

# تحلیل دینامیک معکوس میز ماشین ابزار هگزاپاد و بررسی مقایسه‌ای نیروهای مؤثر

مهران محبوب‌خواه<sup>۱</sup>، محمدجواد ناطق<sup>۲\*</sup>، سیامک اسماعیل‌زاده خادم<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

nategh@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۵)

**چکیده**- در تحقیق حاضر تمامی نیروهای اصطکاکی، اینرسی و ماشینکاری که ممکن است بر میز هگزاپاد ماشین فرز وارد شوند در نظر گرفته شده و با تحلیل نیوتن - اویلری اجزای سازه میز هگزاپاد، بررسی کاملتری از دینامیک انجام شده است. این تحلیل توسط برنامه شبیه‌سازی نوشته شده در محیط MATLAB اجرا و نتایج آن با مقایسه با منابع دیگر تأیید شده است. تأثیر نیروهای مختلف در فرایند فرزکاری قطعه‌ای که روی میز هگزاپاد ماشین فرز قرار می‌گیرد نشان داده شده است. این تحلیلها به طراح ماشین‌ابزار کمک می‌کند که نقش هر یک از عوامل مؤثر بر عملکرد ماشین‌ابزار را شناسایی کرده و وزن لازم را به بارهای وارده تخصیص دهد.

**کلید واژگان:** ماشین‌ابزار، هگزاپاد، دینامیک معکوس، ربات موازی، سازوکار استوارت.

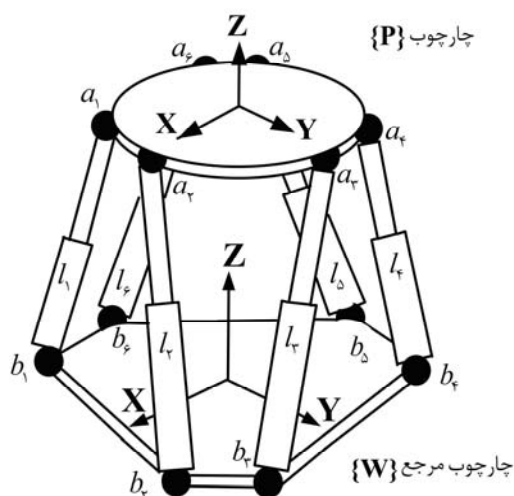
## ۱- مقدمه

هم‌اکنون تحقیقات فراوانی در زمینه سازوکارهای موازی در حال انجام است. سازوکار استوارت که گوج - استوارت<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود، اولین بار به وسیله گوج [۱] در سال ۱۹۶۵ به صورت ماشین آزمودن تایر معرفی شد که پس از آن کاربردهای فراوانی یافته و نمونه‌ای از آن به کارگیری آن در ماشین‌ابزارهای هگزاپاد است. سازوکار موازی هگزاپاد مزایای

فراوانی مانند دقت بالا، سفتی بالا، نسبت تحمل بار به وزن زیاد و مانورپذیری بالا داشته و به همین دلیل در زمینه‌های مختلف صنعتی نقش تعیین کننده‌ای دارد و به عنوان ابزار متحول کننده سیستمهای ساخت و تولید محسوب می‌شود. تحلیل و استخراج معادلات دینامیکی و حرکتی سازوکار استوارت در مقایسه با تحلیلهای سینماتیکی علاوه بر پیچیدگی، کار زمانبری است. از این رو تشخیص موقعیت استفاده از تحلیل دینامیکی یا تحلیلهای ساده سینماتیکی بسیار مهم است. استفاده از روش فرمولبندی نیوتن - اویلر به دلیل

1. Gough-Stewart

شود که کدام خصوصیات دینامیکی در رفتار سیستم در نظر گرفته شده است. سازوکار استوارت تحت بررسی مطابق شکل ۱، شامل یک سکوی متحرک، یک سکوی ثابت و ۶ پایه محرکه با طول متغیر است که سکوی متحرک را به سکوی ثابت متصل می‌کند. ارتباط پایه‌ها از بالا به سکو با مفاصل کروی و از پایین به سکوی ثابت از طریق مفاصل یونیورسال انجام می‌شود.



شکل ۱ سازوکار سکوی استوارت

## ۲-۱- تحلیل دینامیکی کامل پایه

با ملاحظه تعادل دورانی کامل پایه (شامل هر دو قسمت بالا و پایین)، معادله تعادل را می‌توان با در نظر گرفتن ممانها حول مفصل یونیورسال پایینی، مطابق شکل ۲ به ترتیب زیر به دست آورد [۱۳]:

$$\begin{aligned} r_u \times m_u G + r_d \times m_d G + l_i n_i \times F_i^n + C_u w_i \\ + C_s (w_i - \omega_p) = r_u \times m_u \ddot{a}_{ui} + r_d \times m_d \ddot{a}_{di} \\ + (I_u + I_d) \alpha_i + w_i \times (I_u + I_d) w_i \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $r_u$  و  $r_d$  بردار مراکز جرم،  $I_u$  و  $I_d$  ممانهای اینرسی جرمی،  $m_u$  و  $m_d$  جرمها و  $\ddot{a}_{ui}$  و  $\ddot{a}_{di}$

عدم نیاز به محاسبه بسیاری از مشتقات جزئی و محدود بودن حجم محاسبات عددی و نیز توانایی استخراج معادلات در مقایسه با فرمولبندی اویلر - لاگرانژ [۲] در استخراج معادلات دینامیکی حلقه بسته برتری دارد. برای تحلیل نیوتن - اویلری هگزپاد تاکنون روشهای مختلفی ارائه شده است. در بسیاری از آنها فرضیات و ساده‌نگریهای مختلفی در نظر گرفته شده است. برخی مانند دو و یانگ [۲] نازک و متقارن بودن پایه‌ها و بدون اصطکاک بودن مفاصل کروی، کشویی و یونیورسال را فرض کرده‌اند و برخی دیگر مانند داسگوپتا و همکار [۳-۵] و هاریب و همکار [۶] برای مفاصل مختلف اصطکاک و برای پایه‌ها جرم در نظر گرفته‌اند.

طراحان مختلف میز هگزپاد روشهای متفاوتی را برای تحلیل و شناسایی عوامل مؤثر در طراحی مدنظر قرار داده‌اند [۷-۱۰]، اما نیروهای ماشینکاری تاکنون در نظر گرفته نشده و از این رو بررسی تأثیر نیروهای ماشینکاری در دینامیک میز ماشین ابزار هگزپاد حائز اهمیت است.

درخصوص شناسایی نیروهای ماشینکاری تحقیقات زیادی انجام شده است و نمونه‌ای از آنها که در تحقیق حاضر برای محاسبه نیروهای ماشینکاری استفاده شده در [۱۱] آورده شده است.

در این تحقیق روند استخراج معادلات دینامیکی به‌طور مختصر ارائه و نیروهای فرزکاری که بر میز ماشین ابزار اعمال می‌شوند نیز با در نظر گرفتن نیروهای مجاز حاصل از طراحی دقیق ماشین ابزار هگزپاد [۱۲] به دست آمده و در معادلات دینامیکی اعمال شده است. در نهایت نقش و میزان اهمیت هر یک نیروهای مؤثر در مورد ماشین ابزار هگزپاد بررسی شده است.

## ۲- معادلات دینامیکی سکوی استوارت

در این فصل معادلات دینامیکی سازوکار استوارت به‌طور خلاصه به روش نیوتن - اویلر استخراج شده تا نشان داده

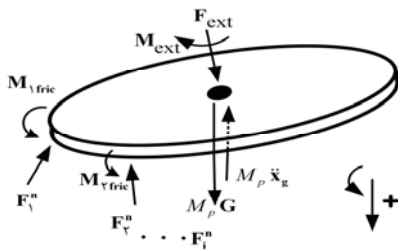
۲-۲- معادله دینامیکی اول و دوم سکو (تبادل

نیوتنی - اوپلری)

با توجه به دیاگرام آزاد شکل ۳ تعادل نیرویی (نیوتنی) در سکوی متحرک از معادله زیر به دست می آید:

$$M_p G + {}^W R_p F_{ext} - \sum_{i=1}^7 F_i^n = M_p \ddot{x}_g \quad (3)$$

در این رابطه  $M_p$  جرم سکو،  $\ddot{x}_g$  شتاب مرکز جرم سکو و  $F_{ext}$  نیروی خارجی وارد شده بر سکو و  ${}^W R_p$  ماتریس چرخش سکوی متحرک است (رجوع شود به ضمیمه).



شکل ۳ دیاگرام آزاد نیروهای وارد شده بر سکو

تبادل ممانی (اوپلری) نیز نسبت به نقطه میانی سکو در نظر گرفته می شود:

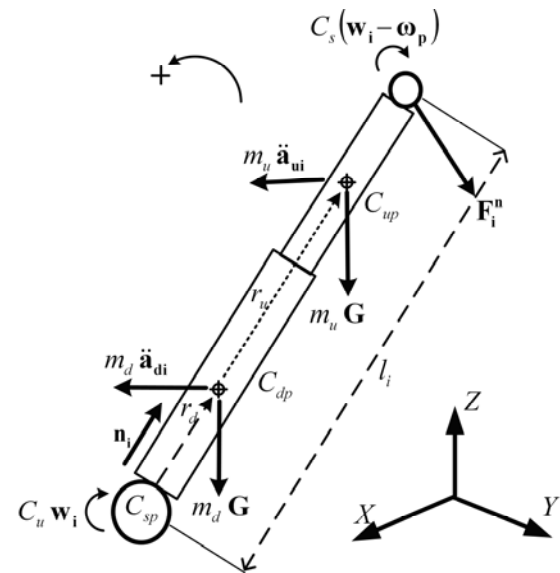
$$M_p \bar{r} \times G + {}^W R_p (M_{ext} + GC \times F_{ext}) + \sum_{i=1}^7 ({}^W R_p {}^p a_i \times F_i^n) + \sum_{i=1}^7 (C_u w_i + C_s (w_i - \omega_p)) = (4)$$

$$M_p \bar{r} \times \ddot{x}_g + I_p \alpha_p + \omega_p \times I_p \omega_p$$

در رابطه (۴)  $M_{ext}$  ممان خارجی و  $GC$  بردار مکان نیروی اعمال شده بر سکو،  $\bar{r}$  بردار موقعیت مرکز جرم سکو و قطعه کار،  $I_p$  ممان اینرسی جرمی سکو در مختصات مرجع  $\{W\}$  و  ${}^p a_i$  بردار نقاط

شتابهای قسمتهای پایینی و بالایی پایه‌ها،  $G$  بردار شتاب جاذبه،  $F_i^n$  نیروی وارد شده از سکو به پایه‌ها در مختصات عمومی سکوی ثابت،  $\alpha_i$  و  $w_i$  بردارهای شتاب و سرعت زاویه‌ای پایه‌ها و  $\omega_p$  بردار سرعت زاویه‌ای سکو است.  $C_s$  و  $C_u$  ضرایب اصطکاکی ویسکوز در مفاصل کروی و یونیورسال است.

در هر حال نیروی  $F_i^n$ ، نیروی مورد نظری که محرک باید تولید کند، نیست. برای محاسبه نیروی محرکه باید دینامیک قسمت بالای پایه بررسی و نیروهای وارد بر آن در نظر گرفته شود:



شکل ۲ دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر پایه هگزپاد

$$m_u n_i G + F_i + n_i F_i^n - C_p \dot{l}_i = m_u n_i \ddot{a}_{ui} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $F_i$  نیروی وارد شده از طرف محرک و  $C_p \dot{l}_i$  نیروی حاصل از استهلاك (اصطکاک ویسکوز) در مفصل کشویی،  $n_i$  بردار یکه پایه‌ها و  $C_p$  ضریب اصطکاک ویسکوز است.

### ۳- بررسی صحت نتایج برنامه تحلیل دینامیکی حاضر با سایر نتایج

در این قسمت به منظور بررسی صحت نتایج تحلیل، برنامه نوشته شده در محیط MATLAB با ورودیهای مثال [5] اجرا و با نتایج مرجع یاد شده مقایسه شده است. در این مثال مرکز سکو از موقعیت اولیه که نقطه  $P_1(0/0, 0, 1/4)$  در دستگاه مختصات مرجع است، در مدت 6 ثانیه به نقطه  $P_2(0/0, 0, 3/6)$  می‌رسد. مقادیر داده شده بر حسب متر است. مقادیر سرعت خطی و دورانی نیز در طول مسیر معلوم است. با استفاده از این ورودیها و سایر ورودیها نظیر جرمها و ممانهای اینرسی، مثال برای سه نقطه از مسیر حرکت سکو توسط برنامه حاضر حل شده و مقادیر دقیق نیروی هر پایه برای این سه نقطه، روی منحنیهای شکل 4 نوشته شده است. این منحنیها از [5] گرفته شده و نشان‌دهنده تغییرات نیروی پایه‌ها در طول مسیر حرکت است. نتایج برای سه نقطه از مسیر با نتایج حل مرجع نامبرده یکسان بوده و نشان‌دهنده مطابقت دو جواب با یکدیگر است و می‌توان نتیجه گرفت که برنامه حاضر جواب دقیقی ارائه کرده است.

### ۴- تعیین نیروهای فرزکاری بر روی میز ماشین ابزار با استفاده از توان مورد نیاز ماشینکاری

تاکنون روشها و روابط تجربی مختلفی برای محاسبه نیروهای ماشینکاری و فرزکاری پیشنهاد شده و تحقیقات زیادی در این زمینه هنوز در حال انجام است. متغیرهای متعددی وجود دارد که بر عملیات فرزکاری تأثیر می‌گذارند و باعث پیچیده شدن تشخیص نیروها در این فرایند می‌شوند (شکل 5). این متغیرها

مفاصل کروی در مختصات سکوی متحرک است. در شکل 3 مرکز جرم و مرکز هندسی سکو منطبق‌اند اما در حالت واقعی با در نظر گرفتن وزن قطعه‌کار این دو مرکز بر هم منطبق می‌شوند که این موضوع در رابطه 4 در نظر گرفته شده است. نیروی ماشینکاری هم می‌تواند در هر نقطه‌ای از طریق قطعه‌کار بر سکو وارد شده و با احتساب ممان حاصل به مرکز جرم انتقال یابد. نیرو و ممان خارجی در شکل 4 می‌تواند نیرو و ممان ماشینکاری باشد.

### ۳-۲- معادله دینامیکی کامل سازوکار استوارت

با ترکیب دو رابطه نیرویی به‌دست آمده (روابط 1 و 2) و دو رابطه تعادلی نوشته شده برای سکوی متحرک (روابط 3 و 4) دستگاه معادلات دینامیکی مجموعه 6 پایه به‌صورت کلی زیر به‌دست می‌آید:

$$M \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \alpha_p \end{bmatrix} + \eta = J^{-T} F + \begin{bmatrix} {}^w R_p F_{ext} \\ {}^w R_p (M_{ext} + GC \times F_{ext}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$J^{-1}$  ماتریس ژاکوبین معکوس (ضمیمه)،  $M$  ماتریس اینرسی و  $\eta$  شامل ممانها و نیروهای جاذبه‌ای و کریولیس [4، 5] است.

به‌طوری‌که مشاهده می‌شود، در حل دستگاه معادلات حاصل، باید تمامی اطلاعات سینماتیکی (موقعیت، سرعت، شتاب و مشخصات فیزیکی سازه) و دینامیکی سکو (جرم و ممان اینرسی اجزا، نیروها و ممانهای خارجی) به برنامه نوشته شده وارد شود. سپس حل دستگاه معادله به‌دست آمده (رابطه 5) و دسترسی به نیروهای هر پایه از طریق روش حل نیوتن - رافسون به‌راحتی امکان‌پذیر می‌شود.

$Q$  حجم براده‌برداری در واحد زمان بر حسب (mm<sup>3</sup>/min) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot V_f \quad (6)$$

در رابطه فوق  $a_p, a_e, V_f$  به ترتیب سرعت پیشروی نسبی ابزار (mm/min)، عرض براده‌برداری بر حسب (mm) و عمق براده‌برداری بر حسب (mm) است.  $V_f$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_f = f_z \cdot Z_f \cdot n \quad (7)$$

در رابطه فوق  $f_z, Z_f, n$  به ترتیب سرعت دورانی اسپیندل بر حسب (rpm)، تعداد کل دندانه‌های تیغه فرز و پیشروی به ازای هر دندانه تیغه فرز بر حسب (mm) است. توان مورد نیاز برای براده‌برداری  $P$  بر حسب (Kw) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

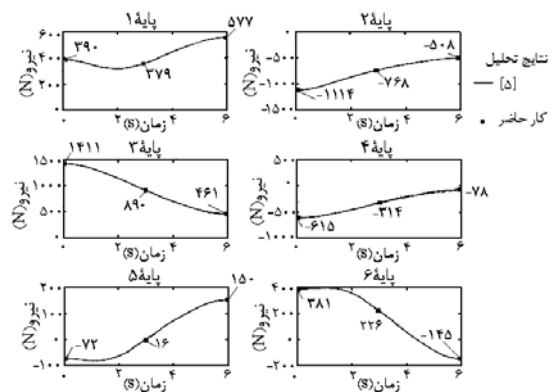
$$P = P_u \cdot Q \cdot K_h K_r \quad (8)$$

در رابطه فوق  $P_u, K_h, K_r$  به ترتیب ضریب تصحیح زاویه شیب ابزار<sup>۱</sup>، ضریب تصحیح فرسایش بغل لبه برنده<sup>۲</sup> و انرژی مخصوص تراش بر حسب (N/mm<sup>2</sup>) است. سرانجام نیروی براده‌برداری  $F_c$  بر حسب (N) در مقطع برش را از رابطه زیر می‌توان به دست آورد:

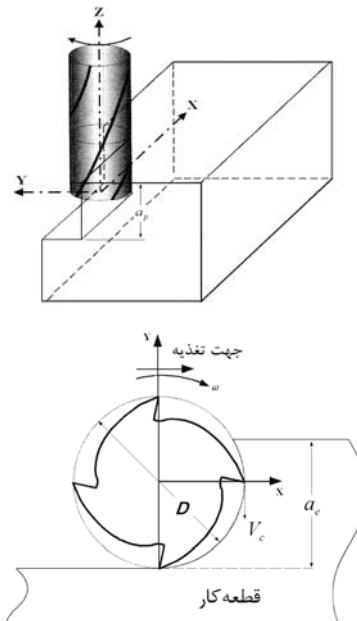
$$F_c = P/V_c \quad (9)$$

$V_c$  سرعت برشی ابزار بر حسب (m/min) است. در نهایت با مشخص بودن مسیر حرکت میز و جهتگیری قطعه‌کار

عبارتند از شکل و ابعاد قطعه‌کار، جنس ابزار و قطعه‌کار، نوع عملیات فرزکاری، هندسه ابزار، نوع ماشین، عرض و عمق براده، سرعت براده‌برداری و چندین عامل دیگر. یک روش برای شناسایی نیروهای فرزکاری به دست آوردن توان و انرژی براده‌برداری است، به طوری که با استفاده از توان مورد نیاز برای براده‌برداری می‌توان نیروهای حاصل از براده‌برداری در آن فرایند را تعیین کرد.



شکل ۴ مقایسه نتایج تحلیل حاضر با نتایج تحلیل [۵]



شکل ۵ درگیری ابزار و قطعه‌کار در فرزکاری موافق [۱۴]

1. Rake Angle  
2. Flank

$$F_t = F_w + F_a + F_{ext} \quad (10)$$

- نیروی منتجه  $F_{wa}$ ، با فرض اینکه نیروهای خارجی وارد بر سکو ناچیز بوده یا قابل محاسبه نیستند و سایر نیروها در تحلیل در نظر گرفته می‌شوند برابر است با:

$$F_{wa} = F_w + F_a \quad (11)$$

- نیروی منتجه  $F_{wext}$ ، با فرض اینکه نیروهای اینرسی، اصطکاک اجزا و نیروی وزن پایه‌ها در نظر گرفته نشوند برابر است با:

$$F_{wext} = F_w + F_{ext} \quad (12)$$

- نیروی منتجه  $F_w$ ، با فرض اینکه نیروهای خارجی و نیروهای حاصل از حرکت اجزا در نظر گرفته نشده باشند و فقط نیروی وزن سکو و قطعه‌کار مدنظر باشند.

## ۶- مقایسه بین ترکیب نیروها

طراحان و سازندگان مختلف رباتها و ماشین‌ابزارها بسته به میزان اهمیت و دقت مورد درخواست، می‌توانند تحلیلهای متفاوتی برای انجام طراحی سازه مورد بررسی خود داشته باشند. در این مقاله برنامه تحلیل دینامیک معکوس و نیروهای ماشینکاری برای میز ماشین‌ابزار هگزاپاد به کمک برنامه MATLAB نوشته شده و سه نوع مقایسه در نظر گرفته شده است و اهمیت محاسبه نیروهای  $F_a$ ،  $F_{ext}$  در حالتهای تحلیلی مختلف برای به‌کارگیری در میز ماشین‌ابزار هگزاپاد انجام شده است.

### ۶-۱- مقایسه نیروهای $F_{wa}$ ، $F_w$

این دو گزینه نیرویی در تحلیلها، زمانی استفاده می‌شود که نیروهای مؤثر، فقط نیروهای داخلی باشند. در این حال

نسبت به ابزار و نوع فرزکاری قطعه‌کار می‌توان مؤلفه‌های نیرویی و ممانی خارجی را که بر مرکز ثقل میز وارد می‌شود در هر لحظه تعیین و به برنامه نوشته شده اعمال کرد.

## ۵- بررسی نیروهای وارد شده بر میز هگزاپاد

اهمیتی که در محاسبه لحظه‌ای نیروها وجود دارد تا در پی آن کنترل بهینه و حرکت صحیح میز ماشین‌ابزار حاصل شود، توجه به عوامل مولد نیروها از جمله نیروهای جاذبه سکو و پایه‌ها، نیروی کریولیس، نیروی اینرسی، نیروی اصطکاک مفاصل و نیروها و ممانهای حاصل از ماشینکاری اجزا را که بر میز ماشین اعمال می‌شوند بیشتر مشخص می‌سازد. به‌همین دلیل در کار حاضر دسته‌بندی کاملی از نیروهایی که در تحلیلهای مختلف استفاده می‌شوند در نظر گرفته شده و اهمیت محاسبات پیچیده نیرویی که در برخی از مراحل طراحی در نظر گرفته می‌شوند، بررسی شده است.

عوامل وارد کننده نیرویی که محرک باید عکس‌العمل آنها را جبران کند می‌توان به سه قسمت زیر تقسیم‌بندی کرد:  
الف- نیروی عکس‌العمل حاصل از وزن سکو و قطعه‌کار ( $F_w$ ) که محرک باید آن را تأمین کند.

ب- نیروی عکس‌العمل حاصل از اینرسی حرکتی، شتاب کریولیس سکو و پایه‌ها و نیروهای اصطکاک مفاصل ( $F_a$ ) که محرک باید آن را تأمین کند.

ج- نیروها و ممانهای عکس‌العمل حاصل از ماشینکاری قطعه روی میز ماشین‌ابزار ( $F_{ext}$ ) که محرک باید آن را تأمین کند.

نیروهای فوق را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد. این دسته‌بندی نشان‌دهنده مهمترین ترکیبهای نیرویی است که ممکن است طراح در نظر گیرد:

- نیروی منتجه  $F_t$ ، با فرض اینکه تمامی نیروهای ممکن در تحلیلها در نظر گرفته شوند برابر است با:

می‌شود، با در نظر گرفتن پارامترهای معمول برش ارائه شده در حالت خشن کاری به ترتیب زیر:

$$D = 40(\text{mm}), Z = 12(\text{mm}), a_e = 25(\text{mm}), \\ a_p = 4(\text{mm}), f_z = 0.15(\text{mm}), V_c = 20(\text{m/min})$$

مجموع نیروهای حاصل از وزن و اینرسی اجزا در مقابل نیروهای حاصل از ماشینکاری محدود بوده و سهم نیروی  $F_{wa}$  حدود ۱۰٪ نیروی کل  $F_t$  است. در شرایط پرداختکاری نیز با فرض پارامترهای معمول این نوع ماشینکاری بر طبق مشخصات ارائه شده زیر:

$$D = 40(\text{mm}), Z = 12(\text{mm}), a_e = 25(\text{mm}), \\ a_p = 1(\text{mm}), f_z = 0.1(\text{mm}), V_c = 30(\text{m/min})$$

به‌طوری‌که در منحنیهای نیرویی شکل ۷ مشاهده می‌شود، سهم نیروهای داخلی  $F_{wa}$  - به دلیل محدود بودن دامنه کلی نیروها در برخی از پایه‌ها - مهم بوده و تا ۵۰٪ هم می‌رسد. با توجه به اینکه پرداختکاری از مهمترین مراحل ماشینکاری بوده و دقت و کیفیت ماشینکاری وابسته به شناخت این نیروها است، اهمیت تعیین و محاسبه کامل نیروهای داخلی ذکر شده بیشتر مشخص می‌شود.

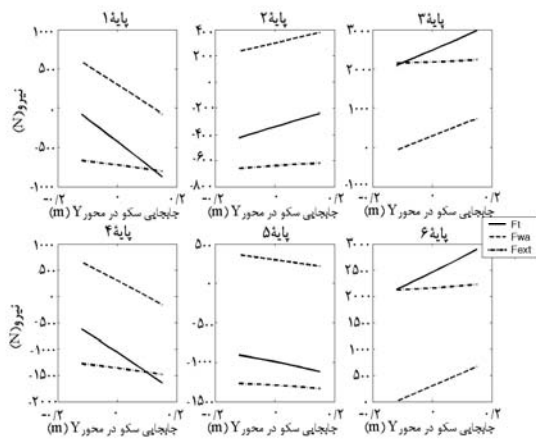
### ۶-۳- مقایسه نیروهای $F_{wa}$ و $F_t$

این دو گزینه نیرویی در تحلیل‌ها، زمانی استفاده می‌شوند که از یک طرف نیروی خارجی ماشینکاری و از طرف دیگر صرفاً نیروی داخلی حاصل از وزن میز، در نظر گرفته شده باشد و موضوع مورد نظر، بررسی اهمیت محاسبه نیروهای مربوط به اینرسی حرکتی، وزن پایه‌ها و نیروهای اصطکاکی تحت این شرایط باشد که نیاز به

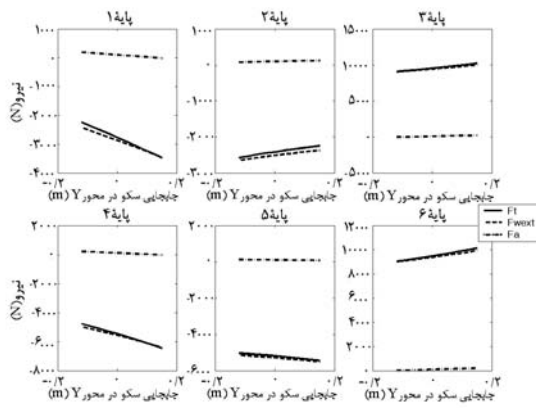
موضوع فقط نادیده گرفتن یا نگرفتن نیروی  $F_a$  است، زیرا محاسبه این نیرو، نیازمند حل معادلات دینامیک معکوس است که علاوه بر پیچیدگی، کار زمانبری است. در میز ماشین ابزار طراحی شده، با فرض اینکه نیروهای ماشینکاری وجود ندارد، وزن سکو همراه با قطعه کار حدود ۱۲۰ kg بوده و میز مسیر مستقیم را در راستای محور  $Y$ ، با سرعت ثابت (۰/۳ m/min) بدون شتاب طی می‌کند. وضعیت نیروهای وارد بر محرکهای ۶ پایه بررسی و مثالی از آن در شکل ۶ ارائه شده است. به‌طوری‌که از مقایسه نتایج نیروها مشخص است، نیروی  $F_a$  حدود ۳۰٪ نیروی  $F_{wa}$  است. آزمایش انجام شده در شرایط کاری عادی دستگاه است. در حالت کلی به دلیل اینکه وزن میز به علاوه قطعه کار می‌تواند از ۶۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم متغیر بوده و همچنین سرعت حرکت میز در کاربردهای مختلف می‌تواند بیشتر باشد، انجام آزمایشهای مختلف نشان می‌دهد که نقش نیروی  $F_a$  در نیروی کلی  $F_{wa}$  از آنچه به دست آمده می‌تواند تا ۵۰٪ هم افزایش یابد.

### ۶-۲- مقایسه نیروهای $F_{wa}$ و $F_t$

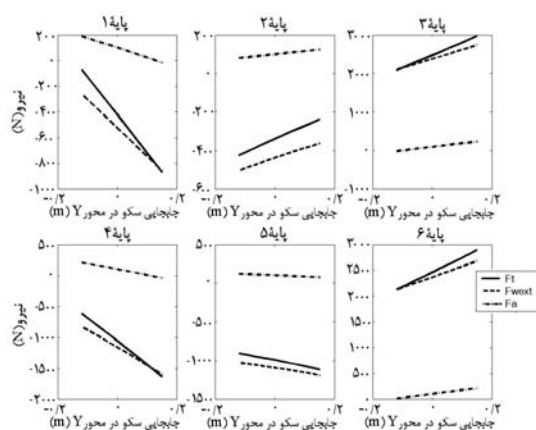
این دو گزینه نیرویی در تحلیلها، زمانی مطرح می‌شوند که ضرورت محاسبه نیروهای خارجی ( $F_{ext}$ )، از جمله نیروهای ماشینکاری مطرح باشد. از آنجاکه تعیین نیروهای ماشینکاری و جهت آنها به صورت لحظه‌ای کار پیچیده‌ای است، در این مقاله بررسی اهمیت محاسبه سهم هر یک از نیروها انجام شده تا نقش عوامل ذکر شده در شرایط مختلف عملکردی و ماشینکاری ارزیابی شود. بدین ترتیب دو حالت مهم در تأثیر شرایط نیروهای خارجی یعنی خشن کاری و پرداختکاری بررسی شده و نتایج تحلیل‌های نیرویی در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. به‌طوری‌که در منحنیهای نیرویی شکل ۷ مشاهده



شکل ۸ مقایسه نیرویی  $F_t$ ,  $F_{wa}$  در شرایط پرداخت کاری

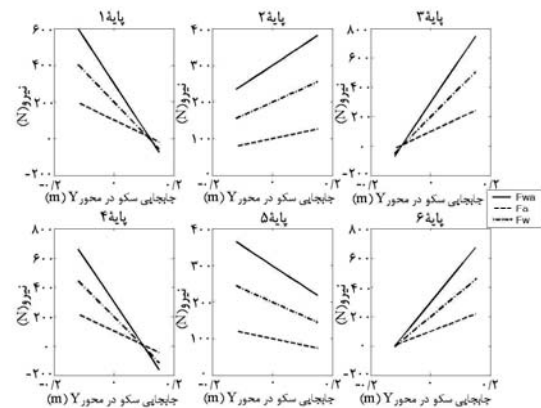


شکل ۹ مقایسه نیرویی  $F_t$ ,  $F_{wext}$  در شرایط خشن کاری

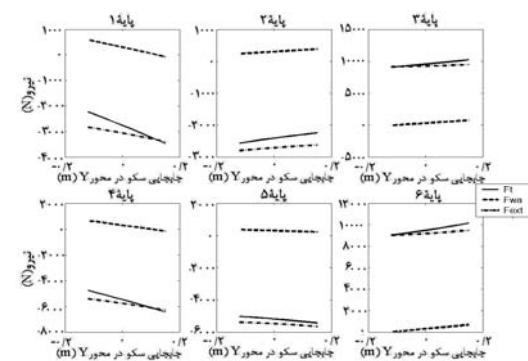


شکل ۱۰ مقایسه مقادیر نیرویی  $F_t$ ,  $F_{wext}$  در شرایط پرداخت کاری

محاسبات پیچیده‌تری دارد. برای شرایط ذکر شده، تحلیل‌های نیرویی در یک مسیر حرکت معین برای حالات خشن کاری و پرداخت کاری انجام شده و منحنیهای نیرویی مربوط در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. به طوری که از شکل ۹ مشخص است مقدار تأثیر نیروی حاصل از وزن و اینرسی پایه‌ها و اصطکاک اجزا ( $F_d$ ) در حالت خشن کاری بسیار ناچیز بوده و بنابراین با توجه به نتایج قبلی (شکل ۷) و پیچیدگی زیاد محاسبه این نیرو، طراح می‌تواند از محاسبه آن صرف‌نظر کرده و برای انتخاب اجزای مورد نیاز ماشین‌ابزار، با در نظر گرفتن ضریب افزایش، از محاسبات اضافی و پیچیده اجتناب کند.



شکل ۶ مقایسه مقادیر نیرویی  $F_w$ ,  $F_{wa}$



شکل ۷ مقایسه  $F_t$ ,  $F_{wa}$  در شرایط خشن کاری



$${}^wR_P = \begin{bmatrix} C\theta_z \cdot C\theta_y & -S\theta_z C\theta_z + C\theta_z S\theta_y S\theta_x & S\theta_z S\theta_x + C\theta_z S\theta_y C\theta_x \\ S\theta_z \cdot C\theta_y & C\theta_z C\theta_z + S\theta_y S\theta_z S\theta_x & -C\theta_z S\theta_x + S\theta_z S\theta_y C\theta_x \\ -S\theta_y & C\theta_y S\theta_x & C\theta_y C\theta_x \end{bmatrix}$$

$$C\theta_x = \cos(\theta_x), \quad S\theta_x = \sin(\theta_x)$$

ماتریس ژاکوبین معکوس از رابطه زیر به دست می آید:

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} n_1^T & ({}^wR_P P_{a_1 \times n_1})^T \\ \vdots & \vdots \\ n_6^T & ({}^wR_P P_{a_6 \times n_6})^T \end{pmatrix}$$

## ۹- منابع

- [1] Stewart, D.; "A Platform with Six Degrees of Freedom"; Proc. of I. Mech. Eng.; 1965, pp. 371-386.
- [2] Geng, Z.; Haynes, L. S.; Lee, J. D.; Carroll, R. L.; "Robotics and Autonomous Systems"; Vol. 9, 1992, pp. 237-254.
- [3] Dasgupta, B.; Mruthyunjaya, T. S.; "The Stewart Platform Manipulator: A Review"; Mechanism and Machine Theory; 1998, pp. 15-40.
- [4] Dasgupta, B.; Mruthyunjaya, T. S.; "Closed-Form Dynamic Equations of the General Stewart Platform Through the Newton-Euler Approach"; Mech. Mach. Theory; Vol. 33, No. 7, 1998, pp. 993-1012.
- [5] Dasgupta, B. ; Mruthyunjaya, T. S.; "A Newton-Euler Formulation for the Inverse Dynamics of the Stewart Platform

در حالت پرداخت کاری که در شکل ۱۰ مشخص شده، با توجه به اینکه گستره نیروها محدود است، سهم نیروی  $(F_a)$  می تواند تا حدود ۲۰٪ نیروی کل باشد. بنابراین می توان به دقت و صافی سطحی که از ماشین کاری قطعات نیاز است، نسبت به محاسبه یا نادیده گرفتن نیروهای نامبرده اقدام کرد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش حل دینامیک معکوس و نیز روابط تجربی مربوط به فرایند فرزکاری قطعه کار، تمامی نیروهایی که ممکن است به محرکهای پایه ها وارد شوند با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط MATLAB و با ایجاد شرایط کاری واقعی میز ماشین ابزار هگزاپاد طراحی شده به دست آمده است. مجموعه های نیرویی محتمل که معمولاً در تحلیلهای طراحان در نظر گرفته می شوند، در مسیرهای حرکتی میز ماشین ابزار و در شرایط کاری مختلف آن بررسی و با هم مقایسه شده اند. بدین ترتیب درجه اهمیت نیروهایی که به دست آوردن آنها کار پیچیده و زمانبری است در حالت های مختلف به دست آمده و مشخص شده که محاسبه نیروهای  $F_a$ ،  $F_w$ ،  $F_{ext}$  در کاربرد میز هگزاپاد ماشین ابزار به ترتیب اولویت دارند. همچنین معین شده که در شرایط پرداخت کاری محاسبه برخی از نیروهای اصطکاکی و اینرسی نیز دارای اهمیت بوده اما در مواقعی که طراحی اجزای حرکتی دستگاه مورد نظر باشد می توان بدون نیاز به برخی محاسبات پیچیده و با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان مورد نیاز، طراحی بهینه را انجام داد.

## ۸- ضمیمه

ماتریس دوران از رابطه زیر به دست می آید:

- [10] Merlet, J. P.; "Parallel Robots"; London; Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [11] LINGAIAH, K.; "Machine Design Data book"; New York, McGraw-Hill Handbooks, 2001.
- [۱۲] حسینی، میرامین؛ «طراحی و ساخت میز هگزاپاد برای ماشین فرز CNC سه‌محوره»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده فنی مهندسی؛ ۱۳۸۴.
- [13] Craig, J.; "Introduction to Robotics: Mechanics and Control"; London, Addison-Wesley, 1989.
- [14] Ko, J., H. and et al; "Development of a Virtual Machining System, Part 1: Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction"; Int. J. of Machine Tools & Manufacture; Vol. 42, 2002, pp. 1595-1605.
- [6] Harib, K.; Srinivasan, K.; "Kinematic and Dynamic Analysis of Stewart Platform-Based Machine Tool Structures"; Robotica; Vol. 21, 2003, pp. 541-554.
- [7] Kim., H., S.; "Design and Control of Stewart Platform Based Machine Tool"; Ph. D. Dissertation; Graduate School YONSEI University; 1999.
- [8] Lebret, G. and et al; "Dynamic Analysis and Control of a Stewart Platform Manipulator"; Journal of Robotic Systems; Vol. 10, No. 5, 1993, pp. 629-655.
- [9] Pang, H. and Shahinpoor, M.; "Inverse Dynamics of a Parallel Manipulator"; Journal of Robotic Systems; Vol. 11, No. 8, 1994, pp. 693-702.

