



برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای طراحی اتوماتیک چیدمان در قالب‌های مرحله‌ای برش

مهران افشاری^۱، بهروز آرزو^{۲*}

۱- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳ - ۱۵۸۷۵، arezoo@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴ آذر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۹ بهمن ۱۴۰۱

پذیرش: ۵ اسفند ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

قالب مرحله‌ای

سنجه

طراحی چیدمان

برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی

فرایند طراحی قالب‌های مرحله‌ای پیچیده و زمان‌بر است و نیاز به دانش و تجربه بالایی دارد. طراحی چیدمان یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل طراحی قالب‌های مرحله‌ای می‌باشد به طوری که دقت و هزینه‌های قالب به مقدار زیادی به این مرحله بستگی دارد. در این مرحله تعداد ایستگاه‌های کاری و نحوه توزیع سنبه‌ها در ایستگاه‌ها مشخص می‌شود. در تحقیق حاضر روشی جدید جهت بهینه‌سازی نحوه چیدمان سنبه‌ها در ایستگاه‌های مختلف کاری قالب‌های مرحله‌ای ارائه شده است. در این کار با در نظر گرفتن دو هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری و تعادل گشتاور قالب و با توجه به قیود مختلفی که بین سنبه‌ها می‌تواند وجود داشته باشد و با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی طراحی چیدمان در قالب‌های مرحله‌ای گسترش داده شده است. برای اجرای این روش، یک نرم‌افزار کدنویسی شده است. این نرم‌افزار در محیط سالیدورکس و به زبان ویژوال بیسیک تهیه گردیده است. ورودی نرم‌افزار سنبه‌های مورد استفاده برای تهیه قطعه ورق و قیود مختلفی که بین آن‌ها وجود دارد، می‌باشد. خروجی نرم‌افزار نیز شامل توزیع بهینه این سنبه‌ها در ایستگاه‌های مختلف کاری می‌باشد. برای بررسی عملکرد نرم‌افزار ارائه شده، طراحی چیدمان آن با طرح‌های پیشنهادی توسط طراحان خبره مقایسه شده است. نتایج خروجی نشان داد که طرح‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار ارائه شده از منظر تعداد ایستگاه کاری و تعادل گشتاور قالب مناسب‌تر و یا مشابه طرح‌های پیشنهادی توسط طراحان خبره است.

Development of an Integer Linear Programming for Automatic Layout Design in Blanking and Piercing Progressive Dies

Mehran Afshari, Behrooz Arezoo*

Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 15875-4413 Tehran, arezoo@aut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 December 2022

First Decision: 8 February 2023

Accepted: 24 February 2023

Keywords:

Progressive die

Punch

Layout design

Integer linear programming

Abstract

The design of progressive dies is complicated and time-consuming and needs high knowledge and experience. The layout design is one of the most important and complicated steps of progressive dies design which accuracy and cost of the die highly depend on it. In this step number of stations and the way of assigning punches in stations are determined. In the present research, a new method for optimizing the layout design of punches in different stations of progressive dies is presented. In this work, by considering the two objectives of minimizing the number of workstations and the balance of the die torque, and considering the various constraints that can exist between punches and using integer linear programming, a mathematical model for optimal layout design is proposed. A software is coded to implement this method. This software is developed in the Solidworks environment and the Visual Basic language. The input of the software is the punches used to create the sheet metal workpiece and the various constraints that exist between them. The output of the software includes the optimal distribution of these punches in different workstations. To check the performance of the presented software, its layout design has been compared with the designs proposed by expert designers. The output results showed that the designs proposed by the software are more suitable or similar to the designs proposed by the expert designers from the view point of the workstations number and the balance of the die torque.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Afshari, B. Arezoo, Development of an Integer Linear Programming for Automatic Layout Design in Blanking and Piercing Progressive Dies, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 8, pp.12- 25, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.375594.1723>

۱- مقدمه

امروزه استفاده از قطعات ورق فلزی روز به روز در حال گسترش می‌باشد. استفاده از قالب‌های مرحله‌ای از متداول‌ترین روش‌ها برای تولید قطعات ورق فلزی می‌باشد. از قالب‌های مرحله‌ای معمولاً برای تولید انبوه قطعات ورقی با نرخ تولید بالا استفاده می‌شود و قطعه‌کار طی دو یا چندین مرحله تولید می‌گردد. در هر ایستگاه یک یا چندین عملیات پرس‌کاری روی قطعه ورقی انجام می‌گیرد و در ایستگاه آخر قطعه از ورق جدا می‌گردد. فرایند طراحی چیدمان سنبه‌ها، شامل تعیین تعداد ایستگاه‌های کاری و نحوه توزیع سنبه‌های برش در این ایستگاه‌ها می‌باشد که کاری دقیق و پیچیده است. طراحی چیدمان سنبه‌ها توسط طراحان خبره که دارای دانش و تجربه بالایی هستند انجام می‌گیرد. با پیدایش رایانه، این وسیله در زمینه‌های گوناگون علمی و صنعتی برای سهولت کارها و کاهش زمان انجام محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله کاربردهای رایانه در صنعت می‌توان به طراحی و ساخت قطعات به کمک رایانه اشاره کرد که باعث کاهش چشمگیر زمان عملیات مهندسی برای طراحی و تولید قطعات می‌شود. با توجه به پیچیده و زمان‌بر بودن فرایند طراحی قالب‌های مرحله‌ای می‌توان از رایانه در جهت بهبود و کاهش زمان طراحی قالب‌های مرحله‌ای استفاده نمود؛ به طوری که وجود نرم‌افزاری که بتواند به جای طراح خبره، فرایند طراحی چیدمان این قالب‌ها را انجام دهد بسیار مطلوب می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در زمینه طراحی قالب‌های مرحله‌ای صورت گرفته است. ناکاهارا و همکاران [۱] سیستمی جهت شناسایی سنبه‌های برش در قالب‌های مرحله‌ای ارائه نمودند. در سیستم ارائه شده توسط ایشان هندسه شکل توسط زبانی شبیه به زبان APT^۱ تعریف شده است. بعد از تعریف شکل‌های هندسی، این شکل‌ها با شش سنبه استاندارد مقایسه شده‌اند تا در صورت تشابه، سنبه استاندارد استخراج شود. نی و فونگ [۲] سیستمی جهت طراحی اتوماتیک سنبه‌های برش و همچنین طراحی چیدمان آن‌ها ارائه کردند. در این سیستم از شکستن هندسی کانتور دورریز ورق توسط خطوط افقی و عمودی برش که از یک رأس می‌گذرند برای شناسایی سنبه‌های برش استفاده شده است. همچنین طراحی چیدمان سنبه‌ها با استفاده از تعدادی قانون انجام گرفته است. در این سیستم هیچ‌گونه بهینه‌سازی مدنظر قرار نگرفته است. اسماعیل و همکاران [۳] سیستمی برای طراحی قالب‌های مرحله‌ای ارائه کردند. در این

سیستم برای طراحی چیدمان سنبه‌های برش تنها تعدادی قانون بیان شده است و بهینه‌سازی طراحی چیدمان صورت نپذیرفته است. کوپتا و همکاران [۴] با استفاده از الگوریتم حریصانه^۲ و تکنولوژی گروهی ترتیب عملیات خم‌کاری را در ماشین‌های پرس برک^۳ مشخص نمودند. پارک و همکاران [۵، ۶] سیستمی جهت طراحی قالب‌های مرحله‌ای برای قطعات خاص روتور و استاتور ارائه کردند. چوی و همکاران [۷، ۸] سیستمی جهت طراحی قالب‌های مرحله‌ای برای شکل‌های نامشخص ارائه کردند؛ اما در طرح ایشان محدودیت‌های فراوانی در زمینه تعیین حیطه اجرای قوانین طراحی و تعیین اولویت‌های تکنولوژیکی وجود داشت.

لین و همکاران [۹] با محاسبه مرکز فشار قالب‌های مرحله‌ای و با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک نحوه چیدمان سنبه‌ها را برای حداقل کردن فاصله بین مرکز هندسی قالب و مرکز فشار آن بهینه‌سازی کردند. ایشان همچنین همان تحقیق را با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی آنیلی انجام دادند [۱۰]. توجه شود که در این روش‌ها مسئله طراحی چیدمان قالب به‌طور کلی مطرح نیست؛ بلکه مسئله اصلاح طرح چیدمان به‌وسیله این روش‌ها در جهت حداقل کردن اختلاف گشتاورهای سمت راست و چپ قالب می‌باشد. واسنیاکوس و همکاران [۱۱] سیستمی خبره جهت طراحی قالب‌های مرحله‌ای برای قطعات متقارن با خم U شکل که یک سوراخ در وسط قطعه وجود دارد، ارائه دادند. در این تحقیق طراحی چیدمان به‌صورت اتوماتیک صورت می‌گیرد؛ لیکن در زمینه بهینه بودن طرح ادعایی نشده است. کومار و سینگ [۱۲-۱۶] سیستم‌های خبره دانش محور جهت طراحی قالب‌های مرحله‌ای ارائه کردند. تمامی این سیستم‌ها شامل تعدادی مدول جهت ارتباط با کاربر می‌باشند و قسمت‌های مختلف طراحی قالب‌های مرحله‌ای را اتوماتیک می‌کنند. این سیستم‌ها به زبان اتولیسب^۴ نوشته شده‌اند و در نرم‌افزار اتوکد^۵ قابل اجرا می‌باشند. فارسی و آرزو [۱۷] سیستمی برای تعیین چیدمان فرایند خم‌کاری ارائه دادند. در این سیستم ابتدا با استفاده از قوانین ابتکاری، خم‌های همزمان تشخیص داده می‌شوند و سپس با استفاده از قوانین فازی اولویت این خم‌ها مشخص می‌گردد. قطره‌نبی و آرزو [۱۸] سیستمی جهت اتوماتیک کردن فعالیت‌های جانمایی و پیلوت‌گذاری ارائه کردند. در این سیستم یک مدل ریاضی برای حداقل کردن میزان دورریز ورق ارائه شده است؛ همچنین یک مدل ساده برای پیلوت‌گذاری پیشنهاد شده

^۲ Greedy Algorithm^۳ Press Brake^۴ Autolib^۵ AutoCAD^۱ Automatically Programmed Tool

توسط قالب‌های مرحله‌ای تولید می‌شوند ارائه نمودند. راتو و هادی [۳۳] به‌منظور کاهش هزینه‌ها، به طراحی بهینه قالب مرحله‌ای که برای ساخت ریل صندلی خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد، پرداختند. اسکامپاردونیس و همکاران [۳۴] با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی و آنالیز به کمک کامپیوتر به طراحی و آنالیز قالب مرحله‌ای که عملیات برش و خم را انجام می‌دهد، پرداختند. پراساد و راس [۳۵] به طراحی و تحلیل قالب مرحله‌ای که برای تولید واش‌های چهارگوش کاربرد دارند، پرداختند. راسود و همکاران [۳۶] به کمک برنامه‌نویسی در محیط پایتون سیستمی برای طراحی اتوماتیک قالب‌های مرکب ارائه دادند.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده درباره قالب‌های مرحله‌ای مشخص می‌گردد که در بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی چیدمان، به بهینه کردن مسئله توجهی نشده است و تنها با چند قانون ساده، طراحی چیدمان صورت گرفته است. در تحقیقاتی نیز که مسئله بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفته است، تنها تعادل گشتاور قالب مد نظر می‌باشد بدون اینکه رعایت قیود بین سنبه‌ها مورد توجه قرار گیرد. همچنین مطابق با بررسی نویسندگان، پژوهشی که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله طراحی چیدمان سنبه‌ها در قالب‌های مرحله‌ای پردازد، یافت نگردید؛ همچنین وجود نرم‌افزاری که بتواند به‌جای طراح خبره، فرایند طراحی چیدمان این قالب‌ها را انجام دهد برای صنعت بسیار مطلوب می‌باشد به‌طوری‌که افراد با دانش و تجربه اندک نیز بتوانند به طراحی چیدمان سنبه‌ها در قالب‌های مرحله‌ای پردازند. لذا در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن دو هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری و تعادل گشتاور قالب و با توجه به قیود مختلفی که بین سنبه‌ها می‌تواند وجود داشته باشد و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی طراحی چیدمان در قالب‌های مرحله‌ای ارائه و برای اجرای این روش یک نرم‌افزار ایجاد گردیده است. این نرم‌افزار در محیط سالی‌دورکس و به زبان ویژوال بیسیک کدنویسی شده است. ورودی نرم‌افزار سنبه‌های مورد استفاده برای تهیه قطعه ورق و قیود مختلفی که بین آن‌ها وجود دارد، می‌باشد. نرم‌افزار به‌صورت اتوماتیک مشخصات هندسی سنبه‌های برش را استخراج می‌کند و با خواندن قیود مختلف بین سنبه‌های برش، مدل ریاضی را ایجاد کرده و با ارتباط با نرم‌افزار GLPK به حل بهینه این مدل ریاضی پرداخته و خروجی را که شامل توزیع بهینه این سنبه‌ها در ایستگاه‌های کاری مختلف است به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. نرم‌افزار ارائه شده به‌خوبی می‌تواند توسط کاربران در

است. علاوه بر این، آن‌ها یک سیستم پیچیده‌تر جهت پیلوت‌گذاری ارائه دادند که از یک مدل ریاضی بر اساس تبدیل محور میانه^۱ استفاده می‌کند [۱۹]. ایشان همچنین در پژوهشی دیگر سیستمی جهت طراحی اتوماتیک چیدمان سنبه‌ها با استفاده از تئوری مجموعه‌ها ارائه دادند [۲۰].

جیا و همکاران [۲۱] سیستمی جهت طراحی سنبه و ماتریس برای استاتور و روتور به‌صورت ساختاری ارائه کردند. این سیستم شامل سه دسته اطلاعات هندسی، محدودیت‌های مونتاژ و اطلاعات مربوط به سوراخ‌های موجود در صفحه می‌باشد. اطلاعات مربوط به سنبه‌های استاندارد که برای ایجاد روتور و استاتور به کار می‌روند در سیستم ذخیره و دسته‌بندی شده‌اند. لین و همکاران [۲۲] سیستمی برای طراحی قالب‌های مرحله‌ای که عملیات برش، خم و کشش عمیق را انجام می‌دهد ارائه دادند. این سیستم قادر به طراحی اجزای اصلی و استاندارد قالب‌های مرحله‌ای می‌باشد. مقدم و همکاران [۲۳] سیستمی جهت طراحی فرایند چیدمان در قالب‌های برش و برجسته‌کاری ارائه دادند. این سیستم با استفاده از الگوریتم‌های فازی و تشخیص عملیات‌های همزمان عمل می‌کند.

لی و همکاران [۲۴] با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و روش تاگوچی به کاهش برگشت فتری در قالب‌های مرحله‌ای پرداختند. زانگ و اسپس [۲۵] سیستمی برای تخمین هزینه قالب‌های مرحله‌ای که برای ساخت موتور الکتریکی به کار می‌رود، ارائه دادند و تأثیر طراحی چیدمان بر روی هزینه قالب را بررسی کردند. لی و همکاران [۲۶] به بهینه‌سازی ایستگاه برش در قالب‌های مرحله‌ای که برای ساخت قطعات پیچیده خودرو به کار می‌روند پرداختند. آرورا و همکاران [۲۷] به کمک نرم‌افزار سالی‌دورکس به بررسی قالب‌های مرحله‌ای پرداختند و حداکثر تنش و جابجایی اجزای قالب را محاسبه و تحلیل کردند. آلی و همکاران [۲۸] با استفاده از تئوری گراف به طراحی چیدمان در قالب‌های مرحله‌ای پرداختند. شکاروال و همکاران [۲۹] به بررسی طراحی قالب‌های مرحله‌ای در نرم‌افزار اتوکد پرداختند.

یانگ و هیندوجا [۳۰] با استفاده از تعدادی قانون ابتکاری و نظریه مجموعه فازی به طراحی چیدمان سنبه‌ها در قالب‌های مرحله‌ای پرداختند. مورنا و همکاران [۳۱] سیستمی برای استخراج و شناسایی مشخصه‌های قطعات ورق دارای خم جهت برنامه‌ریزی اتوماتیک فرایند تولید این قطعات در قالب‌های مرحله‌ای ارائه دادند. یانگ و همکاران [۳۲] سیستمی برای شناسایی اتوماتیک مشخصه‌های موجود در قطعات ورق که

^۱ Medial axis transform

علت تداخل نمی‌توانند با یکدیگر در یک ایستگاه کاری واقع شوند، قید تداخل حالت اول در نظر گرفته شده است. همچنین مطابق شکل ۱ پ سنبله P2 نمی‌تواند در ایستگاه قبل از ایستگاه سنبله P1 رخ دهد زیرا در این صورت باز هم دو سنبله تداخل دارند و این دو سنبله باید مطابق شکل ۱ ت در دو ایستگاه مختلف رخ دهند. این حالت که یک سنبله به علت تداخل نمی‌تواند در ایستگاه بعد از یک سنبله دیگر قرار گیرد به‌عنوان قید تداخل حالت دوم در نظر گرفته شده است.

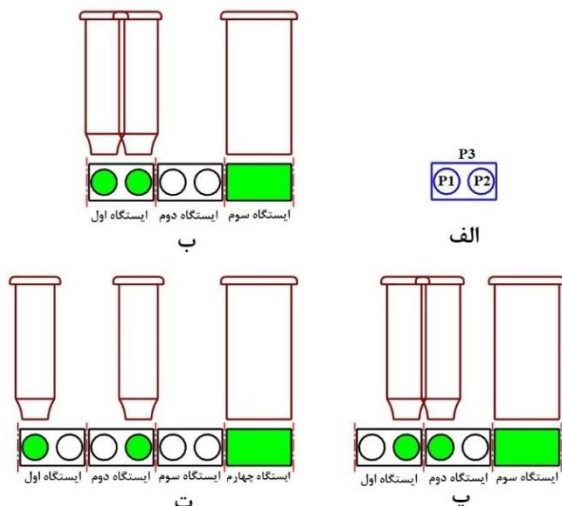


Fig. 1 Workpiece 1 a) Operating punches b) Intersection shanks of punches with same operating station, c) Intersection shanks of punches with different operating station, d) Appropriate layout design without intersection of Punches

شکل ۱ قطعه نمونه ۱ (الف) سنبله‌های لازم برای ایجاد قطعه (ب) تداخل دنباله سنبله‌هایی که در یک ایستگاه واقع شده‌اند (پ) تداخل دنباله سنبله‌هایی که در دو ایستگاه متفاوت واقع شده‌اند (ت) چیدمان مناسب سنبله‌ها بدون تداخل با یکدیگر

۲-۳- قید اولویت سنبله‌های برش

در قالب‌های مرحله‌ای حالاتی رخ می‌دهد که یک سنبله باید حتماً قبل از یک یا چند سنبله دیگر واقع شود. برای مثال بعضی از سوراخ‌ها باید بسیار دقیق و بدون پلیسه با یک تلرانس دقیق ابعادی و هندسی بر روی قطعه ورقی ایجاد شوند. برای ایجاد این سوراخ‌ها از دو یا تعداد بیشتری سنبله برش استفاده می‌شود به طوری که سنبله اول عملیات ایجاد سوراخ و سنبله‌های بعدی عملیات پلیسه‌گیری و ایجاد دقیق سوراخ را بر عهده دارند؛ بنابراین در این حالات سنبله سوراخ‌کاری باید قبل از سنبله‌هایی که برای پلیسه‌گیری و ایجاد دقیق سوراخ به کار می‌روند، رخ دهد؛ همچنین سنبله‌هایی که پلیسه‌گیری و ایجاد دقیق سوراخ را انجام می‌دهند نیز باید به ترتیب دقت کاری در ایستگاه‌های مختلف رخ دهند. برای مثالی دیگر، زمانی که اختلاف اندازه دو

صنعت قالب‌سازی مورد استفاده قرار گیرد و فرایند طراحی چیدمان سنبله‌ها را بسیار آسان‌تر و از منظر تعداد ایستگاه‌های کاری و گشتاور قالب بهینه کند.

۲- فرایند طراحی چیدمان

پس از تعیین سنبله‌های مورد نیاز برای تولید قطعه ورقی، طراحان قالب به مرحله طراحی چیدمان سنبله‌ها وارد می‌شوند. در این مرحله، طراحان قالب تعداد ایستگاه‌های کاری قالب و نحوه توزیع سنبله‌ها را مشخص می‌کنند. این فرایند، کاری مشکل و زمان‌بر می‌باشد. اگر تعداد سنبله‌های برش برابر n باشد، تعداد حالات کلی که باید برای حل بهینه مسئله طراحی چیدمان بررسی کرد برابر رابطه (۱) می‌باشد. در این رابطه k تعداد زیرمجموعه‌های غیر خالی است که می‌توان از n سنبله ایجاد کرد و بین ۱ تا n متغیر است. i نیز متغیری برای محاسبه تعداد افزاینده‌های مجموعه n عضو است [۲۰].

$$\sum_{k=1}^n k! \binom{n}{k} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \binom{k}{i} (k-i)^n \quad (1)$$

این رابطه بزرگ بودن تعداد حالات مورد بررسی را نشان می‌دهد به طوری که در زمان‌های عادی نمی‌توان این تعداد حالات را بررسی کرد. به علت وجود قیود مختلف بین سنبله‌های برش، تمامی حالات چیدمان امکان‌پذیر نیست و با توجه به این قیود و اهداف مورد نظر، باید مسئله طراحی چیدمان حل شود.

۳- انواع قیود بین سنبله‌ها

در این قسمت انواع قیودی که بین سنبله‌های برش در ایستگاه‌های کاری مختلف می‌تواند وجود داشته باشد، بیان شده است. این قیود با توجه به کتب مرجع [۳۷-۴۰] و استفاده از تجربیات طراحان خبره قالب مد نظر قرار گرفته است.

۳-۱- قید تداخل سنبله‌های برش

بعضی از سنبله‌های برش به دلیل تداخل با یکدیگر، نمی‌توانند در یک ایستگاه رخ دهند؛ به‌طور مثال در شکل ۱ سنبله P3 که برای ایجاد کانتور خارجی قطعه ورقی می‌باشد، به‌طور کامل با دو سنبله P1 و P2 که برای ایجاد دو سوراخ قطعه ورقی به کار می‌روند تداخل داشته و نمی‌تواند با این دو سنبله در یک ایستگاه رخ دهد؛ همچنین ممکن است دو سنبله با یکدیگر تداخل کامل نداشته باشند اما به دلیل نزدیک بودن آن‌ها به یکدیگر و تداخل دنباله‌ها، آن‌ها نتوانند در یک ایستگاه رخ دهند. دو سنبله P1 و P2 در شکل ۱ ب چنین تداخلی دارند. این حالت که دو سنبله به

۴- مدل‌سازی و حل مسئله

برای کاهش هزینه قالب سنبه‌ها باید در حداقل تعداد ایستگاه ممکن کنار یکدیگر قرار گیرند. همچنین سنبه‌ها باید به گونه‌ای در ایستگاه‌ها توزیع شوند که گشتاور ناشی از آن‌ها نسبت به مرکز قالب حداقل گردد. اگر سنبه‌ها به صورت نامناسبی در ایستگاه‌های کاری توزیع شوند میل راهنماهای قالب باید گشتاورهای بزرگی را تحمل کنند. در تحقیق حاضر، مسئله طراحی چیدمان سنبه‌ها با توجه به این دو هدف مدل‌سازی شده است. از آنجا که گشتاور سنبه‌ها نسبت به محور Y همواره ثابت است و به نحوه توزیع سنبه‌ها بستگی ندارد، گشتاور سنبه‌ها تنها در راستای محور X مدنظر قرار گرفته است. همچنین قیودی که بین سنبه‌های مختلف وجود دارد باید رعایت شود. در این قسمت مدل‌سازی ریاضی برای حل مسئله طراحی چیدمان ارائه شده است.

۴-۱- مدل‌سازی ریاضی

مدل ریاضی ارائه شده برای حل مسئله طراحی چیدمان سنبه‌های برش با در نظر گرفتن توابع هدف و قیود معرفی شده در بخش ۴، مطابق روابط (۲) تا (۱۱) می‌باشد:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^m St_j \quad (2)$$

$$\text{Min } T = \left| \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m F_i \times X_{i,j} \times B_{i,j} \right| \quad (3)$$

به شرطی که:

$$U_j = \sum_{i=1}^n B_{i,j} \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$St_j = \begin{cases} 1 & \text{if } U_j \geq 1 \\ 0 & \text{if } U_j = 0 \end{cases} \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m B_{i,j} = 1 \quad (\forall i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$B_{t,j} + B_{u,j} \leq 1 \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$B_{v,j+1} + B_{w,j} \leq 1 \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$B_{r,j} - B_{s,j} = 0 \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

$$\sum_{k=j}^m B_{p,k} \leq 1 - B_{q,j} \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

$$B_{f,d} = 1 \quad (11)$$

که n تعداد سنبه‌ها، m تعداد ایستگاه‌ها، M نماد عدد بزرگ، f شماره سنبه‌ای که باید در ایستگاه مشخص d رخ دهد، d شماره ایستگاهی که سنبه f مشخص باید در این ایستگاه رخ دهد، r, s شماره دو سنبه‌ای که باید در یک ایستگاه رخ دهند، p, q شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر قید اولویت دارند، t, u شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر تداخل حالت اول را دارند، v, w

سوراخ که نزدیک یکدیگر می‌باشند و با هم تداخل دارند، زیاد باشد، ابتدا باید سوراخ بزرگ ایجاد شود و سپس سوراخ کوچک‌تر در مراحل بعدی ایجاد شود. چنانچه ابتدا سوراخ کوچک‌تر ایجاد شود و بعد از آن سوراخ بزرگ ایجاد شود، به علت کشش مواد حین ایجاد سوراخ بزرگ، سوراخ کوچک تغییر شکل می‌دهد. این موضوع را در شکل ۲ می‌توان دید. برای ایجاد این قطعه ورقی ابتدا باید سنبه P5 رخ دهد و پس از آن سنبه‌های P3 و P4 رخ دهند تا به علت کشش مواد، دو سوراخ ایجاد شده با سنبه‌های P3 و P4 دچار تغییر شکل نشوند.

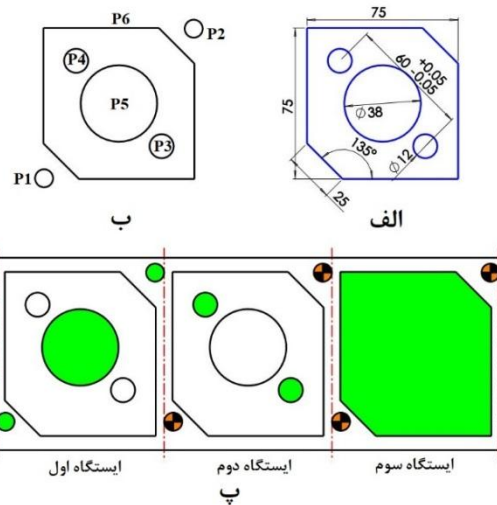


Fig. 2 a) Workpiece 2 b) Operating punches c) Strip layout design
شکل ۲ الف) قطعه نمونه ۲ ب) سنبه‌های لازم برای ایجاد قطعه پ) طراحی چیدمان سنبه‌ها در ایستگاه‌های کاری مختلف

۳-۳- قید عملکرد همزمان سنبه‌های برش

در قالب‌های مرحله‌ای بعضی از سنبه‌های برش باید با یکدیگر در یک ایستگاه رخ دهند؛ به طور مثال در صورتی که تفرانس فاصله بین دو یا چند سوراخ از مقدار مشخصی کمتر باشد (برای مثال سنبه‌های P3 و P4 در شکل ۲)، باید این سنبه‌ها با یکدیگر در یک ایستگاه عمل نمایند.

۳-۴- قید عملکرد در ایستگاه مشخص

بعضی از سنبه‌های برش باید در ایستگاهی مشخص روی دهند. بعضی از آن‌ها باید در ایستگاه اول رخ دهند؛ به طور مثال سنبه‌هایی که برای ایجاد سوراخ راهنما به کار می‌روند (سنبه‌های P1 و P2 در شکل ۲) باید در ایستگاه اول رخ دهند. بعضی از سنبه‌ها نیز باید در ایستگاه آخر رخ دهند؛ برای مثال در شکل ۲ سنبه P6 که برای ایجاد کانتور خارجی قطعه ورقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید در ایستگاه آخر رخ دهد.

$$U_j \leq St_j \times M \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

$$St_j \leq U_j \quad (\forall j = 1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

زمانی که حداقل یک سنبه در ایستگاه زام باشد روابط (۱۵) و (۱۶) به همراه رابطه (۴) مقدار St_j را برابر ۱ می‌کنند و زمانی که هیچ سنبه‌ای در ایستگاه زام نباشد مقدار آن را برابر صفر می‌کنند. اگر حداقل یک سنبه در ایستگاه زام باشد آنگاه مقدار U_j مخالف صفر می‌شود و برای برقراری رابطه (۱۵) مقدار St_j باید برابر ۱ شود. رابطه (۱۶) برای حالتی است که هیچ سنبه‌ای در ایستگاه زام نباشد. در این حالت U_j برابر صفر می‌شود و طبق رابطه (۱۵) St_j می‌تواند دو مقدار صفر و ۱ را اختیار کند اما رابطه (۱۶) از این امر جلوگیری و مقدار St_j را صفر می‌کند.

۴-۲- حل مسئله

برای حل مدل ارائه شده، نرم‌افزاری به زبان ویژوال بیسیک و در محیط نرم‌افزار سالی‌دورکس تهیه شده است. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار از طریق فرمی مطابق شکل ۳ وارد می‌شود. این اطلاعات شامل تعداد و آدرس محل ذخیره سنبه‌ها و همچنین قیود بین آن‌ها و مشخصات ورق است. خروجی نرم‌افزار نیز طراحی چیدمان سنبه‌ها در ایستگاه‌های کاری مختلف است. نرم‌افزار پس از دریافت اطلاعات از کاربر، آن‌ها را به اطلاعات مورد نیاز برای حل مدل ریاضی تبدیل می‌کند. در پژوهش حاضر برای حل مدل خطی ارائه شده و بهینه‌سازی از نرم‌افزار GLPK 4.65 استفاده شده است. GLPK یک بسته نرم‌افزاری برای حل مسائل خطی می‌باشد که از روش شاخه و کران برای بهینه‌سازی مسائل گسسته استفاده می‌کند [۴۱]. نرم‌افزار تهیه شده به صورت خودکار با نرم‌افزار GLPK ارتباط برقرار کرده و پس از حل مد خطی، خروجی را که به صورت فایل متنی ذخیره شده است، می‌خواند و تعداد ایستگاه‌های کاری و نحوه چیدمان سنبه‌ها در این ایستگاه‌ها را استخراج می‌کند.

Fig. 3 Data entry form to the software

شکل ۳ فرم ورود اطلاعات به نرم‌افزار

شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر قید تداخل حالت دوم را دارند، F_i نیروی برشی سنبه i ام، U_j تعداد سنبه‌های موجود در ایستگاه زام و $X_{i,j}$ فاصله مرکز سنبه i ام که در ایستگاه زام قرار دارد از مرکز قالب در راستای طولی می‌باشند. همچنین St_j نشان‌دهنده پر یا خالی بودن ایستگاه زام است به طوری که اگر در ایستگاه زام سنبه یا سنبه‌هایی وجود داشته باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود. $B_{i,j}$ نیز نشان‌دهنده وجود یک سنبه در یک ایستگاه مشخص است به طوری که اگر سنبه i ام در ایستگاه زام باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود.

رابطه (۲) تابع هدف اول مسئله برای حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری می‌باشد. رابطه (۳) تابع هدف دوم مسئله برای تعادل گشتاور قالب است. رابطه (۴) تعداد سنبه‌های موجود در ایستگاه زام را می‌شمارد. رابطه (۵) پر یا خالی بودن ایستگاه زام را مشخص می‌کند. رابطه (۶) تضمین می‌کند که هر سنبه تنها در یک ایستگاه رخ دهد. رابطه (۷) تضمین می‌کند دو سنبه که با یکدیگر تداخل حالت اول را دارند در یک ایستگاه رخ ندهند. از آنجا که مقدار $B_{i,j}$ برابر ۰ یا ۱ است این رابطه تنها به یکی از دو سنبه t یا u اجازه رخ دادن در ایستگاه زام را می‌دهد. رابطه (۸) برای رعایت قید تداخل دو سنبه در حالت دوم است به طوری که به سنبه v اجازه نمی‌دهد در ایستگاه بعد از ایستگاه سنبه w قرار گیرد. رابطه (۹) برای برقراری قید عملکرد همزمان سنبه‌های برش است به طوری که دو سنبه r و s که این قید را دارند باید در یک ایستگاه رخ دهند. رابطه (۱۰) برای برقراری قید اولویت عملکرد سنبه‌ها می‌باشد. بر طبق این رابطه اگر سنبه q در ایستگاه زام رخ دهد آنگاه سنبه p نباید در ایستگاه زام و یا ایستگاه‌های بعد از آن قرار گیرد. رابطه (۱۱) بیان می‌کند که سنبه f باید در ایستگاه مشخص d رخ دهد. از آنجا که روابط (۳) و (۵) غیرخطی می‌باشند، مدل ریاضی ارائه شده غیرخطی است. برای خطی کردن مدل ارائه شده، رابطه (۳) به روابط زیر تبدیل شده است.

$$\text{Min } T = T1 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_i \times X_{i,j} \times B_{i,j} \leq T1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_i \times X_{i,j} \times B_{i,j} \geq -T1 \quad (14)$$

همچنین رابطه (۵) به دو رابطه (۱۵) و (۱۶) تبدیل شده است.

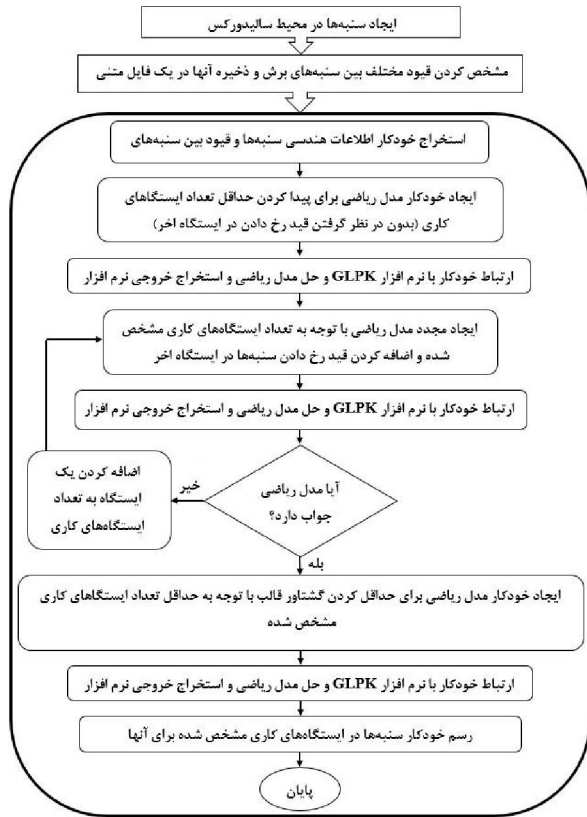


Fig. 4 Structure of developed software for layout design

شکل ۴ ساختار نرم‌افزار تهیه شده برای طراحی چیدمان

۵- مثال‌ها

برای بررسی عملکرد نرم‌افزار ارائه شده، طراحی چیدمان سه قطعه ورقی با آن انجام شده است که در ادامه این سه مثال آمده‌اند.

مثال اول طراحی چیدمان قالب برای قطعه ورقی مطابق شکل ۵ الف می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ ب نمایش داده شده است، برای ایجاد این قطعه ورقی ۱۷ سنبه مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیود بین این ۱۷ سنبه برش مطابق جدول ۱ می‌باشد.

همان‌طور که در بخش ۴-۲ بیان شد خروجی حل مسئله به صورت یک فایل متنی است که توسط نرم‌افزار خوانده شده و به صورت گرافیکی در نرم‌افزار سالی‌دورکس نمایش داده می‌شود. فایل متنی خروجی برنامه در حالت حداقل کردن ایستگاه‌های کاری، برای مثال ۱ در شکل ۶ نمایش داده شده است. در بخش ۴-۱ بیان گردید B_{ij} نشان‌دهنده وجود یک سنبه در یک ایستگاه

برای حل مسئله، دو هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها و تعادل گشتاور قالب مدنظر قرار گرفته شد. برای حل مسئله با هدف دوم نیاز است که تعداد ایستگاه‌ها مشخص باشد. بنابراین مسئله ابتدا با هدف اول حل می‌شود. پس از تعیین تعداد ایستگاه‌ها، مسئله با هدف دوم حل می‌شود. در حل مسئله با هدف اول نیز دو مشکل وجود دارد؛ مشکل اول عدم امکان استفاده از رابطه (۱۱) زمانی که یک سنبه باید در ایستگاه آخر واقع شود، می‌باشد که دلیل آن نیز مشخص نبودن تعداد ایستگاه‌ها کاری است. مشکل دوم این موضوع می‌باشد که شاید مطابق شکل ۱، به اجبار نیاز به یک یا چند ایستگاه خالی بین ایستگاه‌های کاری قالب باشد. درحالی‌که رابطه ۲ تنها ایستگاه‌های پر را شمارش می‌کند و در صورت وجود ایستگاه‌های خالی بین ایستگاه‌های کاری مختلف، آن‌ها را شمارش نمی‌کند. بنابراین برای حل این دو مشکل و تعیین حداقل تعداد ایستگاه‌های کاری حقیقی، مسئله ابتدا بدون توجه به قید رخ دادن یک سنبه مشخص در ایستگاه آخر حل می‌شود و پس از مشخص شدن تعداد ایستگاه‌ها، مسئله مجدداً با هدف اول و اضافه کردن قید رخ دادن یک سنبه مشخص در ایستگاه آخر حل می‌گردد. اگر مسئله پاسخ داشت، تعداد حداقل ایستگاه‌ها درست مشخص شده است؛ در غیر این صورت با اضافه کردن یک ایستگاه به تعداد ایستگاه‌ها، مسئله مجدداً حل می‌شود. این اضافه کردن به تعداد ایستگاه‌های کاری و حل مجدد مسئله تا آنجا ادامه می‌یابد که مسئله به پاسخ برسد و تعداد حقیقی حداقل ایستگاه‌های کاری مورد نیاز مشخص شود. پس از مشخص شدن تعداد ایستگاه‌ها مسئله با هدف دوم حل شده و پاسخ نهایی به دست می‌آید.

پس از اتمام حل شدن مدل ارائه شده، نرم‌افزار پاسخ به دست آمده از نرم‌افزار GLPK که به صورت یک فایل متنی است را می‌خواند و پاسخ را که همان نحوه چیدمان سنبه‌های برش است، به صورت گرافیکی در محیط سالی‌دورکس نمایش می‌دهد. پس از مشاهده خروجی نرم‌افزار، چنانچه قیدی مدنظر قرار نگرفته بود و یا به اشتباه وارد شده بود می‌تواند توسط کاربر تصحیح و نرم‌افزار مجدداً اجرا شود تا پاسخ مناسب به دست آید. شکل ۴ ساختار نحوه عملکرد نرم‌افزار تهیه شده را نمایش داده است.

شکل ۸ فایل متنی خروجی برنامه در حالت حداقل کردن گشتاور قالب برای مثال ۱ را نمایش داده است. در شکل ۹ الف نیز نمایش گرافیکی نتیجه حاصل از عملکرد نرم‌افزار را زمانی که هدف حداقل کردن گشتاور قالب است، نشان داده است. شکل ۹ ب نیز فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب را در این چیدمان نمایش داده است. در این حالت این فاصله برابر ۸،۶۵ mm مرکز قالب از مرکز فشار قالب زمانی که مسئله برای حداقل کردن گشتاور قالب حل شده است به مقدار زیادی نسبت به زمانی که هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری بوده کاهش یافته است و سنبه‌های به‌طور مناسب‌تری در ایستگاه‌های کاری توزیع شده‌اند.

برای بررسی بهتر عملکرد نرم‌افزار ارائه شده، طراحی چیدمان دو قالب پیشنهاد شده توسط طراحان خبره که در مرجع [۴۰] آمده است با نتایج حاصل از نرم‌افزار مقایسه گردیده است. در ادامه این دو مثال مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	8[1,1]	*	0	1
2	8[1,2]	*	0	1
3	8[1,3]	*	0	1
4	8[1,4]	*	0	1
5	8[2,1]	*	1	1
6	8[2,2]	*	0	1
7	8[2,3]	*	0	1
8	8[2,4]	*	0	1
9	8[3,1]	*	1	1
10	8[3,2]	*	0	1
11	8[3,3]	*	0	1
12	8[3,4]	*	0	1
13	8[4,1]	*	0	1
14	8[4,2]	*	0	1
15	8[4,3]	*	0	1
16	8[4,4]	*	1	1
17	8[5,1]	*	1	1
18	8[5,2]	*	0	1
19	8[5,3]	*	0	1
20	8[5,4]	*	0	1
21	8[6,1]	*	0	1
22	8[6,2]	*	0	1
23	8[6,3]	*	0	1
24	8[6,4]	*	1	1
25	8[7,1]	*	0	1
26	8[7,2]	*	0	1
27	8[7,3]	*	0	1
28	8[7,4]	*	1	1
29	8[8,1]	*	0	1
30	8[8,2]	*	0	1
31	8[8,3]	*	0	1
32	8[8,4]	*	1	1
33	8[9,1]	*	0	1
34	8[9,2]	*	0	1
35	8[9,3]	*	0	1
36	8[9,4]	*	1	1
37	8[10,1]	*	0	1
38	8[10,2]	*	0	1
39	8[10,3]	*	0	1
40	8[10,4]	*	1	1
41	8[11,1]	*	0	1
42	8[11,2]	*	0	1
43	8[11,3]	*	0	1
44	8[11,4]	*	1	1
45	8[12,1]	*	0	1
46	8[12,2]	*	1	1
47	8[12,3]	*	0	1
48	8[12,4]	*	0	1
49	8[13,1]	*	0	1
50	8[13,2]	*	1	1
51	8[13,3]	*	0	1
52	8[13,4]	*	0	1
53	8[14,1]	*	1	1
54	8[14,2]	*	0	1
55	8[14,3]	*	0	1
56	8[14,4]	*	0	1
57	8[15,1]	*	0	1
58	8[15,2]	*	0	1
59	8[15,3]	*	0	1
60	8[15,4]	*	1	1
61	8[16,1]	*	0	1
62	8[16,2]	*	0	1
63	8[16,3]	*	0	1
64	8[16,4]	*	1	1
65	8[17,1]	*	0	1
66	8[17,2]	*	0	1
67	8[17,3]	*	0	1
68	8[17,4]	*	1	1

Fig. 6 The output of the software as a text file in the mode of minimizing the workstations for example 1

شکل ۶ خروجی برنامه به‌صورت فایل متنی در حالت حداقل کردن ایستگاه‌های کاری برای مثال ۱

مشخص است به‌طوری‌که اگر سنبه i ام در ایستگاه j ام باشد مقدار آن برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است مقدار $B_{1,1}$ (عدد نمایش داده شده در ستون Activity) برابر ۱ است که بدین معناست سنبه $P1$ در ایستگاه اول قرار گرفته است. همچنین مقدار $B_{1,2}$ ، $B_{1,3}$ و $B_{1,4}$ برابر صفر است که نشان‌دهنده این می‌باشد که سنبه $P1$ در ایستگاه‌های دوم، سوم و چهارم قرار نگرفته است. این موضوع برای سنبه‌های $P2$ تا $P17$ نیز در این شکل نمایش داده شده است و توصیف آن‌ها مطابق توضیحات مربوط به سنبه $P1$ می‌باشد. همچنین نمایش گرافیکی نتیجه حاصل از عملکرد نرم‌افزار زمانی که هدف حداقل کردن ایستگاه‌ها باشد مطابق شکل ۷ الف است. نرم‌افزار تعداد ۴ ایستگاه کاری برای قالب در نظر گرفته است. در شکل ۷ ب نیز فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب نمایش داده شده است. این فاصله برابر ۱۰،۱۳ mm

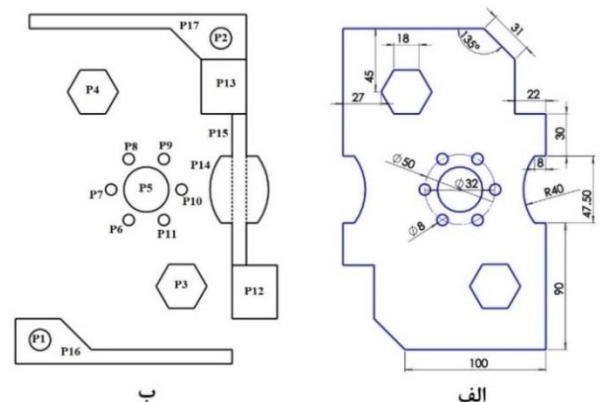


Fig. 5 a) Sheet metal workpiece of example 1 b) Operating punches for example 1

شکل ۵ الف) قطعه ورقی مثال ۱ ب) سنبه‌های لازم برای ایجاد قطعه ورقی مثال ۱

جدول ۱ قیود بین سنبه‌های برش برای مثال ۱

نام قید	سنبه‌های با این قید
قید تداخل حالت اول	{P3,P12}, {P12,P15}, {P12,P16}, {P13,P15}, {P2, P13,P17}, {P14, P15}, {P12, P14}, {P13, P14}, {P10, P14}, {P3, P15}
قید تداخل حالت دوم	{P4, P13}, {P17, P13}, {P16, P12}, {P7, P14}, {P15, P4}
قید اولویت عملکرد	{P5, P6}, {P5, P7}, {P5, P8}, {P5, P9}, {P5, P10}, {P5, P11}
قید عملکرد همزمان سنبه‌های برش	{P6,P7,P8,P9,P10,P11}
قید عملکرد در ایستگاه مشخص	{P1, P2, 1}, {P15,P16,P17, L}

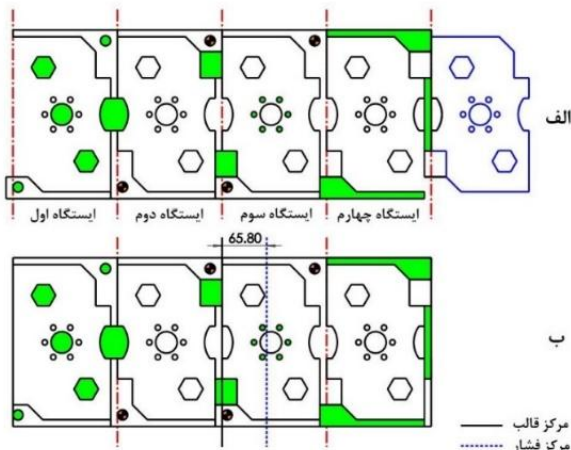


Fig. 9 a) The proposed layout design by the software in the mode of minimizing the die torque for example 1 b) The distance of the pressure center of the die from the geometric center of the die

شکل ۹ الف) طراحی چیدمان پیشنهادی توسط نرم‌افزار در حالت حداقل کردن گشتاور قالب برای مثال ۱ ب) فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب در این حالت

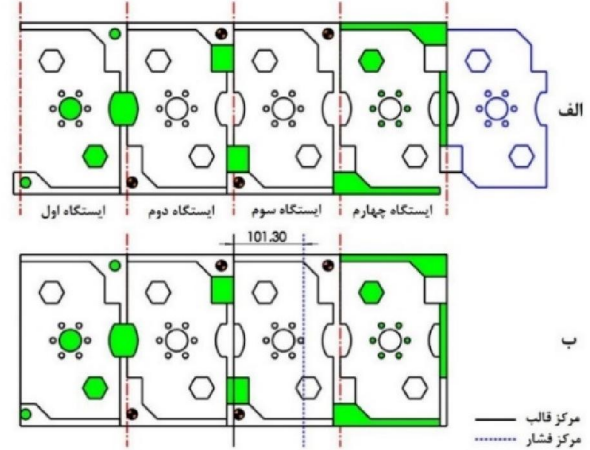


Fig. 7 a) The proposed layout design by the software in the mode of minimizing the workstations for example 1 b) The distance of the pressure center of the die from the geometric center of the die

شکل ۷ الف) طراحی چیدمان پیشنهادی توسط نرم‌افزار در حالت حداقل کردن ایستگاه‌های کاری برای مثال ۱ ب) فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب در این حالت

مثال دوم مطابق شکل ۱۰ می‌باشد و از مرجع [۴۰] انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل نمایش داده شده است برای تولید این قطعه ورقی نیاز به ۸ سنبه برش می‌باشد. قیود بین سنبه‌های برش برای این مثال مطابق جدول ۲ مد نظر قرار گرفته است. از سوراخی که به وسیله سنبه P1 ایجاد می‌شود به‌عنوان سوراخ راهنما در ایستگاه‌های بعدی استفاده می‌شود. لذا لازم است این سنبه در ایستگاه اول رخ دهد. سنبه P8 نیز کانتور خارجی قطعه ورقی را ایجاد می‌کند بنابراین این سنبه باید در ایستگاه آخر واقع شود. همچنین این سنبه با تمامی سنبه‌های دیگر تداخل دارد. هر کدام از سنبه‌های P2 تا P7 که برای ایجاد شش سوراخ غیر دایره‌ای روی قطعه ورقی به کار می‌روند نیز به علت نزدیک بودن به دو سنبه کناری خود، با آن‌ها قید تداخل حالت اول دارند. سنبه P1 نیز با سنبه‌های P2 تا P7 تداخل دارد.

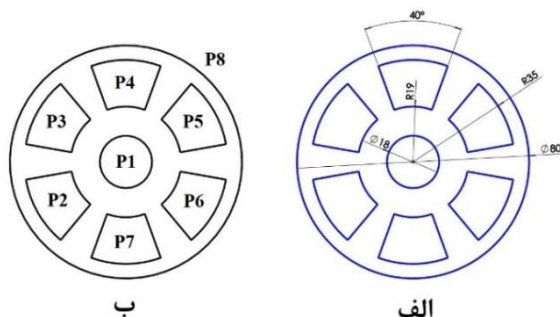


Fig. 10 a) Sheet metal workpiece of example 2 b) Operating punches for example 2

شکل ۱۰ الف) قطعه ورقی مثال ۲ ب) سنبه‌های لازم برای ایجاد قطعه ورقی مثال ۲

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	8[1,1]	*	1	0
2	8[1,2]	*	0	0
3	8[1,3]	*	0	0
4	8[1,4]	*	0	0
5	8[2,1]	*	1	0
6	8[2,2]	*	0	0
7	8[2,3]	*	0	0
8	8[2,4]	*	0	0
9	8[3,1]	*	1	0
10	8[3,2]	*	0	0
11	8[3,3]	*	0	0
12	8[3,4]	*	0	0
13	8[4,1]	*	1	0
14	8[4,2]	*	0	0
15	8[4,3]	*	0	0
16	8[4,4]	*	0	0
17	8[5,1]	*	1	0
18	8[5,2]	*	0	0
19	8[5,3]	*	0	0
20	8[5,4]	*	0	0
21	8[6,1]	*	0	0
22	8[6,2]	*	0	0
23	8[6,3]	*	1	0
24	8[6,4]	*	0	0
25	8[7,1]	*	0	0
26	8[7,2]	*	0	0
27	8[7,3]	*	1	0
28	8[7,4]	*	0	0
29	8[8,1]	*	0	0
30	8[8,2]	*	0	0
31	8[8,3]	*	1	0
32	8[8,4]	*	0	0
33	8[9,1]	*	0	0
34	8[9,2]	*	0	0
35	8[9,3]	*	1	0
36	8[9,4]	*	0	0
37	8[10,1]	*	0	0
38	8[10,2]	*	0	0
39	8[10,3]	*	1	0
40	8[10,4]	*	0	0
41	8[11,1]	*	0	0
42	8[11,2]	*	0	0
43	8[11,3]	*	1	0
44	8[11,4]	*	0	0
45	8[12,1]	*	0	0
46	8[12,2]	*	1	0
47	8[12,3]	*	0	0
48	8[12,4]	*	0	0
49	8[13,1]	*	0	0
50	8[13,2]	*	1	0
51	8[13,3]	*	0	0
52	8[13,4]	*	0	0
53	8[14,1]	*	1	0
54	8[14,2]	*	0	0
55	8[14,3]	*	0	0
56	8[14,4]	*	0	0
57	8[15,1]	*	0	0
58	8[15,2]	*	0	0
59	8[15,3]	*	0	0
60	8[15,4]	*	1	0
61	8[16,1]	*	0	0
62	8[16,2]	*	0	0
63	8[16,3]	*	0	0
64	8[16,4]	*	1	0
65	8[17,1]	*	0	0
66	8[17,2]	*	0	0
67	8[17,3]	*	0	0
68	8[17,4]	*	1	0

Fig. 8 The output of the software as a text file in the mode of minimizing the die torque for example 1

شکل ۸ خروجی برنامه به‌صورت فایل متنی در حالت حداقل کردن گشتاور قالب برای مثال ۱

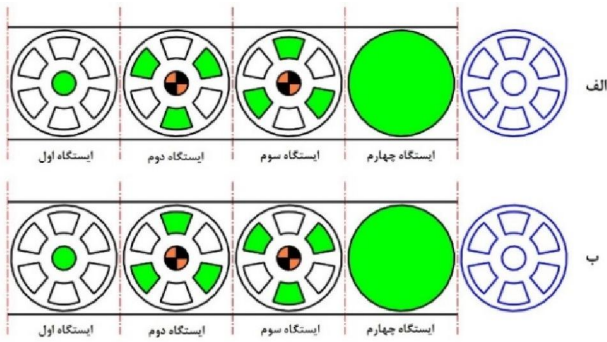


Fig. 12 Strip layout design for example 2 a) The design suggested by the software b) The design suggested by the reference [40]

شکل ۱۲ طراحی چیدمان سنبه‌ها برای مثال ۲ الف) طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار ب) طرح پیشنهادی توسط مرجع [۴۰]

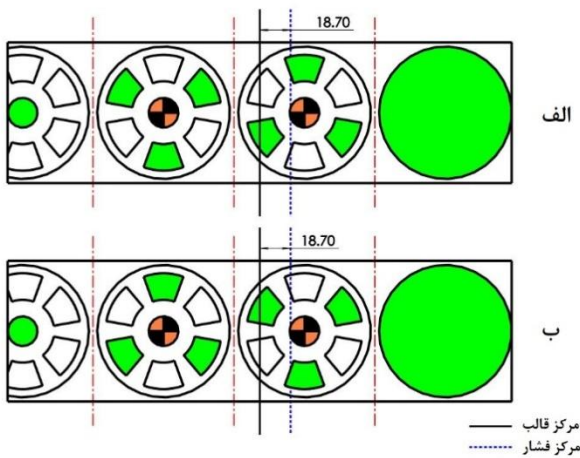


Fig. 13 The distance of the pressure center of the die from the geometric center of the die for example 2 a) The design suggested by the software b) The design suggested by the reference [40]

شکل ۱۳ فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب برای مثال ۲ الف) طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار ب) طرح پیشنهادی توسط مرجع [۴۰]

شکل ۱۴ الف مثال سوم را نمایش می‌دهد. این مثال نیز از مرجع [۴۰] انتخاب شده است. مطابق شکل ۱۴ ب برای ایجاد این قطعه ورقه‌نیاز به ۷ سنبه برش می‌باشد. دو سنبه P1 و P2 برای ایجاد سوراخ‌های راهنما به کار می‌روند و باید در ایستگاه اول قرار گیرند. سنبه P3 نیز با سنبه‌های P4, P5, P6 و P7 به علت هم‌پوشانی یا نزدیک بودن تداخل دارد؛ همچنین سنبه‌های P4 و P5 با یکدیگر و سنبه‌های P6, P7 تداخل دارند. سنبه P6 نیز با سنبه P7 هم‌پوشانی داشته و با آن تداخل دارد. سنبه P7 نیز به علت ایجاد کانتور خارجی قطعه باید در ایستگاه آخر رخ دهد. خلاصه قیود بین سنبه‌ها برای این قطعه نمونه ورقه در جدول ۳ موجود است.

جدول ۲ قیود بین سنبه‌های برش برای مثال ۲

Table 2 Constraints between Piercing punches for example 2

نام قید	سنبه‌های با این قید
قید تداخل حالت اول	{P2,P3}, {P3,P4}, {P4,P5}, {P5,P6}, {P6,P7}, {P7, P2}, {P8, P2}, {P8, P3}, {P8, P4}, {P8, P5}, {P8, P6}, {P8, P7}, {P1, P2}, {P1, P3}, {P1, P4}, {P1, P5}, {P1, P6}, {P1, P7}
قید تداخل حالت دوم	-----
قید اولویت عملکرد	-----
قید عملکرد همزمان سنبه‌های برش	-----
قید عملکرد در ایستگاه مشخص	{P1, 1}, {P8, L}

شکل ۱۱ فایل متنی خروجی برنامه برای مثال ۲ را نمایش داده است. شکل ۱۲ الف نیز نمایش گرافیکی طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار را نمایش می‌دهد. شکل ۱۲ ب نیز طرح پیشنهادی توسط مرجع [۴۰] را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است در هر دو طرح پیشنهادی تعداد ۴ ایستگاه برش برای تولید قطعه ورقه مد نظر قرار گرفته است. تنها از منظر چیدمان سنبه‌ها این دو طرح متفاوت هستند. همچنین هر دو طرح پیشنهادی از منظر تعادل گشتاور قالب مقایسه گردیده‌اند. در شکل ۱۳ فاصله مرکز هندسی قالب از مرکز فشار قالب برای هر دو طرح نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است این فاصله برای هر دو طرح یکسان و برابر ۱۸٫۷ mm است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب نرم‌افزار می‌باشد.

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	B[1,1]	*	1	0
2	B[1,2]	*	0	0
3	B[1,3]	*	0	0
4	B[1,4]	*	0	0
5	B[2,1]	*	0	0
6	B[2,2]	*	0	0
7	B[2,3]	*	1	0
8	B[2,4]	*	0	0
9	B[3,1]	*	0	0
10	B[3,2]	*	1	0
11	B[3,3]	*	0	0
12	B[3,4]	*	0	0
13	B[4,1]	*	0	0
14	B[4,2]	*	0	0
15	B[4,3]	*	1	0
16	B[4,4]	*	0	0
17	B[5,1]	*	0	0
18	B[5,2]	*	1	0
19	B[5,3]	*	0	0
20	B[5,4]	*	0	0
21	B[6,1]	*	0	0
22	B[6,2]	*	0	0
23	B[6,3]	*	1	0
24	B[6,4]	*	0	0
25	B[7,1]	*	0	0
26	B[7,2]	*	1	0
27	B[7,3]	*	0	0
28	B[7,4]	*	0	0
29	B[8,1]	*	0	0
30	B[8,2]	*	0	0
31	B[8,3]	*	0	0
32	B[8,4]	*	1	0

Fig. 11 The output of the software as a text file for example 2

شکل ۱۱ خروجی برنامه به صورت فایل متنی برای مثال ۲

مرکز هندسی قالب برای دو طرح پیشنهادی نرم‌افزار و طراح خبره نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است در طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار، فاصله مرکز هندسی قالب از مرکز فشار قالب برابر ۱,۴ mm می‌باشد که بسیار کمتر از مقدار پیشنهاد شده توسط طراح خبره است. لذا طرح پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار پیشنهادی بسیار مناسب‌تر می‌باشد.

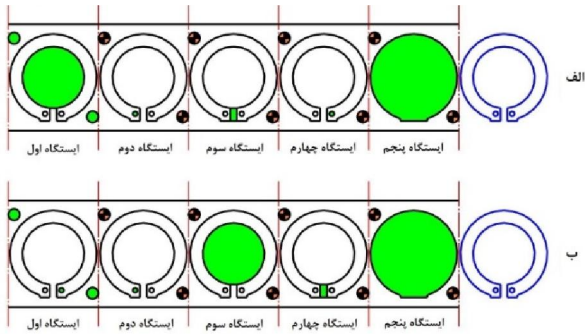


Fig. 16 Strip layout design for example 3 a) the design suggested by the software b) the design suggested by the reference [40]

شکل ۱۶ طراحی چیدمان سنبه‌ها برای مثال ۳ الف) طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار ب) طرح پیشنهادی توسط مرجع [۴۰]

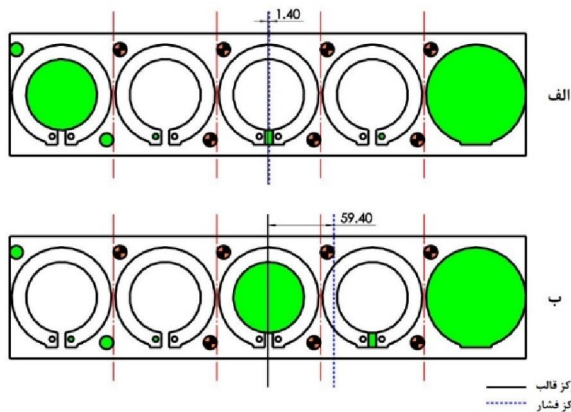


Fig. 17 The distance of the pressure center of the die from the geometric center of the die for example 3 a) the design suggested by the software b) the design suggested by the reference [40]

شکل ۱۷ فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب برای مثال ۳ الف) طرح پیشنهادی توسط نرم‌افزار ب) طرح پیشنهادی توسط مرجع [۴۰]

خلاصه عملکرد نرم‌افزار برای سه مثال در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ نتایج عملکرد نرم‌افزار برای سه مثال

شماره مثال	تعداد سنبه‌ها	تعداد ایستگاه‌های پیشنهادی	فاصله مرکز فشار قالب از مرکز هندسی قالب (mm)
۱	۱۷	۴	۶۵,۸
۲	۸	۴	۱۸,۷
۳	۷	۵	۱,۴

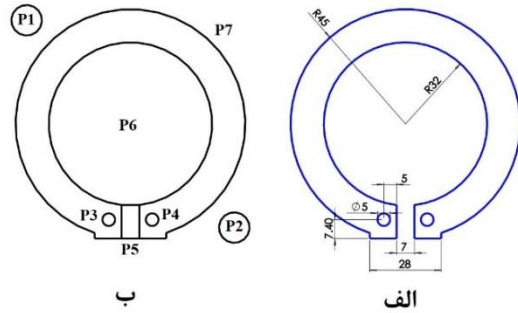


Fig. 14 a) Sheet metal workpiece of example 3 b) Operating punches for example 3

شکل ۱۴ الف) قطعه ورقی مثال ۳ ب) سنبه‌های لازم برای ایجاد قطعه ورقی

جدول ۳ قیود بین سنبه‌های برش برای مثال ۳

نام قید	سنبه‌های با این قید
قید تداخل حالت اول	{P3,P4,P5, P6, P7}
قید تداخل حالت دوم	-----
قید اولویت عملکرد	-----
قید عملکرد همزمان سنبه‌های برش	-----
قید عملکرد در ایستگاه مشخص	{P1, P2, 1}, {P7, L}

شکل ۱۵ فایل متنی خروجی برنامه برای مثال ۳ را نمایش

داده است.

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	B[1,1]	*	1	0
2	B[1,2]	*	0	0
3	B[1,3]	*	0	0
4	B[1,4]	*	0	0
5	B[1,5]	*	0	0
6	B[2,1]	*	1	0
7	B[2,2]	*	0	0
8	B[2,3]	*	0	0
9	B[2,4]	*	0	0
10	B[2,5]	*	0	0
11	B[3,1]	*	0	0
12	B[3,2]	*	1	0
13	B[3,3]	*	0	0
14	B[3,4]	*	0	0
15	B[3,5]	*	0	0
16	B[4,1]	*	0	0
17	B[4,2]	*	0	0
18	B[4,3]	*	0	0
19	B[4,4]	*	1	0
20	B[4,5]	*	0	0
21	B[5,1]	*	0	0
22	B[5,2]	*	0	0
23	B[5,3]	*	1	0
24	B[5,4]	*	0	0
25	B[5,5]	*	0	0
26	B[6,1]	*	1	0
27	B[6,2]	*	0	0
28	B[6,3]	*	0	0
29	B[6,4]	*	0	0
30	B[6,5]	*	0	0
31	B[7,1]	*	0	0
32	B[7,2]	*	0	0
33	B[7,3]	*	0	0
34	B[7,4]	*	0	0
35	B[7,5]	*	1	0

Fig. 15 The output of the software as a text file for example 3

شکل ۱۵ خروجی برنامه به صورت فایل متنی برای مثال ۳

در شکل ۱۶ الف) نیز طراحی چیدمان پیشنهادی توسط نرم‌افزار و در شکل ۱۶ ب) طراحی چیدمان پیشنهادی توسط مرجع [۴۰] نمایش داده شده است. در هر دو تعداد ۵ ایستگاه کاری پیشنهاد شده است. در شکل ۱۷، فاصله مرکز فشار قالب از

این ایستگاه رخ دهد	
شماره دو سنبه‌ای که باید در یک ایستگاه رخ دهند	r, s
شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر قید اولویت دارند	p, q
شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر تداخل حالت اول را دارند	t, u
شماره دو سنبه‌ای که با یکدیگر تداخل حالت دوم را دارند	v, w
نیروی برشی سنبه i ام	F_i
تعداد سنبه‌های موجود در ایستگاه z ام	U_j
مقدار آن برابر ۱ است اگر در ایستگاه z ام سنبه‌ای وجود داشته باشد	$St_j \in \{0,1\}$
مقدار آن برابر ۱ است اگر سنبه i ام در ایستگاه z ام باشد	$B_{i,j} \in \{0,1\}$
فاصله مرکز سنبه i ام که در ایستگاه z ام قرار دارد از مرکز قالب در راستای طولی	$X_{i,j}$

۸- مراجع

- [1] S. Nakahara, T. Kojima, K. Tamura, F. Asuke, C. Soda, T. Nakamura, Computer aided progressive die design, in *Proceedings of the Nineteenth International Machine Tool Design and Research Conference*, Springer, pp. 171-176, 1979. https://doi.org/10.1007/978-1-349-81412-1_21
- [2] A. Nee, K. Foong, Some considerations in the design and automatic staging of progressive dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 29, No. 1-3, pp. 147-158, 1992. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90431-Q](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90431-Q)
- [3] H. Ismail, S. Chen, K. Hon, Feature-based design of progressive press tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 3, pp. 367-378, 1996. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00047-X)
- [4] S. K. Gupta, D. A. Bourne, K. Kim, S. Krishnan, Automated process planning for sheet metal bending operations, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 338-360, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80002-2)
- [5] J. Park, M. Kim, S. Lee, An Automated Process Planning and Die Design System for Blanking of Stator and Rotor Parts, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 13, No. 8, pp. 40-51, 1996.
- [6] J. Park, B. Kim, C. Kim, An automated die design system for blanking and piercing of stator and rotor parts, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 22-33, 1997.

اگرچه مطابق مثال‌های ارائه شده، عملکرد نرم‌افزار تهیه شده مناسب می‌باشد اما سیستم ارائه شده محدودیت‌هایی نیز دارد. اول اینکه سیستم ارائه شده تنها قادر به شناسایی مشخصه‌های قطعات ورقی که توسط سنبه‌های برش ایجاد می‌شوند، می‌باشد و از آن نمی‌توان برای طراحی چیدمان در قالب‌های مرحله‌ای که شامل عملیات‌های خم‌کاری، کشش و ... است استفاده نمود. البته از مدل ارائه شده می‌توان در قالب‌های مرحله‌ای شامل عملیات‌های خم‌کاری، کشش و ... نیز استفاده کرد. تنها باید به نرم‌افزار ارائه شده قابلیت شناسایی عملیات خم‌کاری و کشش و نیروهای مربوط به آن‌ها را اضافه کرد. دوم از منظر روش حل مسئله است که در صورت افزایش قابل توجه تعداد سنبه‌ها و قیود بین آن‌ها زمان حل مسئله در مقایسه با روش‌های متاهیوریستیک مانند الگوریتم ژنتیک بیشتر خواهد شد و می‌تواند برای مسائل بسیار بزرگ چالش برانگیز باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر روشی جدید برای بهینه‌سازی طراحی چیدمان سنبه‌ها در قالب‌های مرحله‌ای ارائه شد. در این روش مسئله طراحی چیدمان با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و با توجه به قیود مختلفی که بین سنبه‌ها می‌تواند وجود داشته باشد و دو هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری و تعادل گشتاور قالب، مدل‌سازی ریاضی و حل شد. برای اجرای مدل، نرم‌افزاری به زبان ویژوال بیسیک و در محیط نرم‌افزار سالی‌دورکس تهیه و عملکرد نرم‌افزار با سه مثال بررسی گردید. مقایسه طرح‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار با طرح‌های پیشنهادی توسط طراحان خبره نشان داد که طرح‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار از منظر تعداد ایستگاه کاری و تعادل گشتاور قالب مناسب‌تر و یا مشابه طرح‌های پیشنهادی توسط طراحان خبره است که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر آن است. لذا نرم‌افزار ارائه شده می‌تواند به‌طور مؤثری برای چیدمان بهینه و اتوماتیک سنبه‌ها در قالب‌های مرحله‌ای به کار گرفته شود.

۷- فهرست علائم

n	تعداد سنبه‌ها
m	تعداد ایستگاه‌ها
M	نماد عدد بزرگ
f	شماره سنبه‌ای که باید در ایستگاه مشخص d رخ دهد
d	شماره ایستگاهی که سنبه مشخص f باید در

- Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 1, pp. 525-535, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.049>
- [19] M. Ghatrehnaby, B. Arezoo, Automatic piloting in progressive dies using medial axis transform, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 10, pp. 2981-2997, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.01.007>
- [20] M. Ghatrehnaby, B. Arezoo, Automatic strip layout design in progressive dies, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 23, No. 3, pp. 661-677, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0417-0>
- [21] Z.-X. Jia, H.-L. Li, X.-C. Zhang, J.-Q. Li, B.-J. Chen, Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 9, pp. 837-852, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3006-7>
- [22] B.-T. Lin, K.-M. Huang, K.-Y. Su, C.-Y. Hsu, "Development of an automated structural design system for progressive dies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 5, pp. 1887-1899, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4986-x>
- [23] M. Moghaddam, M. Soleymani, M. Farsi, Sequence planning for stamping operations in progressive dies, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 26, No. 2, pp. 347-357, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0788-0>
- [24] E.-M. Lee, D.-S. Shim, J.-Y. Son, G.-Y. Baek, H.-S. Yoon, K.-B. Ro, Study on design of progressive dies for manufacture of automobile structural member using DP980 advanced high strength steel, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 853-864, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0140-7>
- [25] J. Zhang, D. Spath, Progressive die cost estimation based on lamination design and production scenario in the electric traction motor application, *Procedia Manufacturing*, Vol. 39, pp. 635-644, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.438>
- [26] G. Li, M. Zhou, W. Wang, H. Xiong, Z. Chen, Accurate trimming line optimization of multi-station progressive die for complex automotive structural parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, No. 1, pp. 1185-1203, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1258-1>
- [27] A. Arora, A. Pathak, A. Juneja, P. Shakkarwal, R. Kumar, Design & analysis of progressive die using SOLIDWORKS, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 51, pp. 956-960, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.335>
- [28] S. Aly, H. Abdelaaty, O. M. Dawood, H. M. Hussein, Optimization of strip-layout using graph-theoretic methodology for stamping operations on progressive die: a case study, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 12, p. 5, 2021. <https://doi.org/10.1051/smdo/2021004>
- [29] P. Shakkarwal, R. Kumar, R. Sindhwani, Progressive die design and development using AutoCAD, in [7] J. C. Choi, B. M. Kim, H. Y. Cho, C. Kim, J. H. Kim, An integrated CAD system for the blanking of irregular-shaped sheet metal products, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1-3, pp. 84-97, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00046-6)
- [8] J. Choi, B. Kim, C. Kim, An automated progressive process planning and die design and working system for blanking or piercing and bending of a sheet metal product, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 7, pp. 485-497, 1999. <https://doi.org/10.1007/s001700050093>
- [9] Z.-C. Lin C.-H. Deng, Analysis of a torque equilibrium model and the optimal strip working sequence for a shearing-cut and bending progressive die, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, No. 3, pp. 302-312, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00832-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00832-9)
- [10] Z.-C. Lin C.-C. Chen, The application of the moment equilibrium model to the offset of pressure center of trimming progressive die in IC packaging machine, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 653-661, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00770-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00770-2)
- [11] G.-C. Vosniakos, I. Segredou, T. Giannakakis, Logic programming for process planning in the domain of sheet metal forming with progressive dies, *Journal of Intelligent manufacturing*, Vol. 16, No. 4, pp. 479-497, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10845-005-1659-0>
- [12] S. Kumar, R. Singh, A knowledge-based system to automate the selection of progressive die components, *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 85-96, 2007. <https://doi.org/10.1504/IJCMSSE.2007.013846>
- [13] S. Kumar, R. Singh, An intelligent system for automatic modeling of progressive die, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1-3, pp. 176-183, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.105>
- [14] S. Kumar, R. Singh, A short note on an intelligent system for selection of materials for progressive die components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1-3, pp. 456-461, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.004>
- [15] S. Kumar, R. Singh, Automation of strip-layout design for sheet metal work on progressive die, *Journal of materials processing technology*, Vol. 195, No. 1-3, pp. 94-100, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.119>
- [16] S. Kumar, R. Singh, An expert system for selection of piloting for sheet metal work on progressive die, 2008.
- [17] M. Farsi and B. Arezoo, Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 52-60, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1680-5>
- [18] M. Ghatrehnaby, B. Arezoo, A fully automated nesting and piloting system for progressive dies,

- [34] N. Skampardonis, S. TSIRKAS, S. Grammatikopoulos, Design and analysis of an industrial, progressive die for cutting and forming, 2021. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-262802/v1>
- [35] S. S. K. Prasad, A. K. Rath, Design Calculation and Analysis of Progressive Press Tool For Square washer, *International Research Journal on Advanced Science Hub*, Vol. 3, pp. 52-60, 2021. <https://doi.org/10.47392/irjash.2021.249>
- [36] V. Rathod, P. Jha, N. Sawai, Optical CAD modelling and designing of compound die using the python scripting language, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00922-0>
- [37] N. Posinasetti, *Manufacturing Technology, Foundry, Forming and Welding*, ed: New Delhi: McGraw Hill, 2013.
- [38] C. Poli, *Design for manufacturing: a structured approach*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [39] O. D. Lascoe, *Handbook of fabrication processes*. Asm International, 1988.
- [40] P. N. Rao, *Manufacturing technology*. Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- [41] A. Makhorin, *Introduction to GLPK*, Accessed on 23 June 2012; <https://www.gnu.org/software/glpk/>
- Advances in Engineering Design*: Springer, 2021, pp. 531-539. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4684-0_54
- [30] Y. Yang, S. Hinduja, Sequence planning of sheet metal parts manufactured using progressive dies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10389-8>
- [31] E. Murena, K. Mpofu, A. T. Ncube, O. Makinde, J. A. Trimble, X. V. Wang, Development and performance evaluation of a web-based feature extraction and recognition system for sheet metal bending process planning operations, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 34, No. 6, pp. 598-620, 2021. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1891570>
- [32] Y. Yang, S. Hinduja, O. O. Owodunni, R. Heinemann, Recognition of features in sheet metal parts manufactured using progressive dies, *Computer-Aided Design*, Vol. 134, p. 102991, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.102991>
- [33] A. P. Rao, M. Hadi, Modelling, Analysis and Development of Progressive Die for Seat Rail, in *E3S Web of Conferences*, 2021, Vol. 309: EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901025>