطعه کاری به ابعاد  $۷۶/۲ \times ۱۵۲/۴ \times ۱۲۷$  میلی متر و به ضخامت  $۲۵/۴$  میلی متر تحت عملیات فرز کاری با فرز انگشتی قرار دارد که پارامترهای ماشینکاری در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۱: مدل هندسی قطعه کار [۹].



شکل ۲: مدل اجزاء محدود قطعه کار [۹].

جدول ۱: مشخصات مدل اجزاء محدود [۹].

Number of Nodes	756
Type of elements used	8 node brick
Degree of freedom per node	3
Material	Aluminum 390
Young's modulus	71 GPa
Poisson Ratio	0.3

ماکزیمم نیروی ماشینکاری این فرآیند که همان نیروهای اعمال شده در مدل Kulankara است با استفاده از مدل‌های فرآیند فرزکاری [۱۱] قابل محاسبه است که مولفه های مماسی آن  $(F_p)$ ، شعاعی  $(F_q)$  و محوری  $(F_a)$

که در آن  $E$  مدول کشسانی قطعه کار،  $I$  گشتاور ماند سطح مقطع قطعه کار و  $L$  طول المانی از قطعه کار است که المان تماسی بر آن عمود است.

۲- سختی برشی  $(K_s)$  که معرف سختی المان تماسی در جهت مماسی است و مقدار تخمینی آن را می توان از رابطه (۲) محاسبه کرد. [۱]:

$$k_s = \frac{EA}{L} \quad (2)$$

که در آن  $E$  و  $L$  مشابه رابطه قبل و  $A$  سطح مقطع المان قطعه کار است.

۳- ضریب تداخل  $(I_c)$  که میزان نفوذ المان تماسی در داخل قطعه کار را نشان می دهد. این ضریب مقداری منفی است که فاصله بین نود المان تماسی و نود المان قطعه کار را نشان می دهد. بنابراین می توان آن را مشابه یک تغییر شکل اعمال شده به قطعه کار در نظر گرفت به همین دلیل مقاومتی توسط سختی نرمال قطعه کار در مقابل آن ایجاد می شود. این واکنش نیروی نرمالی تولید می کند که از طرف المان تماسی به المان قطعه کار اعمال می شود. همین مفهوم برای شبیه سازی نیروی گیره بندی ناشی از بستن کلمپ به کار می رود به طوری که سختی کلمپ بیشتر یعنی نیروی کلمپ بیشتر معادل مقادیر بزرگتر ضریب تداخل یا نفوذ است.

روش تجربی برای تخمین مقدار  $I_c$  به صورت زیر است [۱]:

- حل مدل با فرض قیدهای جسم صلب ساده،
- به دست آوردن ماکزیمم نیروی عکس العمل در نقاط گیره بندی،
- محاسبه سختی نرمال و برشی المانهای تماسی،
- و در نهایت محاسبه مقدار  $I_c$  از رابطه:

$$I_c = \frac{R_{max}}{K_{ave}} \quad (3)$$

که در آن  $R_{max}$  بیشترین نیروی عکس العمل و  $K_{ave}$  سختی معادل المان تماسی (میانگین سختی نرمال و برشی) است.

۴- وضعیت اولیه تماس  $(S_c)$  بین المانهای قطعه کار و المانهای تماسی که با توجه به فیزیک مساله باید مشخص شود. وضعیت اولیه تماس می تواند به صورت:

- بسته و بدون لغزش (یک)
- بسته ولی لغزنده (دو)
- ویا باز (سه) باشد.

برحسب نیوتن عبارت است از:  $F_p=330.94$ ,  $F_q=398.11$ ,  $F_a=22.84$   
این نیروها به ترتیب در جهت های  $x$  و  $y$  و  $z$  به صورت نشان داده شده در شکل (۳) به گره های ناحیه تماس وارد می شوند به عبارت دیگر سه گره به عنوان نقاط تماس ابزار و قطعه کار در نظر گرفته می شوند.

جدول ۲: پارامترهای ماشینکاری [۹].

Type of operation	End milling
Cutter diameter	25.4 mm
Number of flutes	4
Cutter RPM	500
Feed	0.1016 mm/tooth
Radial depth of cut	2.54 mm
Axial depth of cut	25.4 mm
Radial rake angle	10
Helix angle	30
Projection length	92.07 mm

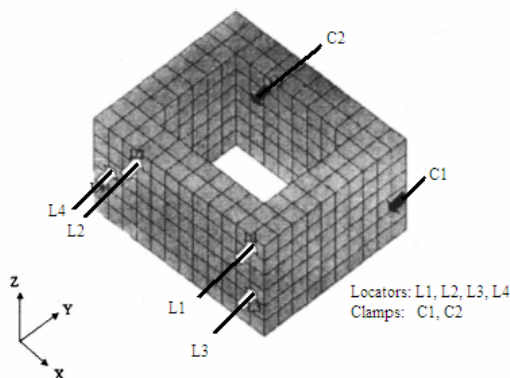
جدول ۳: مختصات نقاط بهینه موقعیت دهی و گیره بندی [۹].

Workholding Element	Coordinates (X, Y, Z) (mm)
Locator 1	(139.7, 0, 63.5)
Locator 2	(38.1, 0, 63.5)
Locator 3	(139.7, 0, 12.7)
Locator 4	(12.7, 0, 38.1)
Clamp 1	(139.7, 127, 38.1)
Clamp 2	(12.7, 127, 25.4)

جدول ۲: پارامترهای ماشینکاری [۹].

Type of operation	End milling
Cutter diameter	25.4 mm
Number of flutes	4
Cutter RPM	500
Feed	0.1016 mm/tooth
Radial depth of cut	2.54 mm
Axial depth of cut	25.4 mm
Radial rake angle	10
Helix angle	30
Projection length	92.07 mm

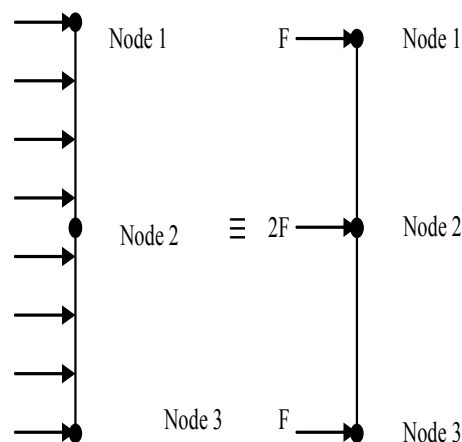
پس در حقیقت از طریق بهینه کردن نیروهای گیره بندی، حداکثر تغییر شکل قطعه کار ۱/۵ برابر کاهش یافته است.



شکل ۴: چیدمان بهینه فیکسچرینگ [۹].

اما نکته قابل توجه این است که Kulankara و همکاران در این مدل، قطعه را با قیددارکردن گره هایی از خود قطعه کار موقعیت دهی و گیره بندی کرده اند و این در عمل چندان واقعی به نظر نمی رسد. روش Hamedi [۱] برای شبیه سازی تماس بین قطعه کار و اجزای فیکسچر با استفاده از المان گره به گره به واقعیت نزدیکتر است. همانطور که در بحث متغیرهای المان گره به گره گفته شد برای شبیه سازی نیروی گیره بندی در این المان از ضریب تداخل ( $I_c$ ) استفاده می شود که مقدار آن منفی است. در ضمن هر چه اندازه قدر مطلق  $I_c$  بیشتر باشد نیروی گیره بندی بیشتر خواهد شد. رابطه بین مقدار تداخل ( $I_c$ ) و نیروی گیره بندی به صورت رابطه زیر بیان شده است [۱].

با توجه به اینکه هدف، فرزکاری چهار دیواره داخلی قطعه کار است پس مسیر حرکت به چهارده مرحله تقسیم می شود که در هر مرحله ابزار نسبت به مرحله قبل به اندازه  $25/4$  mm در جهت مسیر برش جا بجا می شود.

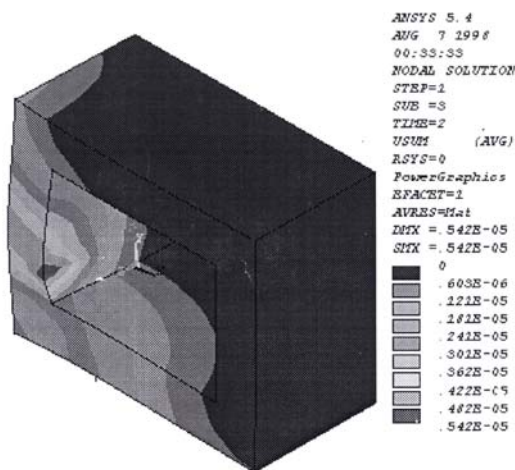


شکل ۳: توزیع نیروهای حاصل از فرزکاری [۹].

### انتخاب نقاط گیره بندی و موقعیت دهی

مختصات نقاط گیره بندی و موقعیت دهی بهینه که توسط Kulankara و همکاران به روش الگوریتم ژنتیک پیدا شده است در شکل شماره (۴) و جدول شماره (۳) آمده است. مقدار بهینه نیروی گیره بندی کلمپ شماره ۱ و نیروی گیره بندی کلمپ شماره ۲ (در شکل (۴)) به دست آمده از همین کار به ترتیب  $F_1=1187/7$  N و

دست آمده است.



شکل ۵: تغییر شکل قطعه کار در مرحله دوازده فرزندکاری.

اما نکته قابل توجه در این مدل سازی عدم رعایت اصول متداول موقعیت دهی و گیره بندی است. به منظور رعایت اصول موقعیت دهی با در نظر گرفتن روش ۱-۲-۳ نقاط جدید موقعیت دهی و گیره بندی به صورت جدول (۴) انتخاب می شود.  $L_1$  تا  $L_6$  موقعیت دهنده ها و  $C_1$  و  $C_2$  گیره بندی ها هستند. کاربرد این روش به پایداری قطعه کار می افزاید چرا که موقعیت دهنده ها ۹ درجه آزادی قطعه کار را گرفته و فقط سه تای آن برای کلمپها می ماند. در حالیکه در روش مقاله فوق موقعیت دهنده ها فقط سه درجه آزادی را می گیرند. در یک فیکسچر خوب حداقل درجه آزادی برای کلمپها باقی می ماند.

جدول ۴: نقاط گیره بندی و موقعیت دهی جدید با توجه به اصل (۱-۲-۳).

Workholding Element	Coordinates (X, Y, Z) (mm)
Locator 1	(38.1, 0, 38.1)
Locator 2	(114.3, 0, 38.1)
Locator3	(152.4, 63.5, 38.1)
Locator4	(12.7, 63.5, 38.1)
Locator5	(127, 12.7, 0)
Locator6	(88.9, 114.3, 0)
Clamp1	(76.2, 114.3, 76.2)
Clamp2	(12.7, 63.5, 76.2)

پس از انتخاب نقاط جدید موقعیت دهی و گیره بندی مجدداً مدل با فرض ضرایب زیر تحلیل می شود:

$$K_n = 225 \times 10^6 \quad K_s = 901 \times 10^6 \quad S_c = 1$$

$$F = k_n (I_c^2 + U_i^2 + 2I_c U_{ny,i})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن  $U_i$  تغییر مکان نهایی نود  $i$  متعلق به المان تماسی روی قطعه کار و  $U_{ny,i}$  تغییر مکان نود  $i$  در جهت وارد شدن نیروی گیره بندی است.

### مدلسازی به کمک المان گره-به-گره

برای مدل سازی واقعی تماس، در محل موقعیت دهنده ها و گیره بندی ها، المانهای تماس از نوع گره به گره تعریف می شود.

با توجه به مشخصات قطعه کار و روابط موجود مقادیر متغیرهای المانهای تماسی به صورت زیر است:

$$K_n = 225 \times 10^6 \quad K_s = 901 \times 10^6$$

شاخص وضعیت اولیه تماس نیز معادل یک قرار داده می شود به این معنی که تماس اولیه اجزای فیکسچر و قطعه کار بسته و چسبیده است. مقدار  $I_c$  با توجه به کار Kulankara و همکاران در حالت بهینه نیروی گیره بندی از رابطه (۴) به دست می آید.

در مورد مسیر ابزار برشی همانطور که قبلاً گفته شد عملیات فرزکاری دیواره های داخلی قطعه کار به چهارده مرحله تقسیم شده است. مقدار تغییر شکل به ازای مقادیر مختلف  $I_c$  (به عبارتی نیروی گیره بندی) محاسبه شده و این نتیجه به دست آمده که بدترین مرحله، مرحله دوازده است چرا که ماکزیمم تغییر شکل قطعه کار در این مرحله روی می دهد. لذا اگر برای مرحله دوازده جواب قابل قبولی (نیروی بهینه) به دست آید می توان گفت که تغییر شکل ایجاد شده در قطعه کار در طول هر چهارده مرحله فرزکاری مینیمم است. بنابراین از این پس برای ساده سازی، مرحله دوازدهم از چهارده مرحله ماشینکاری را انتخاب کرده و به کمک المان تماسی گره به گره و دانستن مقدار متغیرهای آن، مخصوصاً مقدار  $I_c$  که بیانگر نیروی گیره بندی است، مدل در مرحله دوازده فرزکاری با اطلاعات زیر حل می شود.

$$K_n = 225 \times 10^6 \quad K_s = 901 \times 10^6 \quad S_c = 1$$

$$I_{c1} = -6.96 \times 10^{-6} \text{ m} \quad I_{c2} = -6.22 \times 10^{-6} \text{ m}$$

نتیجه این تحلیل در شکل (۵) دیده می شود. همانطور که مشاهده می شود ماکزیمم تغییر شکل قطعه کار برابر با  $10^{-6} \times 5/42 \mu\text{m}$  است که در محدوده مقدار  $3/1 \mu\text{m}$  (مقدار حداقل) و  $5/68 \mu\text{m}$  (مقدار حداکثر) به

الگوریتمهای ژنتیک برای تعیین مقدار نیروی بهینه گیره بندی در اینجا مطرح می شود. برای این کار در این فضای بی نهایت بزرگ مثال را پنجاه وشش بار با  $I_c$  های مختلف حل کرده و در هر بار حل، خروجی های زیر از جوابها گرفته می شود:

- حداکثر تغییر شکل قطعه کار
  - حداکثر تنش ایجاد شده در قطعه کار
  - وضعیت تماس شش موقعیت دهنده و دو کلمپ
- برای یافتن رابطه نیروی گیره بندی با وضعیت تماس، تنش معادل حداکثر (- به قرارداد درجه آزادی در فیکسچرینگ دقت شود که حرکت در جهت  $X+$  و  $X-$  و یا چرخش  $CW$  و  $CCW$  دو درجه در نظر گرفته می شود.) و حداکثر تغییر شکل ایجاد شده در قطعه کار، شبکه های عصبی به کار می رود. با توجه به ۵۶ نمونه حل شده از مدل، مقادیر  $I_{c1}$  و  $I_{c2}$  ورودی و وضعیت تماس، تنش معادل حداکثر و حداکثر تغییر شکل ایجاد شده خروجیهای شبکه عصبی هستند. نکته قابل ذکر در مورد وضعیتهای تماسی این است که چون در این ۵۶ نمونه وضعیت، تماس موقعیت دهنده ها با قطعه کار ثابت بوده و فقط وضعیت تماس گیره بندی ها تغییر می کند پس فقط وضعیت تماس گیره بندی ها به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود ( $N_8, N_7$ ). پس شبکه عصبی که باید تربیت شود دارای دو ورودی و چهار خروجی به صورت زیر است:

- ورودی ها: ( $I_{c1}$ ) مقدار تداخل برای گیره بندی اول و ( $I_{c2}$ ) مقدار داخل برای گیره بندی دوم.
- خروجیها: ( $N_7$ ) وضعیت تماس کلمپ اول، ( $N_8$ ) وضعیت تماس کلمپ دوم، ( $D_{max}$ ) حداکثر تغییر شکل ایجاد شده در قطعه کار و ( $S_{max}$ ) تنش معادل حد اکثر ایجاد شده در قطعه کار

### یافتن شبکه عصبی مطلوب و آموزش آن

در این تحقیق نرم افزار شبکه عصبی Easy NN به کار گرفته شد. در شروع یک شبکه عصبی یک لایه ای با پنج گره انتخاب می شود. شرط توقف یادگیری<sup>۷</sup> به گونه ای تعریف می شود که اگر میانگین همه خطاها به زیر ۰/۰۵ رسید، یادگیری متوقف گردد.

در ضمن از بین ۵۶ نمونه حل شده ۴۹ نمونه به یادگیری و ۷ نمونه به تست کردن<sup>۸</sup> اختصاص داده می شود. به این معنی که شبکه با ۴۹ نمونه آموزش ببیند و سپس برای

برای تخمین قدر مطلق مقدار  $I_c$  پس از حل مدل با فرض قیدهای جسم صلب تحت نیروهای فرزکاری و به دست آوردن ماکزیمم عکس العمل در نقاط گیره بندی ( $R_{max}$ ) و محاسبه  $K_{ave}$  مقدار  $I_c$  از رابطه زیر به دست می آید:

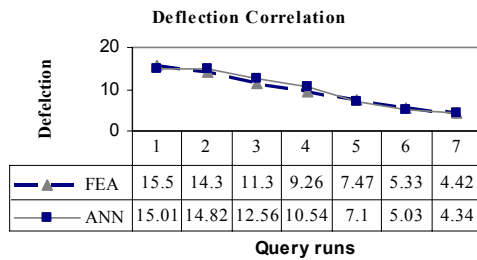
$$\left. \begin{aligned} R_{Max} &= 855.95 \text{ N} \\ K_{ave} &= \frac{k_n + k_s}{2} = 563 \times 10^6 \text{ N/m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$I_c = \frac{R_{Max}}{k_{ave}} = \frac{855/95}{563 \times 10^6} \Rightarrow I_c = 1.52 \times 10^{-6}$$

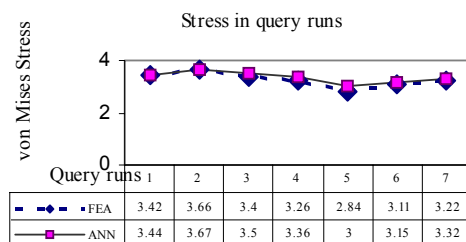
برای به دست آوردن نیروی معادل این  $I_c$  مقدار  $I_c$  به دو المان تماسی معرف دو کلمپ وارد شده و مسئله بدون وارد کردن نیروهای ماشینکاری حل می شود. آنگاه با اختیار مقادیر:  $F_1=120N$ ,  $F_2=117N$  نودهایی از المان تماسی که روی قطعه کار هستند، حد اکثر تغییر شکل نهایی و همچنین تغییر شکل در جهت وارد شدن  $I_c$  از خروجی های مسئله استخراج شده و در نهایت به کمک رابطه (۴) مقدار نیروهای کلمپ محاسبه می شوند.

اما نکته قابل توجه این است که در این روش مقداری تخمینی از  $I_c$  به کار رفته به طوری که نیرویی معادل آن فقط نگهداری قطعه کار در برابر نیروهای ماشینکاری را تضمین می کند. لذا باید به صورت آزمون و خطا مقدار  $I_c$  تا حدی افزایش یابد که هم سیستم فیکسچر- قطعه کار پایدار باشد (تماس بین قطعه کار و اجزای فیکسچر باقی بماند و در نتیجه درجات آزادی گرفته شود) و هم ماکزیمم تغییر شکل ایجاد شده در قطعه کار مینیمم گردد به طوری که باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه کار نشود. از سوی دیگر چون دو نیروی گیره بندی وجود دارد باید بهترین ترکیب این دو نیروی گیره بندی انتخاب شود. پس بینهایت انتخاب از زوجهای  $I_{c1}$  و  $I_{c2}$  موجود است.

برای این منظور قدر مطلق  $I_c$  را از  $10^{-6} * 10^{-1/52}$  به تدریج افزایش داده که با آزمون و خطا این نتیجه حاصل می شود که مقدار  $I_c$  در حدود  $10^{-5} * 4/4$  می تواند پایداری قطعه کار را تامین کند. اما پرسش اصلی این است که چه ترکیبی از  $I_c$  می تواند بهترین انتخاب باشد به گونه ای که: هم پایداری قطعه کار تامین شود، هم تنش ایجاد شده در قطعه کار در هیچ نقطه ای از تنش تسلیم قطعه کار بیشتر نشود، و ضمناً حداقل تغییر شکل در قطعه کار ایجاد شود. استفاده از شبکه های عصبی و



شکل ۷: میزان حداکثر تغییر شکل محاسبه شده توسط روش اجزاء محدود برحسب میکرون در مقابل پیش بینی های شبکه عصبی.

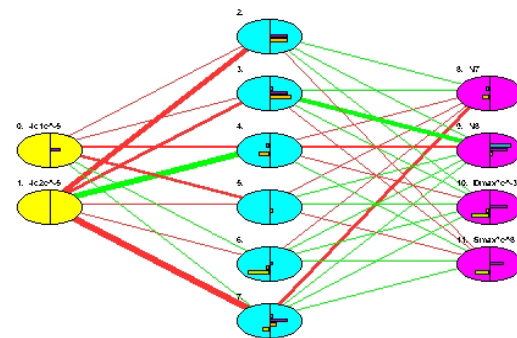


شکل ۸: میزان حداکثر تنش محاسبه شده (MPa) توسط روش اجزاء محدود در مقابل پیش بینی های شبکه عصبی.

### بهینه سازی به وسیله الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی قوی است که برای حل مسائل بسیار غیرخطی و دارای متغیرهای متعدد به کار می رود. وجود هریک از این سه حالت یا ترکیبی از آنها توجیه مناسبی برای استفاده از روش الگوریتم ژنتیک است: رابطه بین متغیرهای بهینه سازی و تابع هدف شناخته شده نباشد، ابعاد فضای جستجو متعدد باشد، و مساله دارای مقادیر بهینه محلی متعدد باشد. منطق ژنتیک با تقلید فرآیند بقا، اصلاح از یک فضای بزرگ جستجو متشکل از یک جمعیت تصادفی از مقادیر متغیرها شروع کرده و با اعمال عملگرهای متاثر از روشهای زیست شناختی به جستجوی پاسخ بهینه می پردازد. هرگاه مقدار تابع برازش به بالاترین مقدار خود در یک جمعیت از متغیرها برسد و یا اینکه تعداد جمعیت به حداکثر مقدار تکاملی قید شده از قبل برسد حل همگرا شده و متوقف می شود. در تحقیق جاری از آنجا که رابطه تحلیلی شناخته شده ای، عمدتاً به دلیل حضور عامل اصطکاک، بین میزان نیروی گیره بندی و وضعیت تماس برای قطعه کار وجود ندارد استفاده از روشهای ساده تر و

اطمینان از صحیح بودن آموزش شبکه، ورودی هفت نمونه دیگر به شبکه داده می شود تا با توجه به رابطه ای که بین ورودیها و خروجیها در مرحله یادگیری پیدا کرده است، خروجی های مربوط به این هفت نمونه را محاسبه کند. آنگاه این خروجی ها را با مقدار واقعی آنها مقایسه کرده چنانچه شبکه عصبی تقریب درستی از خروجی ها زده باشد، شبکه درست آموزش دیده است و مطلوب است. پس از آموزش دیدن شبکه با این پارامترها و تست کردن آن با بعضی از داده ها مشاهده می شود که میزان خطا بالا است لذا تغییر تعداد لایه ها و گره های شبکه عصبی الزامی است. از طریق آزمایش و خطا در نهایت این نتیجه حاصل می شود که شبکه عصبی با یک لایه و شش گره برای این کار مطلوب است. شکل (۶) شبکه عصبی طراحی شده در نرم افزار Easy NN را نشان می دهد. جدول (۵) مقادیر واقعی داده های مرحله آزمون شبکه را با مقادیری که شبکه مطلوب تخمین زده است نشان می دهد که نتایج مربوط به حداکثر تغییر شکل و حداکثر تنش در نمودارهای شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده اند. دقت در این جدول و نمودارها میانگین مغایرت  $1/87\%$  را برای حداکثر تغییرشکل و  $2/41\%$  را برای حداکثر تنش ارائه می دهد. میزان انحراف معیار برای مغایرت های فوق به ترتیب  $7/89\%$  و  $1/86\%$  است. دقت کار شبکه از این تطابق بسیارخوب جوابها قابل مشاهده است هرچند که مقایسه مقادیر انحراف معیار، دقت بالاتری را برای محاسبه حداکثر تنش نشان می دهد.



شکل ۶: شبکه عصبی مطلوب.

با توجه به ضرایبی که شبکه عصبی برای ارتباط بین ورودی ها و خروجیها به کار می برد، رابطه بین ورودی و خروجی ها پیدا شده واز آن در بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک استفاده می شود.



با مقایسه حداکثر تغییر مکان به دست آمده از حل مدل در نرم افزار Ansys و حداکثر تغییر مکان حاصل از الگوریتم ژنتیک مشاهده می شود که جواب به دست آمده قابل قبول است. برای محاسبه نیروهای گیره بندی بهینه معادل این مقادیر، این مقادیر با استفاده از رابطه (۴) به دست می آیند:

$$F_1 = 3936 \text{ N} \quad F_2 = 4637 \text{ N}$$

با توجه به تطابق مناسب پاسخ الگوریتم ژنتیک و روش اجزاء محدود و اطمینان از صحت آن پاسخ به دست آمده تحلیل می شود. با در نظر گرفتن مقادیر حداکثر تغییر مکان در جدول (۵) ملاحظه می شود که با تغییر نیروهای گیره بندی تاحدیکه وضعیت تماس قابل قبول باشد حداقل مقدار  $D_{max}$  معادل  $4/42$  میکرون است در حالیکه مقدار به دست آمده توسط شبکه عصبی  $4/17$  است که محاسبات انجام شده یک خطای  $9\%$  را در این زمینه نشان می دهد. این خطا با توجه به فضای بزرگ جستجوی الگوریتم ژنتیک قابل توجیه است. از آنجا که پاسخ به دست آمده براساس محاسبات انجام شده به روش اجزاء محدود برای آموزش و تست شبکه نیز پاسخ بهینه است پس می توان نتیجه گرفت که ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک عملکرد رضایتبخشی برای بهینه سازی ارائه داده است.

### خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله یک روش برپایه هوش مصنوعی برای بهینه سازی نیروهای گیره بندی در عملیات ماشینکاری ارائه شد که در آن از روش اجزاء محدود و ترکیبی از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. برای صحت گذاری راه حل، یک مساله منتشر شده، با روش متفاوتی که شامل استفاده از المانهای تماسی گره-به-گره برای شبیه سازی تماس اصطکاکی است دوباره مدل سازی شد. مقایسه میزان بیشینه تغییر شکل کشسانی در هر دو راه حل مطابقت قابل قبولی را به نمایش گذاشت. این همخوانی اجازه داد مجموعه داده های کافی برای آموزش یک شبکه عصبی متشکل از یک لایه و شش گره تولید شود. شبکه آموزش دیده قادر است وضعیت تماس و حداکثر تغییر شکل الاستیک را به همراه تنش بیشینه پیش بینی کند. ورودیهای این شبکه میزان تداخل برای نقاط گیره بندی است که معرف نیروهای گیره بندی است.

معمول بهینه سازی به نتیجه مناسبی نمی انجامد. در نتیجه برای بهینه سازی نیروی گیره بندی استفاده از روش نیرومند الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد. در مسائل بهینه سازی لازم است متغیرهای بهینه سازی، تابع هدف و قیود مسئله مشخص شوند. در مثال مورد بحث مقدار نیروی گیره بندی متغیر بهینه سازی است و چون  $I_{c1}$  در المان تماسی، معرف نیروی گیره بندی است، در این مساله مقادیر  $I_{c1}$  و  $I_{c2}$  متغیرهای بهینه سازی هستند. تابع هدف عبارت از حداقل سازی حداکثر تغییر شکل ایجاد شده در قطعه کار است به طوری که شاخص وضعیت تماس کلمپ های  $(N_8, N_7)$  حداقل باشد. به این معنی که یا بسته و بدون لغزش (یک) و یا بسته ولی لغزنده (دو) باشد. همچنین حداکثر تنش معادل ایجاد شده در قطعه کار از تنش تسلیم قطعه کار بیشتر نشود تا قطعه کار وارد محدوده پلاستیک و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک نگردد. در این مثال جنس قطعه کار از آلومینیم ۳۹۰ است که تنش تسلیم آن برابر است با:

$$\sigma_y = 24000 \text{ psi} = 1.687367 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

برای بهینه سازی از یک نرم افزار الگوریتم ژنتیک به نام GOAL استفاده شده است. پس از تعیین مقادیر متغیرهای مورد نیاز بهینه سازی در نرم افزار GOAL مانند اندازه جمعیت، احتمال پیوند، احتمال جهش، متغیرهای بهینه سازی و تابع هدف و قید های مسئله را تعریف کرده و مدل اجراء می شود. جواب بهینه ای که نرم افزار برای مقادیر  $I_{c1}$  و  $I_{c2}$  به دست می دهد به صورت زیر است:

$$I_{c1} = -4.9256 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$I_{c2} = -5.7245 \times 10^{-5} \text{ m}$$

که به ازای این مقادیر،  $D_{max}$  به صورت زیر است:

$$D_{max} = 0.0460 \times 10^{-3} \text{ m}$$

برای اطمینان از درستی پاسخ ها، مدل در نرم افزار Ansys با مقادیر  $I_{c1}$  و  $I_{c2}$  به دست آمده حل شده و این پاسخها به دست می آید:

$$D_{max} = 0.0417 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$S_{max} = 0.323 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$N_7 = 1 \quad N_8 = 1$$



جدول ۵: مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر تخمین زده شده توسط شبکه عصبی.

Try No.	C <sub>1</sub> Status		C <sub>2</sub> Status		D <sub>max</sub> (μm)		S <sub>max</sub> (MPa)	
	FEA	ANN	FEA	ANN	FEA	ANN	FEA	ANN
2	1	1	2	2	15.50	15.01	3.42	3.44
12	1	1	2	2	14.30	14.82	3.66	3.67
22	1	1	2	2	11.30	12.56	3.40	3.50
31	1	1	2	2	9.26	10.54	3.26	3.36
37	1	1	2	2	7.47	7.10	2.84	3.00
47	1	1	2	1.9995	5.33	5.03	3.11	3.15
61	1	1	1	1.0006	4.42	4.34	3.22	3.32
Average Difference (%)					1.87		2.41	

سازی با استفاده از این تکنیکها تدریجا به بهینه سازی همزمان طراحی فیکسچر و برنامه گیره بندی می انجامد.

### تقدیر و تشکر

این پژوهش با استفاده از طرح پژوهشی دانشگاه تهران به شماره ۶۱۸/۲/۱۰۳۲ انجام شد که نویسندگان قدردانی خود را برای این مساعدت اعلام می دارند.

### فهرست علائم

$K_n$ : سختی عمودی

$K_s$ : سختی برشی

$c$ : تداخل

$E$ : مدول کشسانی قطعه کار

$I$ : گشتاور ماند سطح مقطع قطعه کار

$R_{max}$ : بیشترین نیروی عکس العمل

$K_{ave}$ : سختی معادل المان تماسی

$F_p$ : مولفه مماسی نیروی برشی

$F_q$ : مولفه مماسی نیروی برش شعاعی

$F_a$ : مولفه مماسی نیروی برش محوری

$U_i$ : تغییر مکان نهایی نود  $i$  متعلق به المان تماسی

$U_{ny,i}$ : تغییر مکان نود  $i$  در جهت وارد شدن نیروی گیره بندی

بندی

در مرحله آزمون و تصدیق، نتایج به دست آمده توسط شبکه عصبی با نتایج حاصل از روش اجزاء محدود مقایسه شد و نتایج مناسبی به دست آمد. رابطه به دست آمده توسط شبکه عصبی آموزش دیده به عنوان یک تابع برازش<sup>۱</sup> برای یک نیروی گیره بندی با در نظر گرفتن حداکثر تغییر شکل قطعه کار و وضعیت تماس بین قطعه کار و اجزاء فیکسچر به کار می رود. در نهایت نتایج به دست آمده از GA با نتایج روش اجزاء محدود مقایسه شدند و دقت عمل و کارایی ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک نشان داده شد. مزیت این مطالعه نسبت به سایر پژوهشهای انجام شده تعیین و نمایش وضعیت دقیق تماس بین قطعه کار و اجزاء فیکسچر است. این کار پژوهشی به اتوماسیون طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر در یک محیط برنامه ریزی فرآیند به کمک کامپیوتر (CAPP) کمک می نماید. روش معرفی شده نیازمند تعامل بسیار از سوی کاربر است و نویسندگان بر این باورند که یکپارچه سازی روش اجزاء محدود و شبکه عصبی باعث افزایش بسیاری در کارایی روش معرفی شده می شود و در این زمینه نیاز به تحقیقات بیشتری وجود دارد. همچنین استفاده از ترکیبهای قویتر شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک مانند شبکه های تکاملی (Evolutionary Networks) در دست بررسی است. افزایش قدرت بهینه

### مراجع

- 1 - Hamedi, M., (1995). *On Realistic Modelling of workpiece-Fixture Interaction*, Ph.D. Dissertation, University of New Brunswick, Canada.
- 2 - Wang, Y. F., Wong, Y. S. and Fuh, J. Y. H. (1999). "Off-line modeling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system." *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 39, PP. 253-271.

- 3 - Melkote, S. N. and Li, B. (2001). "Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics." *Int. J. Adv. Manufacture Tech.*, Vol. 18, PP. 701-707.
- 4 - Jeng, SH. L., Chen, L. G. and Chieng, W. H. (1995). "Analysis of minimum clamping force." *Int. J. Mach. Tool Manufact*, Vol. 35, PP. 1213-1224.
- 5 - Wu, N. H. and Chan, K. C. (1996). "A genetic algorithm based approach to optional fixture configuration." *computers and industrial engineering*, Vol. 31, No. 3-4, PP. 919-924.
- 6 - Ishikawa, Y. and Aoyama, T. (1996). "Optimization of Fixturing condition by mean of the genetic algorithm." *Trans. Japan. Soc. of Mech. Eng., Ser.C,65*, No. 598, PP. 2409-2416.
- 7 - Krishnakumar, K. and Melkote, S. N. (1999). "Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm." *Int.J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 40, No. 4, PP. 579-598.
- 8 - De Meter, E. C., Vallapuzha, S., Choudhuri, Sh. and Ketan, R. P. (2002). "An investigation into the use of spatial coordinates for the genetic algorithm based solution of the fixture layout optimization problem." *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, Vol. 42, PP. 265-275.
- 9 - Kulankara, K., Satyanarayana, S. and Melkote, S.N., (2002). "Interactive fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm." *ASME J. of Manufacturing Science and Eng.*, Vol. 124, PP. 119-125.
- 10 - Hamedi, M. (2001). "Fixture design optimization in manufacturing with simulation of clamp tightness in workpiece-fixture system." *Proc. of ASM 2001, IASTED*, Marbella, Spain,
- 11 - DROZDA, T.J., WICK, C. (1983). *Tools and Manufacturing Engineering Handbook, SME, M.*

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Intelligent Fixture Systems
- 2 - Genetic Algorithm
- 3 - Normal Stiffness
- 4 - Shear Stiffness
- 5 - Interference
- 6 - Initial State of Contact
- 7 - Von Mises Stress
- 8 - Training
- 9 - Multimodal
- 10 - Fitness Function