

آلگوریتم افزودن تکیه‌گاه‌های کمکی به مجموعه جاسازها و روبنده‌های فیکسچر در سیستم‌های CAFD

محمد رضا بهزادی پورⁱ؛ بهروز آرزوⁱⁱ

چکیده

سیستم‌های فعلی طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر (CAFD)، طرح فیکسچر ماشینکاری را تنها بر اساس جاسازها و روبنده‌ها ارائه می‌کنند و در صورت نیاز به اضافه کردن تکیه‌گاه‌های کمکی، یا با استفاده از دستورالعمل‌های ابتدایی در بخش سیستم خبره، بدون مشخص نمودن سایر پارامترها، تنها محل تعبیه تکیه‌گاه را تعیین می‌کنند و یا مشکل را از طریق تغییر سایر پارامترهای فیکسچر یا تغییر شرایط ماشینکاری برطرف می‌سازند.

این مقاله ضمن معرفی سیستم خبره به همراه مدل‌های تحلیلی و عددی برای تعیین مشخصات دقیق تکیه‌گاه‌های کمکی، الگوریتمی را نیز برای به کارگیری این مدل‌ها در یک سیستم CAFD پیشنهاد می‌کند. مدل‌های تحلیلی ارائه شده قادر هستند ساختار فیکسچر بدون وجود تکیه‌گاه کمکی را نیز آنالیز کنند. برای تایید مدل‌های مذکور، نتایج به دست آمده از آنها علاوه بر مقایسه با نتایج تجربی، با نتایج مدل‌های تحلیلی موجود در سیستم‌های CAFD فعلی نیز مقایسه می‌شوند.

کلمات کلیدی

طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر، سیستم خبره، تکیه‌گاه کمکی، جاساز، روبنده.

Instructions and Formatting Rules for Authors of Amirkabir Journal of Science and Research

M. R. Behzadi; B. Arezoo

ABSTRACT

At present, "computer aided fixture design" (CAFD) systems designs fixtures based on locators and clamps. But under some complex machining conditions supports should be added to the fixture system as well as locators and clamps.

This paper presents rule based, analytical and numerical methods for selecting support parameters. In addition, the algorithm for using these methods in a CAFD system has been suggested to develop the present systems. For verification of the presented methods, the results are compared with experimental results and the results obtained in the previous works.

KEYWORDS

Expert Systems, Computer Aided Fixture Design.

ⁱ دکتری مهندسی مکانیک؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر

ⁱⁱ دانشیار؛ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر



افزایش بیش از حد تعداد جاسازها^۱ و یا بزرگ بودن سطح تماس جاسازها با قطعه کار باعث مخدوش شدن دقت و قابلیت تکرار فیکسچر^۲ می شود. در بسیاری از موارد، به دلیل مواجهه با شرایط پیچیده ماشینکاری، باید از تکیه گاه های کمکی^۳ در کنار جاسازها و روبنده ها^۴ استفاده کرد. این موارد به طور عمده به سه گروه تقسیم بندی می شوند:

۱- ضعف صلیبیت قطعه کار ممکن است به گونه ای باشد که نتوان تنها با استفاده از جاسازها و روبنده ها از تغییر شکل های الاستیک قطعه زیر بار ماشینکاری جلوگیری کرد.

۲- بالا بودن نیروی ماشینکاری به دلیل جنس قطعه کار و یا طبیعت فرایند ماشینکاری حتی در زمان ماشینکاری پرداخت ممکن است تقویت ساختار گیرش قطعه کار را طلب کند.

۳- پیچیدگی هندسی و اصولاً طرح قطعه کار از نظر سطوح مرجع ممکن است به گونه ای باشد که قطعه کار در تماس با جاسازها و روبنده ها به تنهایی نتواند در مقابل نیروهای ماشینکاری تعادل مناسب داشته باشد.

هر چند که اضافه کردن تکیه گاه کمکی به ساختار فیکسچر، خود باعث بالا رفتن هزینه ساخت ابزار و افزایش زمان باز و بست قطعه کار می شود، لیکن در صورت مواجهه با شرایط فوق تنها راه حل باقیمانده می تواند کاهش بارهای ماشینکاری باشد که غالباً با کاهش نرخ ماشینکاری و افزایش زمان تولید همراه خواهد بود. در اغلب مواقع برای استفاده حداکثر از قابلیت های ماشین ابزار و ابزار برشی، تعبیه تکیه گاه کمکی بهترین و اقتصادی ترین روش خواهد بود.

تکیه گاه کمکی باید به گونه ای طراحی شود که یا بعد از تماس قطعه کار با جاسازها و بسته شدن روبنده ها یا بعد از اینکه قطعه کار داخل فیکسچر تحت بارهای ماشینکاری به حد کرنش مجاز رسیده باشد، با قطعه کار تماس پیدا کند. دو طرح عمده تکیه گاه های کمکی در شکل (۱) نشان داده شده است. در ادامه، کارهای انجام شده در این زمینه به اختصار مرور می شود.

اولین کار تحقیقاتی با ارزش در زمینه طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر^۵ را "نی" در سال ۱۹۸۵ انجام داد [۱]. نتیجه کار ایشان ارائه یک سیستم خیره^۶ بود که می توانست با پرسش تعدادی سؤال از کاربر و پاسخ دادن به این سؤالات، کاربر را در طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر یاری کند. این سیستم به سیستم گرافیکی و روش بهینه سازی طرح مجهز نبود. در سال ۱۹۹۱ "دسام لازارو" یک سیستم مرکب طراحی فیکسچر به

کمک کامپیوتر را؛ که از ترکیب قوانین تجربی و عبارات های منطقی به همراه روابط ریاضی بهره می برد، ارائه کرد [۲]. در سال ۱۹۹۲ "پرومبانپونگ" ساختار کامل یک بسته طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر را ارائه کرد که می توانست مدل سه بعدی قطعه را به عنوان ورودی بگیرد و فیکسچر طراحی شده را به صورت اتوماتیک روی صفحه کامپیوتر نمایش دهد [۳]. در سال ۱۹۹۳ "فو" و "ملکانوف" اهمیت ارتباط طراحی فرآیند تولید و طراحی فیکسچر در سیستم های طراحی فرآیند تولید به کمک کامپیوتر را مطرح کردند [۴]. در سال ۱۹۹۷ "هوانگ" و "لین" روش شبکه های عصبی^۷ را در طراحی فیکسچر به کمک کامپیوتر به کار بردند [۵] و در نهایت در سال ۲۰۰۰ "کریشناکومار" برای انتخاب محل بهینه جاسازها و روبنده ها در سیستم های CAFD، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کرد [۶].

در کلیه تحقیقات یاد شده تنها به جاسازها و روبنده ها به عنوان اجزای اصلی فیکسچر توجه شده است و به عنوان مثال تنها "پرومبانپونگ" به ذکر کاربرد این قانون در مدول سیستم خبره اکتفا کرده است: "تکیه گاه کمکی زیر قطعه کار باید به گونه ای قرار گیرد که ابزار برشی با آن برخورد نکند" [۳].

در این مقاله برای توسعه سیستم های CAFD موجود، ساختار یک مدول طراحی تکیه گاه کمکی؛ که خود متشکل از مدول سیستم خبره برای انتخاب اولیه پارامترها و مدول های تحلیلی و عددی برای ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف تکیه گاه کمکی بر روی کیفیت فرایند ماشینکاری است، تشریح می شود و الگوریتمی برای به کارگیری مدول طراحی تکیه گاه، در کنار سایر مدول ها، پیشنهاد می شود.

۲- جایگاه CAFD در یک سیستم CAPP و ساختار

سیستم های فعلی CAFD

ساختار کلی یک سیستم CAPP^۸ در شکل (۲) نمایش داده شده است. ابتدا باید در مدول «طراحی فرآیند» ترتیب عملیات مورد نیاز برای تولید قطعه مشخص شود. هرچند که در این مرحله جزئیات طرح فیکسچر مشخص نیست؛ لیکن برای مشخص کردن عملیات ماشینکاری و ماشین ابزار مورد نیاز باید سطوح مرجع قطعه برای تعبیه جاسازها و سطوح در دسترس برای تعبیه روبنده ها مشخص و از عدم برخورد کلی ابزار برشی با اجزای فیکسچر اطمینان حاصل شود. عملیات مشخص شده در مدول «طراحی فرآیند» دسته بندی شده هستند. به این ترتیب که هر دسته از عملیات با یک بار باز و بستن قطعه در یک فیکسچر مشخص اجرا می شوند. بنابراین

۳- ساختار اصلاحی پیشنهادی برای سیستمهای CAFD موجود

در حال حاضر به دلیل این که سیستمهای CAFD، طرح فیکسچر را بر مبنای جاسازها و روبنده‌ها ارائه می‌کنند؛ لذا در صورتی که قطعه ارجاع شده به این سیستم‌ها از شرایط پیچیده ماشینکاری برخوردار باشد، این سیستم‌ها نمی‌توانند طرح فیکسچر مناسب برای ماشینکاری این قطعات ارائه کنند. به عبارت دیگر، طرح‌های ممکن برای فیکسچر، شرایط لازم برای مقابله با نیروهای ماشینکاری را ندارند، یا در صورت غلبه بر این نیروها به علت ایجاد تغییر شکل‌های غیرمجاز، قابلیت اجرای یک فرآیند ماشینکاری با کیفیت مورد نظر را ندارند.

با توجه به ساختار فعلی ارائه شده در شکل (۳) شرایط پیچیده ماشینکاری، مشکلی را در مرحله دوم طراحی فیکسچر ایجاد نمی‌کند و اصولاً برای گرفتن درجات آزادی قطعه‌کار تنها باید به جاسازها متکی بود. مشکلات موجود در مرحله پنجم نیز به صورت نبود فضای کافی برای طراحی اجزای فیکسچر بروز می‌کنند و نمی‌توان با اضافه کردن تکیه‌گاه کمکی به طرح فیکسچر به این مشکلات فائق آمد. لازم به توضیح است که در مراحل قبل خصوصاً مرحله دوم، مدلسازی با فرض بارهای نقطه‌ای و تکیه‌گاه‌های نقطه‌ای انجام می‌شوند و شکل واقعی جزئیات طرح فیکسچر مد نظر قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل ممکن است که در مرحله پنجم با جایگزین کردن شکل واقعی روبنده‌ها با بارهای نقطه‌ای و جایگزین کردن شکل واقعی جاسازها و تکیه‌گاه‌های کمکی با تکیه‌گاه‌های نقطه‌ای، مشکل کمبود فضا برای چینش اجزا به وجود آید. اصلاحات پیشنهادی، تنها به مراحل سوم و چهارم طراحی مربوط است. ساختار اصلاحی پیشنهادی برای سیستم‌های فعلی CAFD در شکل (۴) نشان داده شده است.

در صورتی که غلبه بر شرایط پیچیده ماشینکاری از طریق تغییر پارامترهای جاسازها و روبنده‌ها میسر نباشد، دو راه حل مناسب زیر را می‌توان تصور کرد:

- کاهش بارهای ماشینکاری
- استفاده از تکیه‌گاه کمکی

هر دو راه حل فوق باعث افزایش زمان و هزینه تولید خواهند شد و در صورتی پیشنهاد می‌شوند که انتخاب دیگری وجود نداشته باشد. بنابراین باید با استفاده از سیستم‌های خبره، مدولی ایجاد کرد که تشخیص دهد آیا شرایط پیچیده ماشینکاری وجود دارد یا خیر؟ تعیین شرایط پیچیده ماشینکاری با توجه به اطلاعات قابل استخراج از مدل سه بعدی قطعه و اطلاعات به دست آمده در مدول «طراحی‌فرآیند»

برای هر دسته از عملیات مشخص شده در مرحله طراحی فرآیند، باید در مرحله CAFD یک فیکسچر طراحی شود. البته این امکان وجود دارد که طراحی جزئیات کامل فیکسچر برای هر دسته از عملیات ماشینکاری به دلایل زیر با شکست مواجه شود:

- عدم امکان محصور کردن درجات آزادی قطعه‌کار با استفاده از سطوح مرجع انتخاب شده.
- عدم امکان ارائه پارامترهای مناسب برای اجزای فیکسچر به گونه‌ای که تعادل قطعه حین ماشینکاری حفظ شود.
- عدم امکان ارائه پارامترهای مناسب برای اجزای فیکسچر به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب ماشینکاری.
- عدم امکان ارائه یک طرح عملی برای جزئیات ساختاری فیکسچر به دلیل کمبود فضای در دسترس.

در صورت عدم امکان ارائه طرح فیکسچر برای هر دسته از عملیات ماشینکاری، طراحی فرآیند انجام شده باید تجدید نظر شود. در حالتی که این تجدید نظر به تغییر کلیه دسته‌بندی‌های انجام شده اولیه منجر گردد، کلیه مراحل طراحی فیکسچر باید مجدداً طی شوند.

ساختار فعلی سیستم‌های CAFD در شکل (۳) نشان داده شده است. اولین مرحله برای طراحی فیکسچر یک دسته مشخص از عملیات ماشینکاری، مشخص کردن محل اولیه تعبیه جاسازها و روبنده‌ها روی سطوح انتخاب شده در مرحله طراحی فرآیند است. در مرحله دوم، ارزیابی و اصلاحات سینماتیکی انجام می‌گیرد. در ارزیابی سینماتیکی مشخص می‌شود که آیا درجات آزادی قطعه‌کار در تماس با جاسازها محصور شده است یا خیر؟ در صورت تأیید طرح در مرحله دوم، در مرحله سوم تعادل قطعه‌کار با وجود نیروهای عکس‌العمل اجزای فیکسچر، نیروی وزن قطعه‌کار و نیروها و گشتاورهای ماشینکاری بررسی می‌شود. در مرحله چهارم بر اساس حداقل کردن یک تابع هدف؛ که غالباً تغییر شکل‌های الاستیک قطعه‌کار در اثر بارهای وارده می‌باشد، پارامترهای بهینه برای فیکسچر انتخاب می‌شود و در نهایت، در مرحله پنجم براساس پارامترهای انتخاب شده، طراحی جزئیات ساختاری فیکسچر یا انتخاب اجزای مدولار صورت می‌گیرد.

در صورتی که هریک از مراحل دوم تا پنجم با عدم موفقیت مواجه شوند، مطابق توضیحات قبلی، طراحی فرآیند انجام شده باید بازنگری شوند.

امکان‌پذیر است. تعداد کم یا نبود سطوح مرجع با دقت و کیفیت مناسب، دیواره‌های نازکی که باید ماشینکاری شوند، مدول الاستیسته پایین جنس قطعه‌کار و بالا بودن بیش از حد نیروهای ماشینکاری؛ همگی بر شرایط پیچیده ماشینکاری دلالت دارند. در صورت وجود شرایط پیچیده ماشینکاری، هر دو روش کاهش بارهای ماشینکاری و استفاده از تکیه‌گاه کمکی باید بررسی شوند و از دو راه حل به دست آمده، باید راه اقتصادی‌تر را انتخاب کرد.

ساختار پیشنهادی برای سیستم تعبیه و انتخاب پارامترهای تکیه‌گاه کمکی در شکل (۵) نشان داده شده است. ابتدا در مدول سیستم خبره، سطوح مورد استفاده برای تعبیه تکیه‌گاه کمکی مشخص می‌شود و انتخاب اولیه پارامترهای تکیه‌گاه صورت می‌گیرد. سپس در مدول حل تحلیلی انتخاب‌های انجام شده در مرحله قبل بهبود می‌یابند و در نهایت، در مدول المان محدود، انتخاب بهینه پارامترهای تکیه‌گاه کمکی نزدیک به پارامترهای انتخاب شده در مراحل قبل، انجام می‌شود.

۳-۱- سیستم خبره انتخاب پارامترهای تکیه‌گاه کمکی

آنالیز دقیق مجموعه فیکسچر و قطعه‌کار به روش‌های اجزای محدود، بسیار زمان‌بر و پیچیده است و تعداد انتخاب‌های بی شماری برای پارامترهای مختلف فیکسچر وجود دارند که ارزشیابی آنها برای رسیدن به طرح بهینه غیر اقتصادی است، لذا ابتدا انتخاب‌های اولیه پارامترها به کمک قواعد تجربی و سرانگشتی طراحی و با استفاده از سیستم‌های خبره انجام می‌گیرد و سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی، این انتخاب‌های اولیه به شرایط ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شوند و در نهایت، با استفاده از روش‌های اجزای محدود، طراحی بهینه فیکسچر با تلاش در یک حوزه محدود انجام می‌گیرد.

مطابق روش استفاده شده در سیستم‌های CAFD موجود، در این مقاله نیز از یک پوسته سیستم خبره استفاده شده است. پوسته سیستم خبره مورد استفاده، نرم‌افزار «استرس» و ویرایش ۱/۲۰/۸ و تحت سیستم عامل ویندوز ۹۸ است. سیستم خبره طراحی شده برای انتخاب پارامترهای تکیه‌گاه کمکی از ۵ موضوع، ۳۲ نشان، ۴۶ قانون، ۶ حوزه تفکر، ۲ دستور کار^{۱۱} و ۱۰ تابع^{۱۲} تشکیل شده است. در ابتدای اجرای برنامه باید یکی از دو دستور کار زیر انتخاب شود:

۱- آیا اصولاً مشکل فیکسچر از طریق اعمال تکیه‌گاه کمکی حل می‌شود یا خیر؟ در صورتی که بتوان مشکل فیکسچر را از طریق تغییر پارامترهای مربوط به جاسازها یا روبنده‌ها حل کرد، استفاده از تکیه‌گاه کمکی توصیه نمی‌شود. در صورتی که

مشکل را بتوان از طریق تغییر پارامترهای ماشینکاری حل کرد، باید دو روش تغییر پارامترهای ماشینکاری یا اعمال تکیه‌گاه‌های کمکی از نظر زمانی و اقتصادی مقایسه و روش ارجح انتخاب شود. در صورتی که مشکل از طریق جاسازها و روبنده‌ها حل نشود و روش تغییر پارامترهای ماشینکاری نیز اقتصادی نباشد، اعمال تکیه‌گاه کمکی توصیه می‌شود.

۲- در صورتی که مشکل فیکسچر تنها از طریق تکیه‌گاه کمکی حل شود، از دستور کار دوم؛ یعنی انتخاب پارامترهای تکیه‌گاه کمکی، استفاده می‌شود. در این قسمت، هدف تعیین جنس، میزان پیش‌بار، هندسه تماس، ناحیه اعمال تکیه‌گاه و مختصات (Z,Y,X) تکیه‌گاه کمکی است.

بعد از مشخص شدن مشکل فیکسچر از نظر عدم تعادل نیروها؛ که می‌تواند استاتیکی یا دینامیکی باشد، و بعد از مشخص شدن نوع جابجایی‌های غیرمجاز قطعه‌کار نسبت به ابزار؛ که می‌تواند جابجایی صلب قطعه یا جابجایی ناشی از تغییر شکل الاستیک قطعه باشد، پارامترهای تکیه‌گاه در یکی از چهار حوزه (Static-2D)، (Static-3D)، (Dynamic-2D)، (Dynamic-3D) حل می‌شود. در صورتی که مسأله در بیش از یک حوزه قرار گیرد، یعنی به عنوان مثال: هم مشکل جابجایی صلب استاتیک و هم مشکل جابجایی صلب دینامیک وجود داشته باشد، برای هر یک توصیه‌های جداگانه‌ای ارائه خواهد شد. به عنوان نمونه، تعدادی از قوانین به کار رفته در سیستم خبره عبارتند از:

```

RULE_29 (Static-3D)
IF There is YL -DOF problem.
THEN ASSERT Region of apply is one Sup. On X-Z, plane (100)

```

```

RULE_77 (Support Evaluation)
IF Rigidity of the machining region is high
AND There is YL -DOF problem.
THEN ASSERT the Z-position of the support is Z (100)

```

Z=Machining.Z-pos. of Weakest point

به عبارت دیگر، بر اساس قانون (۲۹) اگر در مرحله سوم طراحی فیکسچر بر اساس جاسازها و روبنده‌ها، مشخص شود که مشکل عدم تعادل قطعه کار صلب به درجه آزادی خطی در امتداد محور (Y) قطعه مربوط است، در این صورت تکیه‌گاه کمکی باید بر روی وجه موازی صفحه X-Z قرار گیرد.

بر اساس قانون (۷۷) در صورت برقراری قانون قبلی، مختصات Z تکیه‌گاه بر روی صفحه X-Z باید با ضعیف‌ترین صلیب استاتیکی انتخاب شود.

پس از انتخاب اولیه پارامترهای تکیه‌گاه کمکی در مدول سیستم خبره مذکور، پارامترهای انتخابی در مرحله بعد توسط ارزیابی‌های تحلیلی ارائه شده در بخش بعدی مقاله، به شرایط

$$[K]_{18 \times 18} \cdot [X]_{18 \times 1} = [F]_{18 \times 1} \quad (9)$$

اکنون با فرض عدم وجود اصطکاک در محل‌های تماس، مسأله در سه مرحله حل می‌شود: مرحله تماس قطعه‌کار با جاسازها و بسته شدن روبنده‌ها، مرحله تماس تکیه‌گاه‌های کمکی با قطعه‌کار و مرحله اعمال بارهای ماشینکاری [۸ و ۹]. هدف از اجرای این مراحل، محاسبه خطای کلی یا جابجایی خطی و دورانی قطعه ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک در محل‌های تماس در اثر اعمال عکس‌العمل‌های اجزای فیکسچر و بارهای ماشینکاری است.

در این مدل، پارامترهای شعاع تماس، کیفیت سطح تماس، ابعاد، جنس و سختی تکیه‌گاه کمکی همگی در ضریب سختی K_{sk} خلاصه می‌شوند و ضرایب سختی معادل برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف، در مرجع [۱۲] به روش تجربی اندازه‌گیری و ارائه شده است. میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی و موقعیت آن، دو پارامتر دیگر به تکیه‌گاه کمکی مربوط است که مستقیماً در این مدل وارد شده‌اند.

در صورت اعمال نیروی ماشینکاری در یک محل مشخص و برای یک موقعیت خاص از تکیه‌گاه‌های کمکی، دستگاه (۹) را بدون در نظر گرفتن اصطکاک می‌توان حل و بردار جابجایی و جهت اعمال نیروی اصطکاک برای آن شرایط خاص را تعیین کرد. در این حالت وارد کردن مولفه‌های اصطکاک در دستگاه معادلات به غیر خطی شدن دستگاه منجر نمی‌شود و به راحتی عکس‌العمل‌ها و خطاهای ماشینکاری با وجود اصطکاک تعیین می‌شوند و به این ترتیب می‌توان از تصمیم‌گیری در رابطه با تکیه‌گاه کمکی در شرایط واقعی‌تر اطمینان حاصل کرد.

لازم به ذکر است که اگر تعداد اجزای فیکسچر به بیشتر از ۱۲ عدد افزایش یابد، با توجه به روش استفاده شده در این مدل، به ازای اضافه شدن هر مجهول یک معادله به شکل روابط (۳) و (۴) یا (۵) نیز به دستگاه (۹) اضافه خواهد شد و فقط ابعاد دستگاه معادلات افزایش می‌یابد، که به راحتی قابل حل است.

۳-۳- مدلسازی عددی تاثیر پارامترهای تکیه‌گاه کمکی

بر تختی سطح حاصل از ماشینکاری

در ساختار مدولار سیستم‌های CAFD ابتدا در مدول‌های مجهز به روش‌های تحلیلی و سیستم‌های خیره، جواب‌های نزدیک به حل نهایی انتخاب می‌شوند و سپس با استفاده از این جواب‌ها در مدول‌های مجهز به روش‌های عددی و اجزای محدود، ارزیابی نهایی و یا بهینه‌سازی پارامترها در یک حوزه بسیار محدود انجام می‌گیرد. برای آنالیز مکانیکی به روش

۳-۲- مدلسازی تحلیلی تاثیر پارامترهای تکیه‌گاه کمکی

بر تختی سطح حاصل از ماشینکاری

با مدلسازی بار ماشینکاری به صورت متمرکز (با سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه گشتاور) و با فرض صلبیت قطعه‌کار و فرض رفتار مکانیکی خطی خصوصاً در محل تماس اجزای فیکسچر با قطعه‌کار [۷]، مجموعه فیکسچر و قطعه‌کار را مطابق شکل (۶) می‌توان مدلسازی کرد. با فرض رفتار شبه‌استاتیک^{۱۰} برای قطعه‌کار، با وجود حرکت‌های محدود و تدریجی قطعه ناشی از کرنش‌های الاستیک در محل‌های تماس، بنابراین در تمام لحظات روابط تعادل نیرو و گشتاور بر قطعه‌کار حاکم خواهند بود:

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2)$$

علاوه بر ۶ معادله نیرو و گشتاور، برای هر محل تماس قطعه‌کار با اجزای فیکسچر؛ که به صورت فنری با رفتار خطی مدل می‌شود، روابط زیر نیز برقرار است:

$$i = 1 \dots 6 \quad \Delta_{.li} = K_{li} F \quad (3)$$

$$j = 1 \dots 3 \quad \Delta_{.cj} = K_{cj} F \quad (4)$$

$$k = 1 \dots 3 \quad \Delta_{.sk} = K_{sk} F \quad (5)$$

به این ترتیب، با وجود ۶ جاساز (اصل ۳-۲-۱ و استفاده از ۳ سطح مرجع)، ۳ روبنده (یک روبنده در مقابل هر سطح مرجع) و سه تکیه‌گاه کمکی (یک تکیه‌گاه کمکی بر روی هر سطح مرجع)، از روابط (۳)، (۴) و (۵) دوازده معادله به دست می‌آید. با توجه به صلب فرض کردن قطعه‌کار، تغییر شکل الاستیک در هر محل تماس به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Delta_{li} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{li}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{li}]_{3 \times 1} \quad (6)$$

$$\Delta_{cj} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{cj}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{cj}]_{3 \times 1} \quad (7)$$

$$\Delta_{sk} = ([d]_{3 \times 1} + [\theta]_{3 \times 1} \times [r_{sk}]_{3 \times 1}) \cdot [n_{sk}]_{3 \times 1} \quad (8)$$

در ابتدا محل‌های تماس بدون اصطکاک فرض می‌شوند. برای ۱۲ عکس‌العمل اجزای فیکسچر و ۶ مؤلفه جابجایی خطی و دورانی قطعه‌کار؛ که همگی مجهول می‌باشند، ۱۸ معادله شامل شش معادله حاصل از روابط (۱) و (۲) و دوازده معادله حاصل از روابط (۳)، (۴) و (۵) وجود دارد، که می‌توان این دستگاه ۱۸×۱۸ خطی را در یک رابطه ماتریسی به شکل زیر خلاصه کرد:



اجزای محدود^{۱۱} از برنامه «انسپس ۵/۴»^{۱۲} استفاده شده است. ابتدا المان بندی قطعه‌کار با استفاده از المان شش وجهی «Solid95» با ۲۰ گره (یعنی ۸ گره بر روی رئوس و ۱۲ گره در وسط اضلاع شش وجهی) انجام می‌گیرد. با استفاده از المان شش‌وجهی به دلیل دارا بودن گره‌های میانی واقع بر اضلاع، نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر المان‌هایی که تعداد گره‌های کمتری دارند، می‌توان به دست آورد.

سپس اجزای فیکسچر توسط المان «Combin 39» که یک فنر غیرخطی است، مدلسازی شدند. برای تعریف رفتار (نیرو-تغییر شکل) این فنر، تعدادی نقطه در نواحی کششی و فشاری منحنی (نیرو-تغییر شکل) توسط کاربر بایستی تعریف شوند. برنامه «انسپس» با حل غیرخطی مسأله، رفتار فنر را با میانمایی خطی در بین نقاط تعریف شده تعیین می‌کند. این المان با دو گره مشخص می‌شود که مختصات آنها یکسان است؛ ولی شماره‌گذاری متفاوتی دارند. برای تعریف اجزای فیکسچر یک گره المان از گره‌های موجود بر روی قطعه‌کار انتخاب می‌شود و گره دیگر نیز با همان مختصات به عنوان نقطه‌ای بر روی بدنه فیکسچر، به صورت گره‌ای که کلیه درجات آزادی آن محصور شده تعریف می‌شود. برای اجزای مختلف فیکسچر از المان‌های با ضریب صلبیت متفاوت استفاده می‌شود. در محل روبنده‌ها علاوه بر تعریف المان فنری «Combin 39» نیروی پیش‌بار اولیه روبنده نیز بر روی گره متصل به قطعه‌کار اعمال می‌شود. شایان ذکر است که در هنگام تعریف المان‌های تماس، شماره‌گذاری این المان‌ها و گره‌هایی از آنها که به قطعه‌کار متصل نیستند به گونه‌ای توسط برنامه صورت می‌گیرد که اختلاف بین شماره آخرین گره موجود بر روی قطعه‌کار و گره‌های مربوط به المان‌های تماس بسیار بزرگ‌تر از یک واحد است. این موضوع باعث بزرگ شدن مجازی ابعاد ماتریس حل مسأله می‌شود. بنابراین، قبل از حل مسأله با استفاده از دستور «Compress Number» شماره‌گذاری تصحیح می‌شود و کلیه فواصل شماره گذاری‌ها به صورت یک واحد، یک واحد اصلاح می‌گردند.

نیروهای ماشینکاری نیز به صورت بارهای متمرکز ثابت بر روی قطعه‌کار مدلسازی شدند. برای تغییر محل ماشینکاری نیز باید محل اعمال بار تغییر می‌کرد و مسأله مجدداً حل می‌شد. برای اعمال پیش‌بار روبنده‌ها نیز بارهای متمرکز و عمود بر سطح قطعه‌کار در محل روبنده‌ها در نظر گرفته شدند و کلیه محل‌های تماس نیز بدون اصطکاک فرض شدند. برای محاسبه میزان تختی سطح حاصل از ماشینکاری برای یک آرایش مشخص فیکسچر، بار ماشینکاری به ترتیب بر روی گره‌های موجود بر مسیر ماشینکاری اعمال می‌شوند و

در هر موقعیت مشخص بار ماشینکاری، میزان جابجایی گره زیر بار در راستای عمود بر سطح محاسبه می‌شود. پس از حل مکرر مسأله به تعداد گره‌های موجود بر مسیر ماشینکاری، میزان اختلاف حداکثر و حداقل جابجایی هر گره‌های مختلف، مؤید میزان تختی سطح است.

در هر مرحله حل مسأله نیز، میزان عکس‌العمل جاسازها که در اصل همان عکس‌العمل وارد بر گره ثابت المان فنری معادل جاساز است، چک می‌شود. عکس‌العمل کششی، نشان دهنده جدا شدن قطعه از جاسازها و مناسب نبودن طرح فیکسچر است و در این حالت پس از اصلاح طرح فیکسچر مجدداً باید آنالیز انجام شود.

۴- مقایسه نتایج به دست آمده

۴-۱- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

برای تایید نتایج تئوری حاصل از مدلسازی‌های تحلیلی و عددی، تعدادی آزمایش ماشینکاری با شرایط خلاصه شده شکل (۸) ترتیب داده شد که در آنها از طرح پره توربین گازی مدل GE-F5 به عنوان قطعات کار استفاده شد. علت انتخاب پره توربین شکل هندسی پیچیده و نیاز به تعبیه تکیه‌گاه کمکی در طرح فیکسچر ماشینکاری آن بود. علاوه بر پره‌های فابریک از جنس اینکونل (LC) ۷۳۸ که به روش ریخته‌گری دقیق برای این پروژه تهیه شدند، چند عدد پره نیز با جنس چدن خاکستری GG25 و آلومینیوم با همین طرح برای ماشینکاری، ریخته‌گری شدند.

ماشینکاری به دو روش فرزکاری (افقی و عمودی) و سنگ زنی خزشی انجام گرفت. ابزارهای فرزکاری مورد استفاده در این تست‌ها عبارت بودند از: فرز انگشتی با قطرهای ۱۰، ۱۸ و ۲۰ میلی‌متر و زاویه هلیکس ۲۵ درجه و ابزارهای اینسرتی با دو و سه لبه و تیغه‌های کاربیدی. تنها سنگ مورد استفاده، چرخ سنگ شماره 43A36D8VAIV6H3 مناسب برای سنگ‌زنی خزشی بود. فرزکاری با ماشین فرز دکل CNC مدل FP4MA با دقت مکانیکی ۰/۰۱ میلی‌متر و دقت الکتریکی ۰/۰۰۱ میلی‌متر انجام شد. سنگ‌زنی با ماشین سنگ بلوم خزشی مدل HFS با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر انجام گرفت.

برای متروپولژی سطح حاصل از ماشینکاری از یک مجموعه ساعت دیجیتال مدل 546-257B با قابلیت نمایش ۰/۰۰۱ میلی‌متر و دقت ۰/۰۰۲ ± میلی‌متر و یک کابل رابط و پردازشگر اطلاعات DPIHS ساخت شرکت «میتوتویو»^{۱۳} استفاده شد. ساعت توسط یک پایه مغناطیسی صلب به کلگی ماشین ابزار بسته می‌شد، به گونه‌ای که ارتعاشات ماشین به ساعت انتقال داده نشود. با حرکت محورهای ماشین و تماس ساعت با قطعه کار در حین

در حین ماشینکاری^{۱۱} یا بعد از آن^{۲۰} پروفیل سطح حاصل از ماشینکاری و لرزش‌های قطعه حین ماشینکاری به صورت نقطه به نقطه ثبت می‌شود. قابلیت نمونه‌گیری پردازشگر با فاصله زمانی حداقل ۰/۳ ثانیه بود و در صورت تنظیم میزان پیشروی ماشین به اندازه ۰/۲ mm/sec امکان ثبت نقاط با فواصل ۰/۱ mm وجود داشت.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری نسبت به تغییرات صلبیت، موقعیت و میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی به ترتیب در شکل‌های (۹-الف)، (۹-ب) و (۹-ج) ارائه شده‌اند. همان گونه که ملاحظه می‌شود، انطباق قابل قبولی میان نتایج تئوری و تجربی به چشم می‌خورد.

۴-۲- مقایسه با نتایج تحقیقات سایر محققین

مشخصات مربوط به قطعه، فیکسچر و شرایط ماشینکاری مورد بررسی توسط مدل دینامیکی "میتال" در سال ۱۹۹۱ در شکل (۱۰) نشان داده شده است [۱۰]. منحنی‌های به دست آمده توسط مدل "میتال" و مدل ارائه شده در این مقاله درباره تغییرات جابجایی قطعه‌کار (ناشی از تغییر شکل الاستیک در محل‌های تماس) نسبت به تغییر موقعیت روبنده «AA» در دو راستای (X) و (Y) در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند. همان گونه که ملاحظه می‌شود، پیش‌بینی هر دو مدل درباره نحوه تغییرات جابجایی صلب خطی نسبت به موقعیت روبنده یکسان است. ولی منحنی‌های به دست آمده توسط "میتال" نسبت به منحنی‌های به دست آمده از مدل پروژه حاضر دارای یک شیفت کلی هستند، که ناشی از اختلاف دو مدل در بررسی رفتار مکانیکی جاسازها است.

پیش‌بینی دو مدل درباره نحوه تغییرات جابجایی دورانی قطعه‌کار نسبت به موقعیت روبنده (AA) متفاوت است. در خصوص تأثیر جابجایی روبنده در راستای محور (X)، "میتال" پیش‌بینی می‌کند که هر سه مؤلفه جابجایی دورانی در اثر این جابجایی تغییر می‌کنند. در صورتی که براساس نتایج مدل این پروژه، تنها مؤلفه دوران حول محور Y تغییر می‌کند. با توجه به اینکه تغییر مؤلفه (X) موقعیت روبنده (AA) در حالی انجام می‌گیرد که روبنده در راستای محور (Y) در وسط قطعه قرار دارد و با توجه به آرایش فیکسچر مورد آزمایش، قضاوت درباره شکل ظاهری مسأله نیز نتایج مدل این پروژه را بیشتر تأیید می‌کند. البته هر دو مدل در این موضوع توافق دارند که موقعیت (X=1.05) بهترین موقعیت روبنده برای کاهش خطاهای دورانی است.

در خصوص تأثیر جابجایی روبنده (AA) در راستای محور

(Y)، "میتال" پیش‌بینی می‌کند که دوران حول دو محور (Y) و (Z) در اثر تغییر موقعیت روبنده دچار تغییر می‌شوند که مجدداً در این مورد نیز ظاهر مسأله و آرایش فیکسچر با این موضوع توافق ندارد. از طرف دیگر، میتال پیش‌بینی می‌کند که بهترین موقعیت در راستای محور (Y) موقعیت (Y=1.03) است، که قوانین مندرج در کتب طراحی فیکسچر و نتایج منتشر شده توسط سایر محققین نیز ثابت کرده است بهترین موقعیت برای تعبیه روبنده در مقابل سه جاساز در راستای مرکز تقارن مثلث تشکیل شده از محل تماس سه جاساز می‌باشد و لذا پیش‌بینی مدل این پروژه منطقی‌تر از مدل "میتال" است.

مورد دومی که بررسی می‌شود کار تحقیقاتی "مناسا" در سال ۱۹۹۱ است [11]. "مناسا" در مقاله خود روشی را برای تعیین موقعیت بهینه جاسازها به کمک تحلیل اجزای محدود ارائه کرد. شکل شماتیک فیکسچر مورد بررسی در مقاله مذکور در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این که روش بهینه‌سازی برای حل به روش اجزای محدود ارائه شده است، ابتدا قطعه مش‌بندی و سپس برای یک آرایش اولیه جاسازها، کرنش‌های قطعه محاسبه می‌شوند و در مراحل بعدی تا رسیدن به جواب بهینه، آرایش جاسازها به گونه‌ای تغییر می‌کند که کرنش‌ها کاهش یابند. سه آرایش مورد بررسی در مقاله "مناسا"، توسط مدل ارائه شده در این مقاله نیز بهینه‌سازی شده و نتایج مربوطه در جدول (۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج از انطباق نزدیکی برخوردار هستند.

بر خلاف کارهای با بستر تئوری انجام شده توسط "میتال" و "مناسا"، در سال ۱۹۹۵ "هوکنبرگر" و "دیمپتر" نتایج کار با بستر تجربی خود را منتشر کردند [۱۲]. ایشان در کار تحقیقاتی خود، یک فیکسچر برای آزمایش‌های ماشینکاری ساختند که در آن امکان ترتیب دادن آزمایش‌های ماشینکاری با آرایش‌ها و پارامترهای مختلف فیکسچر وجود داشت. فیکسچر ترتیب داده شده به سنسورهای مختلف تعبیه شده در کنار جاسازها برای اندازه‌گیری جابجایی‌های نقاط مختلف قطعه‌کار حین ماشینکاری مجهز بود. پس از ماشینکاری یک شیار بر روی قطعه مکعب مستطیل آلومینیومی. توازی سطح ماشینکاری شده نسبت به سطح مرجع کف قطعه به دو روش اندازه‌گیری شد. روش اول، اندازه‌گیری مستقیم سطح توسط سیستم اندازه‌گیری سه‌بعدی و روش دوم، محاسبه توازی سطح بر اساس جابجایی‌های نقاط مختلف قطعه قرائت شده از روی سنسورهای فیکسچر بود. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ایشان به هر دو روش طی ۱۶ آزمایش ماشینکاری با نتایج به دست آمده توسط مدل پروژه فعلی، در شکل (۱۲) با یکدیگر

مقایسه شده‌اند. همان گونه که ملاحظه می‌شود بین نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این پروژه و نتایج تجربی به دست آمده توسط "هوکنبرگر" و "دیمیترو" نیز انطباق قابل ملاحظه‌ای به چشم می‌خورد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

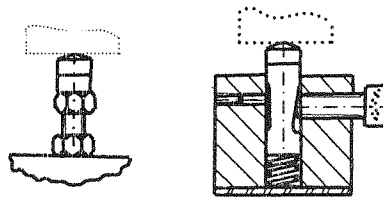
هر چند که افزودن تکیه‌گاه‌های کمکی به ساختار فیکسچر باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود، لیکن در صورت بالا بودن نیروهای ماشینکاری، پایین بودن صلبيت و یا پیچیدگی هندسی قطعه‌کار، اقتصادی‌ترین و شاید تنها راه ممکن برای ارائه طرح فیکسچر ماشینکاری قطعه کار استفاده از تکیه‌گاه‌های کمکی باشد.

با استفاده از سیستم خبره و مدل‌های تحلیلی و عددی ارائه شده به همراه الگوریتم پیشنهادی در این مقاله برای به کارگیری این مدل‌ها در سیستم‌های فعلی CAFD (که طرح فیکسچر را تنها بر پایه استفاده از جاسازها و روبنده‌ها ارائه می‌کنند)، می‌توان با استفاده مناسب از تکیه‌گاه‌های کمکی برای شرایط پیچیده ماشینکاری نیز به صورت اتوماتیک فیکسچر را طراحی کرد.

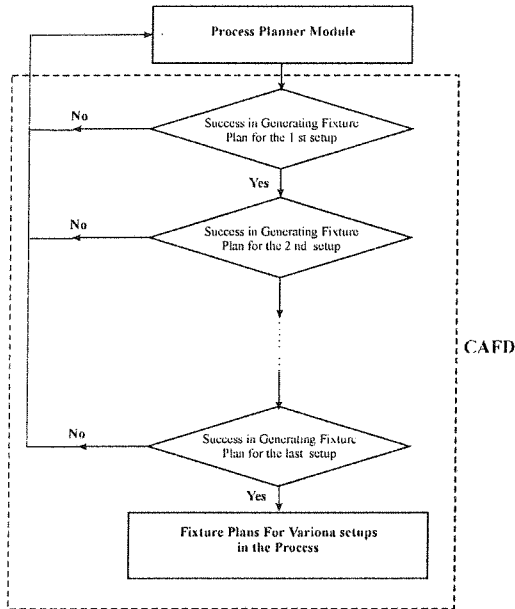
۶- فهرست علائم

- F_{ii} : نیروی عکس‌العمل جاساز عمود بر سطح قطعه‌کار (N)
- F_{ci} : نیروی عکس‌العمل روبنده عمود بر سطح قطعه‌کار (N)
- F_{sk} : نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه کمکی عمود بر سطح قطعه‌کار (N)
- K_{ii}, K_{cj}, K_{sk} : ضریب سختی معادل تکیه‌گاه‌های کمکی، روبنده‌ها و جاسازها (N/m)
- $M_{6 \times 6}$: ماتریس اینرسی
- $n_{3 \times 1}$: بردار نرمال قطعه‌کار
- $r_{3 \times 1}$: بردار موقعیت اجزای فیکسچر
- r_{m} : بردار موقعیت محل ماشینکاری
- Δ : تغییر شکل الاستیک اجزای فیکسچر (m)
- $\theta_{3 \times 1}$: بردار جابجایی دورانی استاتیک قطعه‌کار (مدل سه‌بعدی)

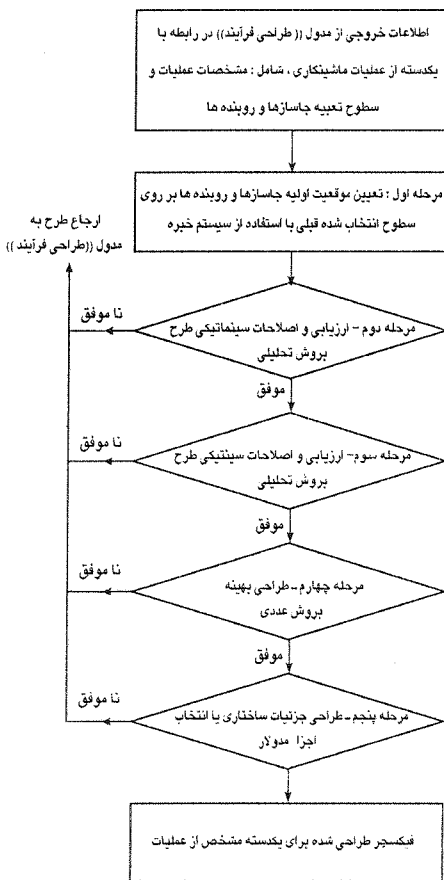
۷- ضمائم



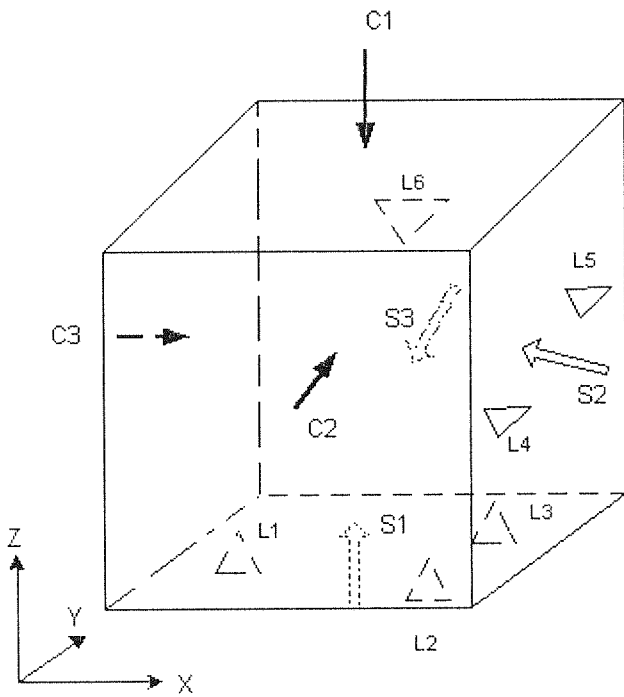
شکل (۱): دو طرح عمده تکیه‌گاه‌های کمکی



شکل (۲): ساختار کلی یک سیستم CAFD

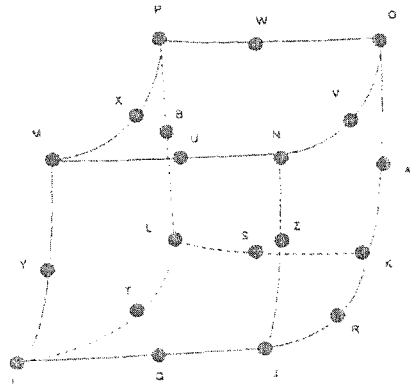


شکل (۳): ساختار فعلی سیستم‌های CAFD

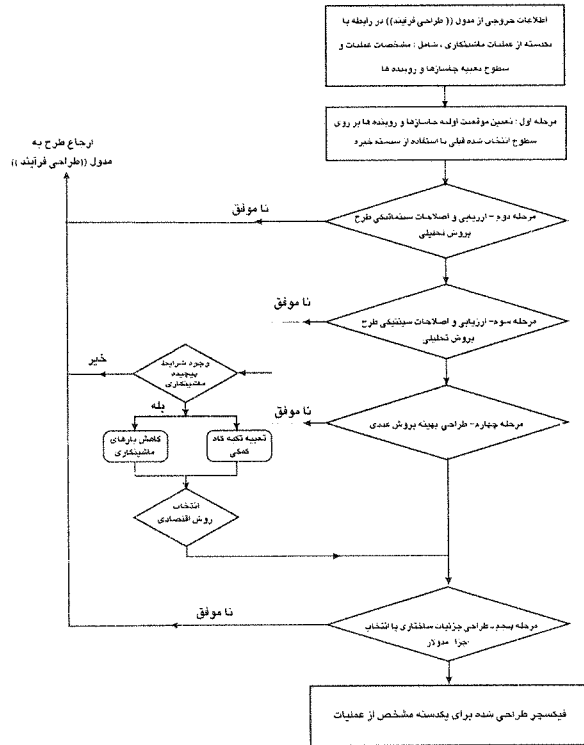


شکل (۶): مدلسازی مجموعه قطعه کار و فیکسچر المان معادل برای جاسازها (L)، روبندها (C) و تکیه‌گاه‌های کمکی (S):

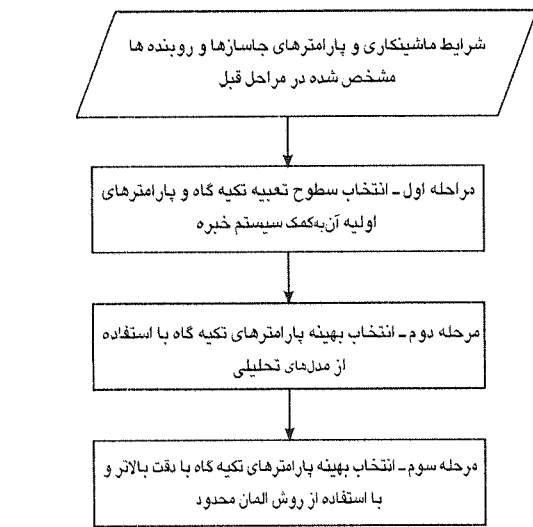
- المان معادل در مدل استاتیکی (K: فنر خطی):



شکل (۷): المان Solid95

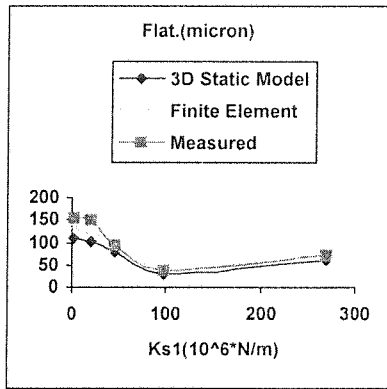


شکل (۴): ساختار اصلاحی پیشنهادی برای سیستم‌های CAFD فعلی

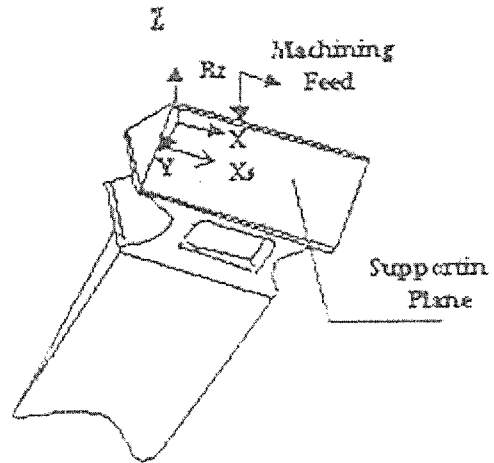


شکل (۵): ساختار سیستم انتخاب پارامترهای تکیه‌گاه کمکی به کمک کامپیوتر

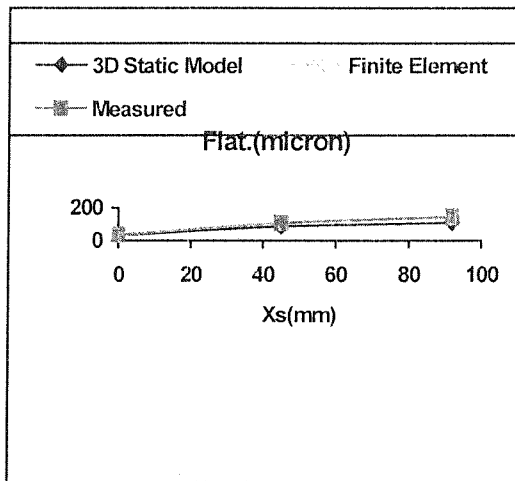




(الف)



(الف)

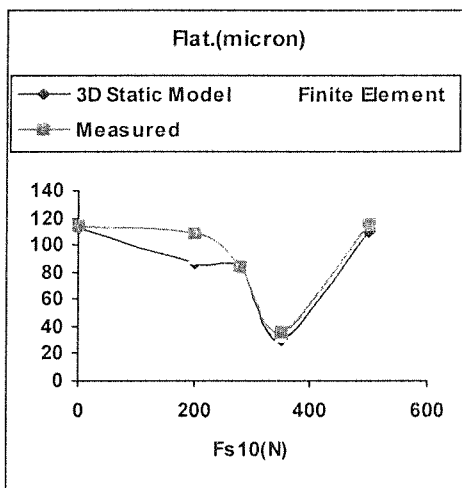


(ب)

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
L1	55	128	20
L2	70	46	0
L3	40	46	0
L4	94	6	15
L5	94	26	15
L6	46	56	10
C1	50	88	32
C2	0	15	15
C3	46	0	15
S1	Xs	10	8
M*	Xm	10	19

جدول مختصات نقاط

(ب)



(ج)

شکل (۸): الف - آرایش فیکسچر

ب - ترتیب انجام آزمایش‌های فرزکاری

برای تایید روش تئوری

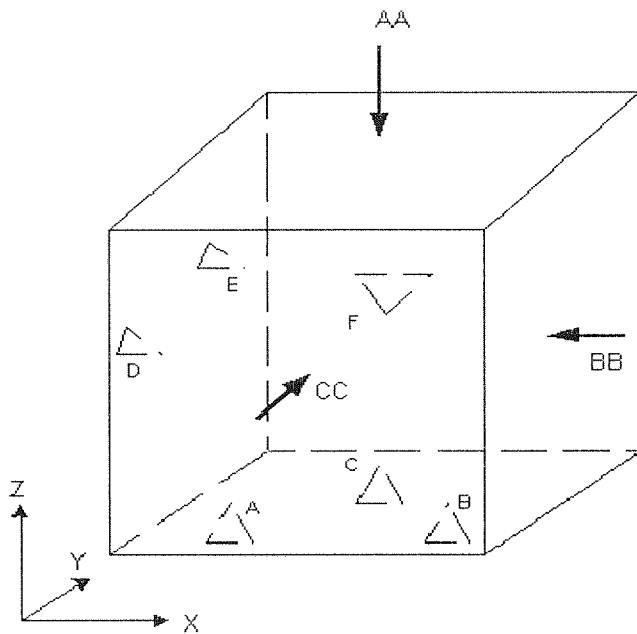
شکل (۹): نمودار تغییرات تختی سطح حاصل از ماشینکاری

نسبت به تغییر:

الف - صلبیت یا ضریب سختی معادل تکیه‌گاه کمکی

ب - موقعیت تکیه‌گاه کمکی

ج - میزان پیش‌بار تکیه‌گاه کمکی



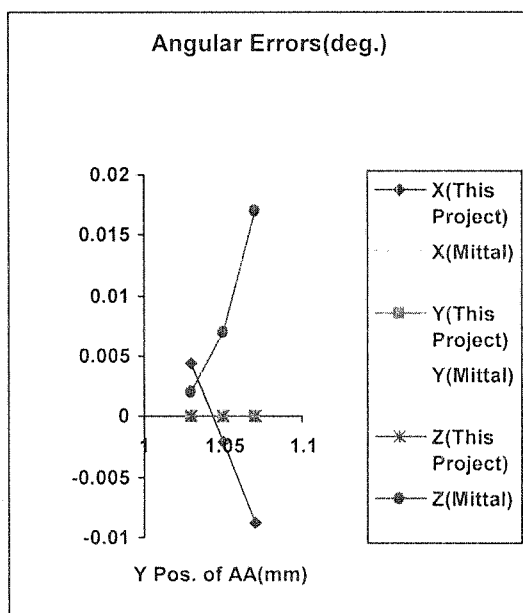
Locators Coordinates:

- A(1.03,1.03,1.0)
- B(1.07,1.03,1.0)
- C(1.05,1.07,1.0)
- D(1.0,1.03,1.05)
- E(1.0,1.07,1.05)
- F(1.05,1.1,1.05)

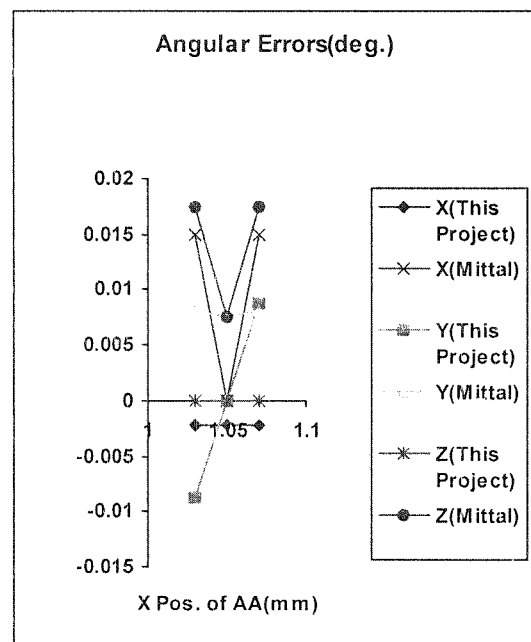
Clamps Coordinates:

- AA(1.0,1.0,1.0)
- BB(1.1,1.05,1.05)
- CC(1.0,1.0,1.1)

شکل (۱۰): مشخصات قطعه کار و فیکسچر مورد بررسی توسط "میتال" [۱۳]

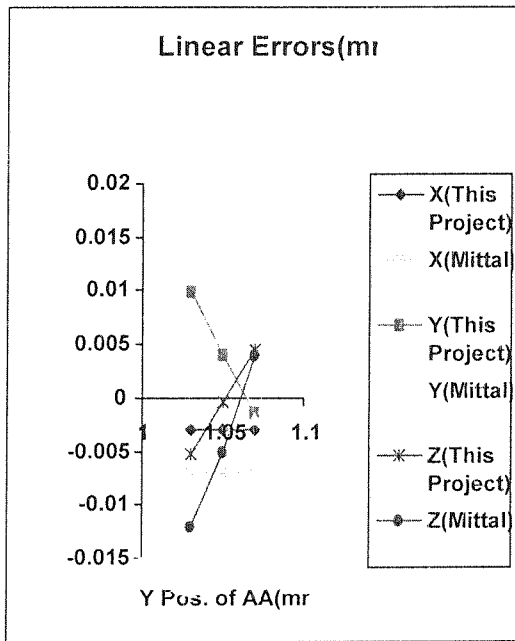


جابجایی زاویه‌ای روبنده (AA) حول محور Y

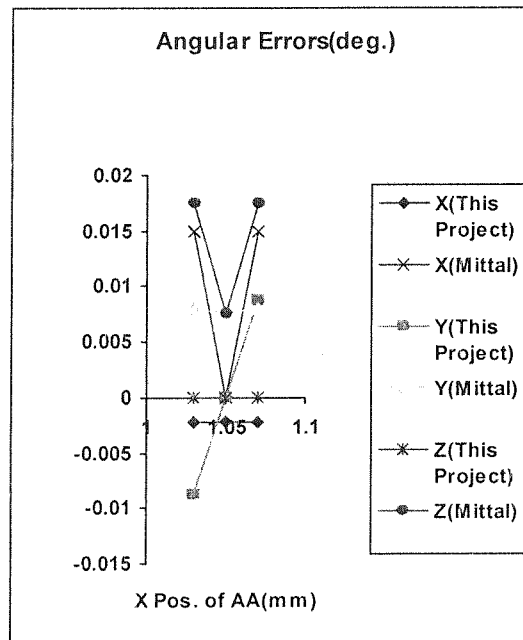


جابجایی زاویه‌ای روبنده (AA) حول محور X





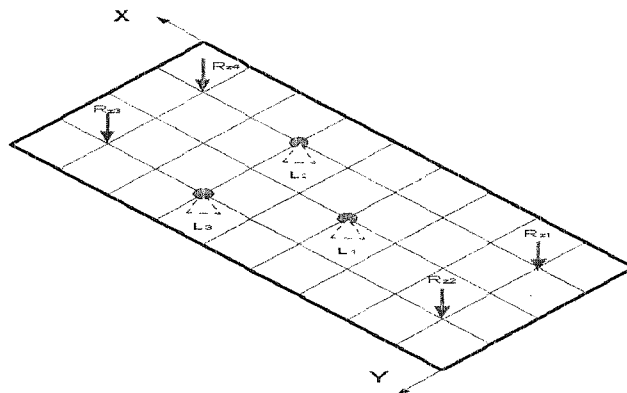
جابجایی خطی روبنده (AA) در امتداد Y



جابجایی خطی روبنده (AA) در امتداد X

شکل (۱۱): مقایسه منحنی‌های نشان‌دهنده تأثیر موقعیت روبنده (AA) بر جابجایی خطی و دورانی صلب قطعه‌کار

در پروژه میتال و پروژه حاضر



شکل (۱۲): شکل شماتیک فیکسچر مورد بررسی توسط 'مناسا' [۱۱]

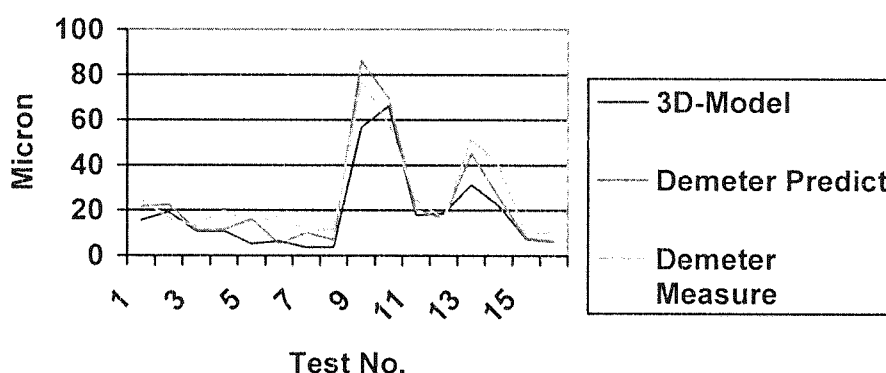
جدول (۱): مقایسه نتایج بهینه‌سازی حاصل موقعیت جاسازه در سه حالت بارگذاری مختلف توسط 'مناسا' [۱۱] و پروژه حاضر

	Machining Loads (Positions)	Optimum Position of Locators* By:Menassa	Optimum Position of Locators* By:This Project
Load Case 1	Rz1 (2,2,0) Rz2 (2,6,0)	L1 (4,4,0) L2(12.36,2,0) L3(12.36,6,0)	L1 (4,4,0) L2(12.00,2,0) L3(12.00,6,0)
Load Case 2	Rz3 (16,6,0) Rz4 (16,2,0)	L1 (11,4,0) L2(13.34,2,0) L3 (13.34,6,0)	L1 (11,4,0) L2(13.5,2,0) L3 (13.5,6,0)
Load Case 3	Rz1, Rz2,Rz3,Rz4	L1 (4,4,0) L2(11.34,2,0) L3 (11.34,6,0)	L1 (4,4,0) L2(11.00,2,0) L3 (11.00,6,0)

*Geometrically Constrained Region: X=4, X=14, Y=0, Y=8

Initial Positions of Locators: L1:(8,4,0), L2:(12,2,0), L3:(12,6,0)

Parallelism



شکل (۱۳): مقایسه توازی سطح حاصل از ماشینکاری اندازه‌گیری شده توسط «هوک‌نیرگر» و «دیمتر» [۱۲] (به دو روش) و نتایج حاصل از مدل پروژه حاضر طی ۱۶ آزمایش با شرایط مختلف

۸- مراجع

- [1] Nee, A. Y. C., Bhattacharyya, N., Poo, A. N.; *A Knowledge Based CAD of Jigs & Fixture*, SME Technical Paper #TE85-902, (1985), 19-26.
- [2] De Sam Lazaro, A., King, D. A.; *A Hybrid System for Automated Design of Fixtures*, ASME Intelligent Design & Manufacturing for Prototyping, PED-Vol. 50, (1991), 25-35.
- [3] Kumar, A. S., Nee, A. Y. C., Prombanpong, S.; *Expert Fixture Design System for an Automated Manufacturing Environment*, Computer Aided Design, Vol. 24, No. 6, (1992), 316-326.
- [4] Fuh, J. Y. H., Chang, C. H., Melkanoff, M. A.; *An Integrated Fixture Planning and Analysis System for Machining Processes*, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, Vol. 10, No. 5, (1993), 339-353.
- [5] Lin, Z. C., Huang, J. C.; *The Application of Neural Networks in Fixture Planning by Pattern Classification*, J. Intelligent Manufacturing, Vol. 8, (1997), 307-322.
- [6] Krishnakumar, K., Melkote, S. N.; *Machining Fixture Layout Optimization Using the Genetic Algorithm*, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, (2000), 579-598.
- [7] Behzadi, M. R., Arezoo, B.; *The Effect of Additional Support Parameters on Machining Accuracy: Part 1-Flexible Workpiece*, SME Technical Paper MR01-332, May, (2001).
- [8] Behzadi, M. R., Arezoo, B.; *The Effect of Additional Support Parameters on Machining Accuracy: Part 2-Rigid Workpiece*, SME Technical Paper MR01-333, May, (2001).
- [9] Behzadi, M. R., Arezoo, B.; *Static and Dynamic Model for Predicting the Effects of Supports on Machining Flatness and roughness*, ImechE J. Engineering Manufacturing, Vol. 216, Part B, (2002), 735-742.
- [10] Mittal, R. O., Cohen, P. H., Gilmore, B. J.; *Dynamic Modeling of The Fixture-Workpiece System*, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, Vol. 8, No. 4, (1991), 201-217.
- [11] Menassa, R. J., Devries, W. R.; *Optimization Method Applied to Selecting Support Positions in Fixture Design*, ASME J. Engineering for Industry, Vol. 113, (1991), 412-418.
- [12] Hockenberger, M. J., De Meter, E. C.; *The Effect of Machining Fixture Design Parameters on Workpiece Displacement*, ASME Manufacturing Review, Vol. 8, No. 1, (1995), 22-32.



- ١ locator
- ٢ fixture
- ٣ support
- ٤ clamp
- ٥ Computer Aided Fixture Design
- ٦ Expert Shell
- ٧ Genetic Algorithm
- ٨ Computer Aided Process Planning
- ٩ Object
- ١٠ Attribute
- ١١ Rule
- ١٢ Scope
- ١٣ Task
- ١٤ Function
- ١٥ Quasi-Static
- ١٦ Finite Element
- ١٧ Ansys 5.4
- ١٨ Mitutoyo
- ١٩ On-Line
- ٢٠ Off-Line