فرایندهای نوین در مهندسی معکوس

علیرضا معصومی[1]، علیرضا شوشتری[2]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲ دانشیار و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، al.shooshtari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶

چکیده

در مقالهٔ حاضر راهبرد نوین در مهندسی معکوس بررسی شده است. برای این منظور، پس از بیان انواع فرایندهای مهندسی و معرفی اجمالی فرایند مهندسی معکوس، راهبرد جدید در طراحی مهندسی جهت انجام پروژه‌های مهندسی معکوس ارائه شده است. در این مقاله شش گام در طراحی نو و معکوس به‌طور کامل معرفی شده و در بخش پایانی، جهت درک هرچه بهتر موضوع، فرایند مهندسی معکوس و روش‌های توصیف‌شده در این مقاله بر روی یک نمونه از مجموعه پروتز آداپتور چرخان اعمال شده است. در مطالعهٔ موردی صورت‌گرفته پس از انتخاب یک محصول مبتنی بر تحلیل نیازها، فرایند مهندسی معکوس با استفاده از راهبرد مثلث طراحی انجام شده است. در این مقاله تأکید شده است که بهره‌گیری از روند مناسب طراحی مهندسی به‌لحاظ کاهش هزینه‌ها و زمان مؤثر خواهد بود. از طرف دیگر، توصیف ارائه‌شده در این مقاله، فرایند مهندسی معکوس را فراتر از فرایند کپی‌برداری قطعات، تصویر کرده و گسترهٔ وسیعی از عملیات فنی، اقتصادی، بازاریابی و جز این‌ها را در برگرفته و کاربردهای گسترده‌ای را برای آن ذکر کرده است.

واژگان کلیدی

مهندسی معکوس، روش‌های طراحی مهندسی، جدول خانهٔ کیفیت، پروتز، آداپتور چرخان، ماتریس تصمیم‌گیری، پریما

۱. مقدمه

امروزه کشورهای گوناگون درپی تقویت اقتصاد خود هستند تا علاوه بر تأمین معیشت مردم بتوانند در اقتصاد جهانی نیز تأثیرگذار باشند. اما باوجود تمامی تلاش‌هایی که در این کشورها انجام می‌شود، هنوز هم بسیاری از فناوری‌ها و درپی آن بازار مصرف این فناوری‌ها در دست کشورهایی معدود باقی مانده است. با توجه به این موضوع، کشورهای در حال توسعه جهت ایجاد یک میانبر برای کم‌کردن فاصلهٔ خود با کشورهای توسعه‌یافته از فرایند مهندسی معکوس برای کشف فناوری‌ها و تولید محصولات به‌روز بهره می‌برند. در دو دههٔ اخیر کشورهای شرق آسیا همچون چین و ژاپن، با انجام گستردهٔ مهندسی معکوس بر محصولات مختلف در حوزه‌های مختلف نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و حتی پزشکی [۱] کاملاً مشهود است که علاوه بر ایجاد اشتغال و پیشرفت در کشور

خود، اقتصاد کشورهای توسعه‌یافته همچون امریکا را به زانو درآورده است. از اینرو شناخت جدیدترین راهبردها جهت انجام فرایند مهندسی معکوس در کشور ما نیز ضروری به‌نظر می‌رسد تا بتوان هرچه سریع‌تر مسیر توسعه را طی نمود. به‌طور کلی می‌توان مهندسی را مجموعه‌ای از وظایف طراحی، ساخت، مونتاژ و تعمیرات محصولات و سیستم‌ها دانست.

فرایندهای مهندسی را نیز می‌توان به دو گونهٔ مهندسی مستقیم و مهندسی معکوس تقسیم نمود. مهندسی مستقیم، یک روند مرسوم و سنتی می‌باشد که حرکت آن از سطوح بالایی مسائل تئوری آغازشده و به ساخت فیزیکی یک سیستم یا محصول ختم می‌شود؛ اما در مقابل، مهندسی معکوس فرایندی است که در طی آن از محصولی که پیش از این ساخته شده است، بدون داشتن نقشه‌ها و مدارک طراحی محصول بتوان مدلی کامپیوتری ایجاد نمود یا به‌عبارتی مهندسی معکوس فرایندی است که در آن با دقت و به‌سرعت، ابعاد اندازه‌گیری شده، اشکال هندسی شامل فاصله‌ها، مساحت‌ها و حجم‌ها محاسبه‌شده و ارزیابی از میزان تلورانس‌های هندسی در یک جسم صورت می‌گیرد [۲]. این فرایند به جهت به‌دست آوردن فناوری یا دانش طراحی به‌وسیلهٔ بازکردن، جداکردن، خردکردن و آنالیز اجزای مختلف یک محصول، جهت فهم کارکرد آن، برای تولید همان محصول و یا در فازهای بعدی، تولید محصولی بهتر برای ارائه به بازار صورت می‌گیرد [۳]. در صنایع گوناگون از مهندسی معکوس برای رسیدن به هدف، با صرف هزینهٔ کمتر و سرعت بیشتر استفاده می‌شود. از این روش برای طراحی قطعات کوچک یا تجهیزات پیشرفته، طراحی نرم‌افزار [۴]، طراحی وب، تولید دارو و حتی طراحی شیوهٔ مدیریت بهره برده می‌شود [۵]. در این مسیر شرکت‌ها با تشکیل گروه‌های تحقیق و توسعه، ضمن بررسی نوع فناوری به‌کاررفته در یک محصول تولیدشده، ابتدا به دانش فنی محصول و نحوهٔ تولید آن پی می‌برند و سپس اقدام به تولید نمونهٔ مشابه محصول و مقایسهٔ آن با محصول اولیه می‌نمایند. در انتها، در صورت تحقق کیفیت مورد نظر، اقدام به تولید انبوه محصول و حتی اقدام به تولید محصول ارتقاءیافته جهت ورود به بازار رقابتی می‌کنند. برای مثال، ژاپن با استفاده از روش مهندسی معکوس، تولید انبوه مدل ژاپنی خودروی فورد امریکا را آغاز کرد [۶]. امروزه کشورهای بسیاری چون چین و کرهٔ جنوبی از این روش بهره می‌برند؛ اما همیشه مهندسی معکوس به جهت کپی‌برداری برای رقابت با شرکت تولیدکنندهٔ اصلی نبوده و اتفاقاً جنبه‌های مثبت بسیاری را نیز دربر می‌گیرد. برای مثال انجام مهندسی معکوس برای تولید قطعهٔ مورد نیاز یک مصرف‌کننده که دیگر کارخانهٔ آن محصول وجود ندارد و یا سازندهٔ محصول دیگر آن را تولید نمی‌کند. جنبهٔ دیگر اعمال مهندسی معکوس محصولات برای انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری به جهت ارتقای محصول می‌باشد. از دیگر جنبه‌های پرکاربرد مهندسی معکوس ساخت پروتزهاست [۷]. در اعمال جراحی، تیم پزشکی با عکسبرداری از عضو آسیب‌دیده جهت جایگزینی آن با پروتز مشابه، از روش مهندسی معکوس بهره می‌برند. در تولید محصولات مکانیکی نیز در سال‌های اخیر با ورود فناوری‌های اسکن ابر نقاط و پردازش تصویر تحول بزرگی در مهندسی معکوس قطعات صورت پذیرفته است [۸].

با مشخص‌شدن اهمیت این موضوع، در این مقاله به فرایندهای نوین طراحی پرداخته شده است. به‌کارگیری مجموعهٔ این فرایندها در پروژه‌های مختلف سبب موفقیت هرچه بهتر پروژه شده و همچنین زمان و هزینه‌ها را کاهش خواهد. از اینرو در این پژوهش، فرایند طراحی مهندسی نوین معرفی شده و شش مرحلهٔ کلی انجام این فرایند توصیف شده است. در بخش پایانی نیز جهت درک هرچه بهتر موضوع، فرایند توصیف‌شده روی یک نمونه پروژهٔ مهندسی معکوس مجموعه پروتز آداپتور چرخان اعمال شده است.

۲. فریند طراحی مهندسی

فارغ از نوع محصول و فرایندهای مهندسی آن، تمامی پروژه‌های مهندسی موفق از روندی جهت طراحی مهندسی محصول خود پیروی شده است که علاوه بر بالا بردن درصد موفقیت آنها موجب کاهش هزینه و زمان صرف‌شده جهت طراحی و ساخت شده است. یکی از پرکاربردترین فرایندهای مدیریت پروژه‌های مهندسی، روش آبشاری نام دارد [۹]. این روش توسط ناسا جهت مدیریت پروژه‌های موشکی فضایی طراحی شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این ۶ مرحله شامل کشف محصول، برنامه‌ریزی پروژه، تعریف محصول، طراحی مفهومی، توسعهٔ محصول و حمایت از محصول می‌باشد. البته شاید انجام صحیح سه مرحلهٔ اول این فرایند بیهوده به‌نظر برسد، اما با انجام

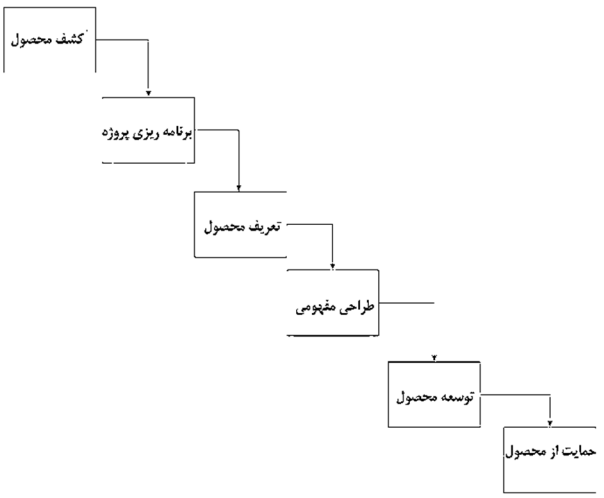
این مراحل کم‌هزینه، موفقیت مراحل بعدی عملیات مهندسی تضمین می‌شود.

۲-۱. کشف محصول

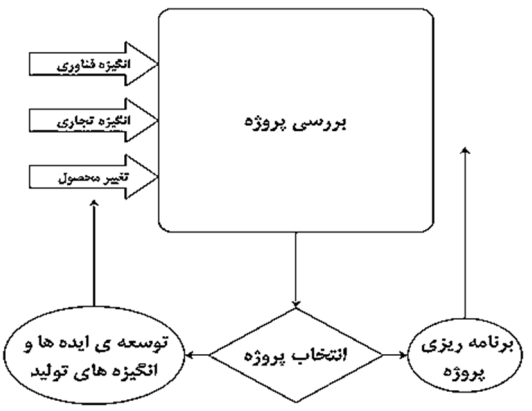
پیش از آغاز فرایند طراحی یا بازطراحی یک محصول باید ارزیابی اولیه‌ای از دلائل اجرای آن انجام شود. به‌طور کلی در این مرحله سه موضوع (شکل ۲) به‌عنوان انگیزه‌های اصلی آغاز فرایند مهندسی، شامل فناوری، بازار و تغییر محصول بایستی مورد بررسی قرار گیر. [۹]. در صورت کسب اطمینان از این موضوع که انگیزه‌های کافی به لحاظ فنی و اقتصادی در انجام پروژه وجود دارد می‌توان به برنامه‌ریزی برای آغاز پروژه پرداخت.

۲-۲. برنامه‌ریزی پروژه

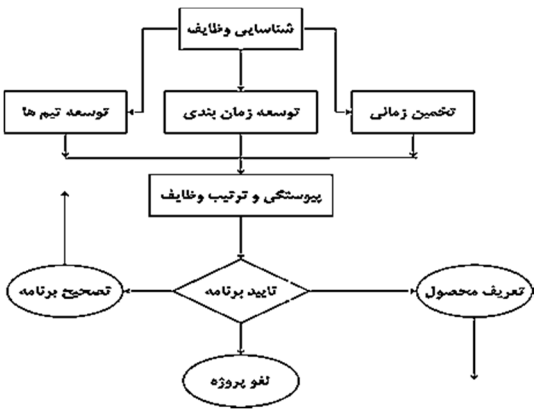
هدف از برنامه‌ریزی، مشخص‌کردن فرایندهای طراحی و تولیدی است که به جهت زمان و منابع مالی، بهینه‌ترین بازدهی را داشته باشند. درواقع برنامه‌ریزی، تبدیل یک طرح خام به برنامه‌ای زمان‌بندی‌شده و تخصیص مناسب منابع مالی، زمانی و انسانی به بخش‌های مختلف می‌باشد، یا به‌عبارتی دیگر بیان می‌دارد که چه افرادی، در چه زمانی، باید در چه مکانی حضور داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است برای انجام یک برنامه‌ریزی مناسب باید پنج گام پیموده شود. پیمودن صحیح این پنج گام و همچنین شیوه‌های صحیح برنامه‌ریزی در مرجع [۱۰] به‌طور مبسوط بیان شده است.



شکل ۱. مدل مدیریت پروژهٔ آبشاری



شکل ۲. فلوچارت روند کشف محصول



شکل۳. فلوچارت برنامه‌ریزی

۲-۳. تعریف محصول

پس از تکمیل تیم طراحی و اطمینان از وجود منابع و انگیزه‌های کافی جهت طراحی و تولید یک محصول، تعریف محصول یا به‌عبارتی شناخت مسئلهٔ طراحی می‌باشد؛ که مهم‌ترین گام در طراحی است و موفقیت در مراحل بعدی تولید محصول، وابسته به انجام صحیح و دقیق این مرحله می‌باشد. از طرفی، یکی از

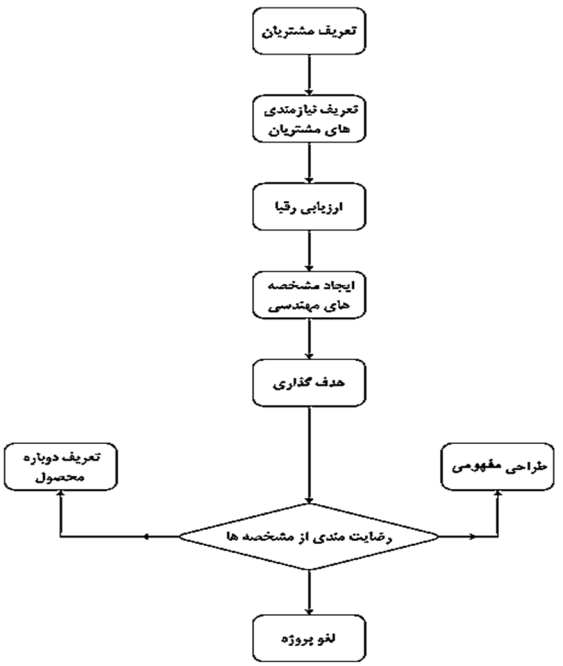
مشکلاتی که مهندسان همیشه با آن مواجه‌اند این است که عموماً خواسته‌های مشتریان مبهم است؛ یا به‌عبارتی خواسته‌های آنان به‌صورت گزاره‌های کیفی است. در حالی‌که علوم مهندسی مبتنی بر عبارات ریاضی و منطقی است و این موضوع کاملاً بدیهی است که اگر خواسته‌های مشتریان به‌خوبی شناخته و برآورده شود موفقیت محصول نیز تضمین شده است؛ بنابراین یافتن راهبردی جهت ترجمهٔ نیازهای مشتریان به پارامترهای مؤثر طراحی امری ضروری به‌نظر می‌رسد که در مرحلهٔ تعریف محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله نوین‌ترین و کارآمدترین روش‌ها جهت تعریف هرچه بهتر محصول و ترجمهٔ خواسته‌های مشتریان به پارامترهای فیزیکی، روش جدول خانهٔ کیفیت است.

۲-۳-۱. جدول خانهٔ کیفیت

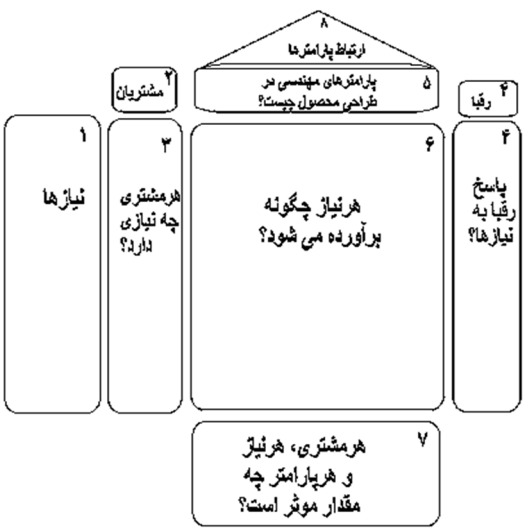
روش خانهٔ کیفیت[۱] رویکردی در طراحی است که در سال ۱۹۹۶ م توسط آکائو[۲] در ژاپن معرفی شد. این رویکرد نخست در کارخانه کوبه میتسوبیشی[۳] در سال ۱۹۷۲ م مورد استفاده قرار گرفت. سپس در سال ۱۹۸۳ وارد امریکا شد و اکنون در کشورهای بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]. از روش خانهٔ کیفیت می‌توان به‌عنوان ماشین مترجم نیازمندی‌های کیفی مشتریان به مشخصات عددی، فنی و مهندسی یادکرد که تأثیر به‌سزایی در افزایش سرعت و کاهش هزینه‌های بخش شناخت مسئله دارد. برای مثال کارخانهٔ تویوتا با استفاده از این روش، در تولید و عرضهٔ خودرویی جدید علاوه بر توسعه و پیشرفت در تولید محصول توانست هزینه‌ها را تا حدود ۶۰ درصد کاهش دهد و زمان توسعهٔ محصول را به یک‌سوم برساند [۱۰]. پس می‌توان گفت روش خانهٔ کیفیت در فاز تعریف محصول به ایجاد اطلاعات مهندسی مورد نیاز کمک می‌کند. این روش از الگوریتم شکل ۴ پیروی می‌کند. با توجه به اینکه شاید این الگوریتم پیچیده باشد و دسترسی به اطلاعات را مشکل می‌کند، برای رفع این پیچیدگی و کاهش زمان، جهت تکمیل فرایند توصیف محصول، روش خانهٔ کیفیت، درون جدولی همانند شکل ۵ اجرا می‌شود. مراحل تکمیل این جدول و همچنین نمونه‌هایی کاربردی در استفاده از این روش در مراجع [۹-۱۲] قابل مشاهده است.

۲-۴. طراحی مفهومی

پس از مشخص‌شدن نیازمندی‌ها و خواسته‌ها، باید ایده‌ها و راه‌کارهای مناسبی جهت پاسخگویی به آنها را جستجو کرد. در واقع می‌توان این مرحله را مرحلهٔ یافتن ایده‌هایی دانست که علاوه بر پاسخگویی به خواسته‌های مورد نظر طراحان با قوانین فیزیکی نیز مطابقت داشته باشد و به‌عبارتی عملیاتی باشد، اما اولین گام پیش از تولید ایده‌ها، تعیین کارکرد[۴]، فرم[۵] و ساختار[۶] است که در این زمینه مهندسی معکوس قطعات موجود می‌تواند مؤثر باشد [۹]. جهت ایجاد ایده‌های مناسب و عملیاتی راه‌کارهای گوناگونی مبتنی بر تعامل گروهی طراحان وجود دارد. از این جمله می‌توان به روش‌های طوفان ذهنی[۷] و ۵-۳-۶ اشاره کرد [۱۳].



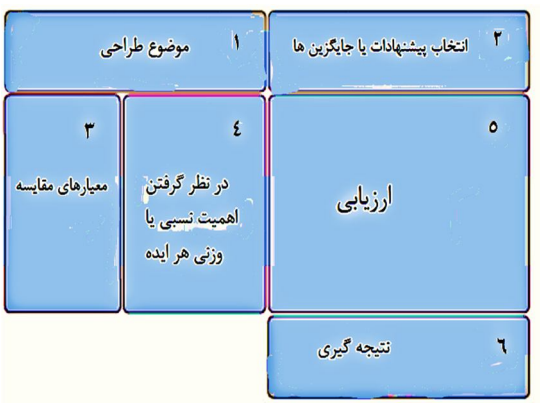
شکل ٤. فلوچارت تعریف محصول در طراحی مکانیکی



شکل ۵. جدول خانهٔ کیفیت

۱-۴-۲. ارزیابی ایده‌ها

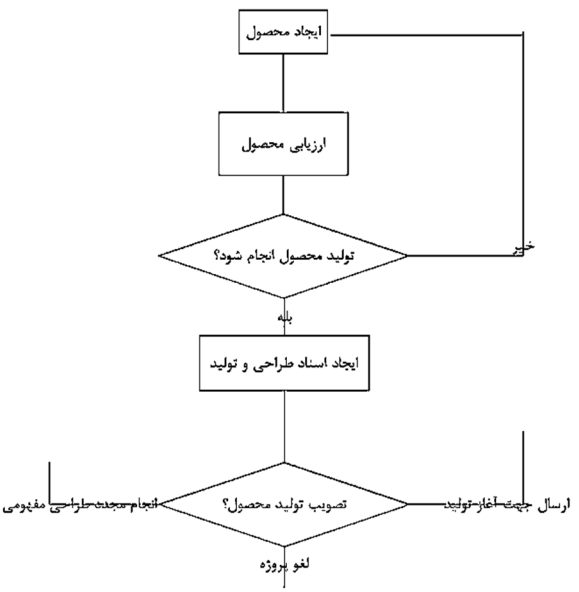
پس از مشخص‌شدن ایده‌ها، باید به انتخاب یک ایده پرداخت. در واقع هدف این است که با کمترین منابع، به ایده‌ای با بیشترین پتانسیل، جهت تولید یک محصول باکیفیت دست یافت. در این پژوهش جهت تصمیم‌گیری از روش ماتریس تصمیم‌گیری پاگ[۸] بهره گرفته شد. ماتریس تصمیم‌گیری، یک روش علمی و در عین‌حال ساده برای مقایسه و تصمیم‌گیری برای انتخاب فرایندهاست. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ماتریس تصمیم‌گیری جدولی است که براساس نیازها و ضرایب اهمیت آنها، با در نظر گرفتن یک محصول به‌عنوان مبنا، با مقایسهٔ دیگر گزینه‌ها با محصول مبنا، محصول مناسب انتخاب می‌کند. این جدول از طریق گذر از شش گام به‌دست می‌آید که در مرجع [۱۴] شیوهٔ تصمیم‌گیری به روش ماتریس تصمیم‌گیری پاگ و همچنین مواردی از دلائل برتری این روش در مقایسه با دیگر روش‌های تصمیم‌گیری بیان شده است. با تکمیل فرایند ارزیابی و مشخص‌شدن محصول مورد انتظار باید وارد فرایند عملیاتی تولید و به‌عبارتی فرایند توسعهٔ محصول شد.



شکل ٦. نمایش شما تیک جدول ماتریس تصمیم گیری

۵-۲. توسعهٔ محصول

این مرحله را می‌توان فرایند تحول نامید؛ زیرا در این مرحله تجسم کاملی از محصول و طراحی جزئیات آن ایجاد می‌گردد. این مرحله نیز مجموعه‌ای از فرایندها را مطابق با فلوچارت شکل ۷ شامل می‌گردد. جهت ایجاد محصولی مناسب، همواره باید راهبردی مناسب جهت طراحی اختیار نمود. یکی از این راهبردها، روش مثلث طراحی نام دارد. در این روش باید به سه موضوع شامل فرم، مواد و ساخت اهمیت داد که در نهایت این سه موضوع از طریق کارکرد سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برای تعیین پاسخ به موضوع فرم محصول باید مواردی چون شکل و ساختار، اتصالات، قیود و اجزاء به‌درستی معین شوند. سپس مواد سازنده و در نهایت ساخت و مونتاژ قطعات مورد بررسی قرار گیرند. زمانی می‌توان از صحت هر بخش از این روش اطمینان یافت که کارکرد سیستم مورد انتظار را ایجاد کرده باشد. البته در سال‌های اخیر با ورود نرم‌افزارهای پیشرفته شبیه‌سازی می‌توان پیش از ساخت قطعات و سیستم‌ها آنها را شبیه‌سازی کرده و از کارکرد آنها اطمینان حاصل نمود که همین موضوع تأثیر به‌سزایی در کاهش زمان و هزینهٔ طراحی جزئیات محصول داشته است. با تکمیل فرایند طراحی جزئیات، باید تصمیم گرفت که آیا این محصول به لحاظ فنی، اقتصادی و جز این‌ها امکان تولید دارد؟ برای تصمیم‌گیری دربارهٔ این موضوع جداول و اسناد طراحی باید آماده شده و مورد بررسی قرار گیرند. در این مرحله اسناد فنی، مالی و حتی زیست محیطی نیز باید ایجاد گردد.

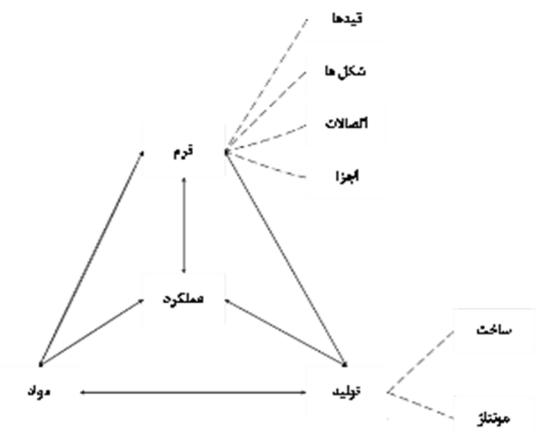


شکل ۷. فلوچارت فاز طراحی جزئیات محصول

در مراجع [۱۵-۱۶] اهمیت و همچنین نکات و موارد اعمال شده در اسناد طراحی ارائه شده است. چنانچه تمامی اسناد مذکور مورد تأیید قرار گیرند، فاز تولید آغاز می‌شود. پیش از آغاز فرایند تولید باید نقشه‌های طراحی، مدارک و شیوه‌نامه‌های ساخت و مونتاژ را تکمیل و ایجاد نمود. سپس با انجام آموزش کادر تولید به جهت ایجاد درک مشترک درباره خواست مدیران و طراحان از محصول نهایی می‌توان وارد فاز تولید محصول شد.

۶-۲. حمایت از محصول

پس از تولید محصول و ورود آن به بازار، وظیفهٔ طراحان هنوز به پایان نرسیده است. تیم طراحی به‌محض ورود محصولات به بازار باید ارزیابی از رضایت مشتریان و مصرف‌کنندگان انجام دهند و مطابقت آن را با آنچه در مرحلهٔ سوم طراحی بررسی نمایند. در صورت نیاز باید مدارک طراحی را در بخش‌های مختلف توسعه داد و اشکالات را رفع نمایند. همچنین باید به کارکنان خط تولید و مونتاژ، بازاریابان، نمایندگی‌ها و تعمیرکاران آموزش مداوم دهند و نظرات آنها را در رابطه با محصول جویا شوند. از طرف دیگر، این تیم باید به لحاظ حقوقی نیز محصول را با انجام ثبت اختراع و تکمیل مدارک و اسناد آن را به نام شرکت و تیم خود ثبت نمایند. در پایان نیز تیم طراحی باید زمان بازنشستگی محصول را تخمین زده و اعلام نمایند [۱۷]. همچنین باید جایگزینی مناسب برای محصول قبل را معرفی کنند. با تکمیل مرحلهٔ ششم روش مدیریت آبشاری به پایان می‌رسد. در ادامه جهت بررسی کامل موضوع مطالعهٔ موردی صورت گرفته است.



شکل ۸ اجزای مختلف مثلث طراحی

۳. مطالعهٔ موردی

در این بخش، پس از توصیف اهمیت و کاربرد پروتز آداپتور چرخان، گزارشی فنی، از نتایج به‌دست‌آمده از طی مراحل ذکرشده در بخش‌های قبلی بیان‌شده است.

۱-۳. کشف محصول

اولین فاز در آغاز هر پروژه کشف محصول و شناسایی انگیزهٔ طراحی محصول می‌باشد. در همین زمینه ابتدا کاربرد پروتزها و بررسی پروتز آداپتور چرخان صورت می‌پذیرد.

۱-۱-۳. پروتز

پروتز را می‌توان یک ابزار مصنوعی نامید که جایگزین عضوی از بدن انسان می‌شود که بر اثر پدیده‌هایی چون بیماری‌ها، تصادفات و جز این‌ها قطع شده و از دست رفته باشد و آن عضو بتواند تمام یا بخشی از توانایی خود را به‌دست بیاورد [۱۸]. چون بیش از ۸۵ درصد از قطع عضوها در جهان در سطوح مختلف اندام تحتانی رخ می‌دهد، بیشترین تنوع پروتزها هم در پروتزهای اندام تحتانی است. در کل، یک پروتز اندام تحتانی از چند جزء تشکیل شده است که شاخص‌ترین اجزای آن شامل سوکت (محل اتصال بخش زنده و سالم با پروتزها)، مفصل ران، مفصل زانو، سیستم تعلیق و وسائل جانبی مانند آداپتور چرخان می‌باشد [۱۹]. با پیشرفت علوم مهندسی، در پروتزهای اندام تحتانی هم پیشرفت‌های قابل توجهی دیده می‌شود. به‌طوری‌که امروزه حتی افراد معلول قادر به انجام ورزش‌های سنگین و حضور در میدان‌ها مهم ورزشی همچون مسابقات پارالمپیک و المپیک هستند. از مهم‌ترین پیشرفت‌ها می‌توان به طراحی و ساخت زانوهای هیدرولیک، نیوماتیک و هوشمند نیز اشاره کرد. با تکمیل‌شدن چرخهٔ تولید پروتزهای جایگزین اندام تحتانی، جهت افزایش کارایی و شباهت رفتار حرکتی پروتزها به اعضای سالم بدن انسان وسائل جانبی به پروتزهای مختلف الحاق گردید که به آداپتور نام دارند. یکی از مهم‌ترین این آداپتورها، پروتز آداپتور چرخان است.

۲-۱-۳. آداپتور چرخان

آداپتور چرخان، که به نام‌هایی چون ترنس فمورال آداپتور[۹]، روتیشنال آداپتور[۱۰] و چرخانندهٔ وضعیت مشهور است، طبق بیان مراجع، پروتز دوار قفل‌داری که عموماً درست بالای زانوی پروتزی قرار گرفته و به فرد بیمار امکان می‌دهد تا اندام تحتانی را بچرخاند. این قابلیت سبب تسهیل در نشستن، لباس پوشیدن، داخل شدن به وسائل نقلیه، نشستن چهارزانو و انجام فعالیت‌های مشابه روزمره می‌گردد [۱۹]. به‌عنوان دستورالعملی کلی، استفاده از یک چرخانندهٔ وضعیت، هر زمان که فضای کافی بین زانو و سوکت برای این وسیله وجود دارد، باید مد نظر قرار داد.

۳-۱-۳. شرکت‌های تولیدکنندهٔ پروتز

شاید بتوان گفت که شرکت اتوبوک قدیمی‌ترین شرکت در عرصهٔ تولیدات پروتز است. این شرکت از سال ۱۹۱۹ م، برای تولید لوازم

ارتوپدی آغاز به کار کرد. در این سال، پروتزسازی به نام اتوبوک به‌تنهایی برای تأمین وسائل مورد نیاز جنگجویان قطع عضو، شرکت خود را در برلین تأسیس کرد. این شرکت نیز اولین تولیدکنندهٔ پروتزهای هوشمند میکروپروسسوردار می‌باشد. قطعهٔ آداپتور چرخان (شکل ۹) در این شرکت توسط ادوارد هرواث[۱۱] در وین اتریش اختراع شد و در سال ۱۹۸۹ م توسط این شرکت بانام مفصل دوار ویژهٔ پروتز زانو در دفتر ثبت اختراعات ایالات متحدهٔ امریکا ثبت شده است [۲۰]. ده سال بعد از اتوبوک، اشتریفندر[۱۲] برای آگاهی‌بخشی به جانبازان و خانواده‌های آنها با برگزاری کارگاه‌ها و کلاس‌ها در فرانکفورت آلمان آغاز به کار کرد و با مقبولیتی که به‌دست آورده بود بالاخره نخستین محصول خود را در سال ۱۹۵۳ م وارد بازار کرد. این شرکت در سال ۲۰۱۲ م، محصول آداپتور چرخان خود (شکل ۱۰) را در دفتر ثبت اختراعات ایالات متحدهٔ امریکا، توسط ردلف اسگیان[۱۳] و همکاران با نام ابزار ابزار قفل‌شوندهٔ ویژهٔ پروتزها به ثبت رسانده است [۲۱]. در سال ۱۹۱۴ م، خاندان فیلائور با تأسیس داروخانهٔ ستارهٔ سرخ، وارد عرصهٔ پزشکی شد. در سال ۱۹۳۴ م، کارلتون، پسر بزرگ این خانواده، با ایجاد ابتکار در صنعت ارتوپدی شغل پدر را در کارولینای شمالی توسعه داد. امروزه این شرکت با داشتن شعبه‌های متنوع طراحی، توسعه، تحقیقات، آموزش و بیمارستان‌های توان‌بخشی به یکی از مهم‌ترین شرکت‌های بزرگ در این زمینه مبدل شده است. این شرکت در سال ۲۰۱۲ م، محصول خود را وارد بازار کرد [۲۲] (شکل ۱۱).

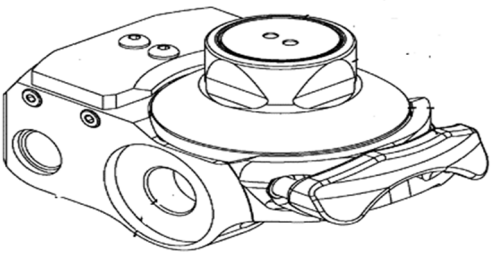
در سال ۱۹۱۳ م، نیز سه صنعتگر در منطقهٔ بورگوندی کارگاهی برای تولید پروتزهای اولیهٔ چوبی احداث کردند که توسط کلارک در سال ۱۹۱۶ برای پاسخگویی به نیازهای جنگجویان بازماندهٔ قطع عضو توسعه یافت. درنهایت در سال ۱۹۴۳ توسط بزرگ خاندان پروتئور[۱۴] به شرکت پروتئور گسترش یافت و در اروپا به نامی مشهور در زمینهٔ پروتزها مبدل شد. این شرکت محصول آداپتور چرخان خود (شکل ۱۲) را در دههٔ ۱۹۹۰ به بازار عرضه کرده است [۲۳]. شرکت اوسر نیز در سال ۱۹۷۱ م توسط اوسر[۱۵] کریستین سون که یک مهندس بود در ایسلند تأسیس شد. این کارخانه امروزه یکی از کارخانه‌های پیشرو در فناوری ارتوپدی است. قطعهٔ آداپتور چرخان در این شرکت (شکل ۱۳) توسط سیگاردو اولافسون اختراع شده و در سال ۲۰۱۴ توسط شرکت اوسر بانام آداپتور چرخان زانو در دفتر ثبت اختراع ایالات متحدهٔ امریکا ثبت شده است [۲۴]. با مشخص شدن محصول مورد نظر این پژوهش و با انگیزهٔ شناخت و کسب فناوری به‌کار رفته در این مجموعهٔ پروتزی باید با برنامه‌ریزی صحیح وارد فازهای بعدی پژوهش شد.

شکل ۹. آداپتور چرخان شرکت اتوبوک [۲۰]

شکل ۱۰. آداپتور چرخان شرکت اشتریفندر [۲۱]

شکل ۱۱. آداپتور چرخان شرکت فیلائور [۲۲]

شکل ۱۲. آداپتور چرخان شرکت پروتئور [۲۳]



شکل ۱۳. آداپتور چرخان شرکت اوسر [۲۴]

۲-۳. برنامه‌ریزی پروژه

با توجه به آنچه در مراجع ذکر شده است، باید به‌ترتیب ۱۰ الی ۱۵ درصد از زمان کل پروژه را به مرحلهٔ تعریف محصول و تحقیقات میدانی پرداخت. در فاز بعدی حدود ۱۵ الی ۳۵ درصد از زمان را نیز به طراحی مفهومی تخصیص داد [۹]. پس از آن مرحلهٔ ارزیابی ساخت و قیمت محصول نیز بالغ بر ۶۰ درصد از پروژه را به‌خود اختصاص می‌دهد. در مرحلهٔ آخر نیز حمایت از محصول باید ۵ الی ۱۰ درصد از زمان را اختصاص داد. از اینرو جهت مشخص‌شدن روند زمانی پروژه همان‌طور که در جدول ۱ پیوست مشاهده می‌شود از نمودار گانت استفاده شده است.

۳-۳. تعریف محصول

همان‌طور که گفته شد، کارآمدترین روش جهت تعریف محصول روش جدول خانهٔ کیفیت است. جهت دستیابی به نظرات مشتریان و تبدیل نیازهای آنها به پارامترهای فنی، اطلاعات تحقیق صورت گرفته در هشت طبقهٔ جدول خانهٔ کیفیت قرار گرفت و تحلیل اطلاعات مبتنی بر خواص مکانیکی و فنی تولید انجام شد. همان‌طور که در جدول ۵ پیوست مشخص است، در نهایت تعداد قطعات، استحکام، عمر و قیمت مجموعهٔ پروتزی به‌ترتیب چهار اولویت در طراحی هستند. علاوه بر این، براساس بررسی رقبا، محصول شرکت اتوبوک و محصول شرکت فیلائور بیشترین انطباق را با نیازهای عام مشتریان داشت. البته این موضوع بدین معنا نیست که محصول این شرکت‌ها برای نیازها و اولویت‌های فنی کار موردنظر نیز قابل تأئید است؛ زیرا این تحلیل براساس اطلاعات خام مشتریان و بدون در نظر گرفتن ضرایب اهمیت هرکدام از نیازها صورت گرفته است. پس برای یافتن پاسخ این سئول که کدام محصول مناسب آغاز عملیات مهندسی معکوس است؟ باید اطلاعات را طبقه‌بندی نمود و با اعمال ضرایب اهمیت به هر کدام از نیازها، آنها را در تصمیم‌گیری دخیل نمود.

۴-۳. طراحی مفهومی

برای پاسخ به موضوع انتخاب بهترین محصول برای آغاز مهندسی معکوس، از تکنیک ماتریس تصمیم‌گیری که جدول کامل آن در جدول ۴ پیوست آمده است، استفاده شد. در ابتدا معیارهای ارزیابی و ضرایب اهمیت آنها با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از جدول خانهٔ کیفیت انتخاب گردید. سپس با تعیین محصول شرکت اوسر به‌عنوان مبنا بقیهٔ محصولات با محصول این شرکت مقایسه شد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از این ماتریس محصول شرکت اتوبوک، به‌عنوان مناسب‌ترین مجموعهٔ پروتزی آداپتور چرخان مبتنی بر نیازها و اولویت‌های فنی و اقتصادی جهت آغاز فرایند طراحی و مهندسی معکوس انتخاب شد.

۵-۳. توسعهٔ محصول

در این مرحله باید طراحی جزئیات انجام شود. از اینرو، جهت آغاز عملیات مهندسی معکوس مجموعه قطعات با حفظ اتصالات و ارتباط اجزاء جدا می‌گردد. همان‌طور که بیان شد، در آغاز عملیات مهندسی معکوس باید با بهره‌گیری از یک راهبرد خاص و از پیش تعیین‌شده، تک‌تک قطعات از هم جدا شده، به‌طوری‌که حتی‌الامکان تغییری در مکانیزم‌های به‌کار رفته در مجموعه اتفاق نیفتد. از اینرو قطعات این مجموعه گام به گام و به‌ترتیب به شیوه‌ای که در شکل‌های ۱۴ تا ۱۸ دیده می‌شود تفکیک شدند. سپس، جهت انجام فرایند نقشه‌برداری از روش‌های اسکن ابر نقاط و نقشه‌برداری سنتی استفاده شد که در ادامه به‌صورت مختصر معرفی خواهد شد.

۱-۵-۳. اسکن سه‌بعدی

در سال‌های اخیر با ورود تجهیزات کامپیوتری در صنعت تحول مهمی در حوزه‌های مختلف طراحی و تولید ایجاد شده است. یکی از مهم‌ترین این تحولات ورود فناوری‌های پرینتر و اسکنرهای

سه‌بعدی است. اسکنرهای سه‌بعدی دستگاه‌هایی هستند که با فناوری‌های مختلف نوری، لیزری و جز این‌ها اقدام به ایجاد مدل کامپیوتری از قطعه‌ای موجود می‌کند. به مدل کامپیوتری که از این تجهیزات به‌دست می‌آید، ابر نقاط گفته می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این مدل امکان اعمال تغییرات در مدل بوده که می‌توان آن را با واردکردن مدل ابر نقاط به نرم‌افزارهای معمول طراحی انجام داد. راهبرد اسکن‌کردن قطعات شامل، انتخاب نوع اسکنر متناسب با دقت مورد نیاز، آماده‌سازی قطعه، انجام عکسبرداری و داده‌برداری از قطعه شامل تمامی ویژگی‌های هندسی همچون، پله‌ها، سوراخ‌ها، پخ‌ها و جز این‌ها به‌طورکلی به لحاظ فناوری به‌کار رفته، می‌توان اسکنرها را به دو دستهٔ اسکنرهای تماسی و غیرتماسی طبقه‌بندی نمود. در مرجع [۲۵] شیوه های مختلف اسکن سه‌بعدی، ویژگی‌ها، کاربردها، مزایا و کاستی‌های انواع مختلف اسکنر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۴. جدا کردن درپوش یاتاقان از قطعات دوار فلزی

شکل ۱۵. نمایش جداسازی قطعات دوار فلزی

شکل ۱۶. جداسازی قطعات یاتاقانی

شکل ۱۷. جداسازی قطعات موجود در محفظهٔ پلاستیکی

شکل ۱۸. نمایش جداسازی قطعات داخلی محفظهٔ پلاستیکی

۲-۵-۳. طراحی جزئیات

پس از تکمیل فرایند نقشه‌برداری باید عملیات مونتاژ مدل‌های ایجادشده در نرم‌افزار و شبیه‌سازی از مکانیزم‌ها انجام شود. در این بخش به این پرسش پاسخ داده می‌شود که در نقشهٔ مونتاژشده، هر قطعه چه وظیفه‌ای دار و چرا در آن محل قرارگرفته است؟ در فرایند مهندسی معکوس محصول حاضر ۵۰ نوع قطعهٔ متفاوت و جمعاً ۹۳ قطعه به وزن ۱۴۳ گرم وجود دارد، که توصیف آنها در این مقاله ممکن نیست. برای آشنایی با مکانیزم‌های حاضر در این

مجموعه به مراجع [۲۶-۲۷] مراجعه شود. به‌طور خلاصه نیز اطلاعات طراحی ۱۰ قطعهٔ اساسی در این مجموعه پروتزی در جدول ۲ پیوست قابل مشاهده است. با تکمیل این بخش، مرحلهٔ بررسی فرم در مثلث طراحی تکمیل شده است. در ضمن نقشه‌های مونتاژشدهٔ محصول کامل نیز در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ پیوست قابل مشاهده است.

۳-۵-۳. شناسایی و تعیین مواد

پس از تکمیل فاز مشخصات شکل و فرم قطعات، حال نوبت به شناسایی مواد آلیاژ و پلیمری به‌کار رفته در قطعات این مجموعه پروتز اندام تحتانی می‌باشد. برای این‌منظور، با انجام آزمایش‌هایی از قبیل اسپکترومتری نشری، سختی‌سنجی، میکروسختی‌سنجی، کوانترومتری و آنالیز جنس، همان‌طور که در جدول ۳ پیوست دیده می‌شود، مبتنی بر استاندارد ای. اس. تی. ام. درصد وزنی عناصر مختلف، تعیین و آلیاژها، سختی‌ها و گریدهای مشابه مواد پلیمری منطبق بر آنها معرفی شد [۲۸]. می‌توان مبتنی بر همین اطلاعات شناسایی مواد اقدام به تهیهٔ این مواد یا مشابه آنها کرد. مطابق این اطلاعات جنس قطعات دوار داخلی و خارجی این مجموعه از آلیاژ فولاد و قطعات پلاستیکی اصلی از پلی‌آمید است. با تکمیل بخش تعیین مواد می‌توان مبتنی بر موضوعات فرم، شکل، مواد و حجم تولید با استفاده از جداول پریما اقدام به انتخاب روش تولید نمود.

۴-۵-۳. پریما و تعیین روش تولید

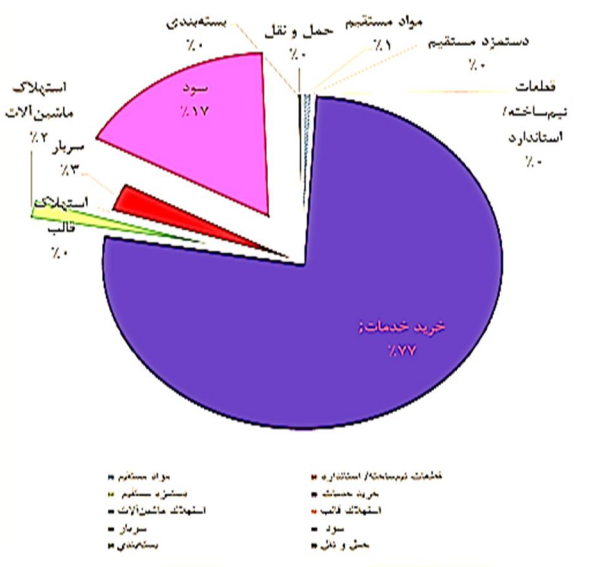
پریما[۱۶] یا ترجمهٔ اصطلاحی آن نقشهٔ اطلاعاتی فرایندهای تولید در واقع تلاشی جهت ایجاد دانش و داده‌های مورد نیاز برای ایجاد تصمیمی صحیح دربارهٔ انتخاب فرایندها با استفاده از تهیه نمودن، راهبردهای مختلف انتخاب و کاربرد فرایندهاست. در واقع با استفاده از پریما، بعد از مراجعه به جدول انتخاب روش تولید می‌توان با مراجعه به پریمای هر فرایند از تجربیات گذشته سود برده و جزئیات کاملی از روش تولید به‌دست آورد. در مرجع [۲۹] به‌طور مفصل به معرفی و بیان کاربردهای پریما پرداخته شده است. مبتنی بر این راهبرد، روش تولید به شیوهٔ تراشکاری برای قطعات فلزی و روش تزریق پلاستیک جهت تولید قطعات پلیمری مناسب‌ترین فرایند انتخاب شد [۲۹]. با تکمیل این بخش می‌توان وارد مرحلهٔ تصمیم‌گیری و ایجاد مدارک فنی، اقتصادی و مالی شد.

۵-۵-۳. طراحی مالی محصول

یکی از مهم‌ترین و در عین‌حال مشکل‌ترین بخش‌ها در قسمت طراحی، تخمین قیمت تمام‌شده محصول است. باید در طراحی، پیش از آغاز فرایند تولید، تخمینی از هزینه‌ها به‌دست آید تا با مقایسهٔ آن با محصولات مشابه و با توجه به بودجهٔ پروژه بتوان نقشهٔ راه تولید را ایجاد کرد. به‌طور کلی تولید یک محصول، جوانب مختلفی دارد که هر کدام موجب تغییر در هزینهٔ نهایی محصول می‌گردد. همچنین می‌توان هزینه‌ها را به دو گروه کلی هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. هر هزینه‌ای که به اجزای محصول، تولید و مونتاژ محصول مربوط می‌شود را هزینه‌های مستقیم و بقیه هزینه‌ها را هزینهٔ غیرمستقیم می‌نامند (شکل ۱۹). روش ها و نکات مختلفی در طراحی مالی هزینه وجود دارد که در مرجع [۲۷] به آن پرداخته شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش که با هدف معرفی روش‌های نوین در مهندسی معکوس ارائه شده بود، محصول آداپتور چرخان به‌عنوان یک مطالعهٔ موردی برای بیان اهمیت و اثرگذاری انتخاب شیوهٔ صحیح طراحی مهندسی مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به این تجربه می‌توان بیان داشت که بهره‌گیری از این فرایندها اگرچه کم‌هزینه‌اند، اما با ایجاد شناختی دقیقی برای مهندسان، صنعتگران و سرمایه‌گذاران از انگیزه‌های خود، بازار و محصول، موفقیت آن محصول را تضمین می‌کند و ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۹. میزان تأثیرگذاری پارامترهای گوناگون تولید بر قیمت

جدول ۱. جدول گانت برنامه‌ریزی پروژهٔ مهندسی معکوس پروتز آداپتور چرخان

فعالیت‌های پروژه	شروع و پایان فعالیت‌ها (ماه)											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
تعریف محصول	×	×	×									
طراحی مفهومی				×	×							
اسکن ابر نقاط و تهیه نقشه قطعات						×	×	×	×			
تعیین مواد								×	×	×		
تعیین روش تولید										×	×	
ارزیابی قیمت ساخت و تولید								×	×	×	×	×

جدول ۲. تشریح قطعات موجود در مجموعهٔ پروتزی آداپتور چرخان*

شماره	نام قطعه	تعداد	شرح کاربرد	وزن قطعات (گرم)
۱	قطعه دوار بیرونی	۱	چرخش روی قطعهٔ دوار درونی	۶۸/۵
۲	قطعه دوار درونی	۱	چرخش روی قطعهٔ دوار بیرونی و ایجاد زاویه برای پروتز پایینی	۴۱/۳
۳	بوش	۱	ایجاد هم‌مرکزی قطعه ۱ و ۲ با دیگر قطعات دوار	۰/۲
۴	یاتاقان غلتکی مخروطی	۲۷	ایجاد شرایط ضداصطکاکی و تحمل نیروها	۰/۶
۵	یاتاقان ساچمه‌ای شیب‌دار	۱۵	ایجاد شرایط ضداصطکاکی و تحمل نیروها	۰/۳
۶	درپوش	۱	جلوگیری از خروج روغن، غلتک‌ها و تحمل نیروها	۴
۷	پیچ آلن	۱	محکم‌کردن درپوش و قطعات دوار در یک محور	۰/۸
۸	محفظه‌ی پلاستیکی	۱	محل قرارگیری ابزار قفل	۱۴
۹	ابزار قفل	۱	مکانیزمی است جهت قفل و آزادکردن قطعات دوار	۲/۶
۱۰	المان قفل	۱	شبیه کلید عمل کرده و با فرورفتن در حفره‌های قطعات دوار از حرکت جلوگیری می‌کند	۰/۷

* شمارهٔ قطعات موجود در این جدول با توجه به شماره‌گذاری صورت‌گرفته در شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ می‌باشد

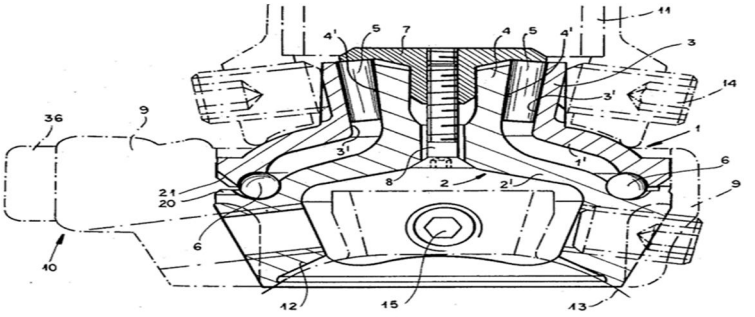
جدول ۳. ترکیب شیمیایی قطعات دوار داخلی و خارجی برحسب درصد وزنی عناصر و تعیین آلیاژ معادل

C 0.29	Si 0.26	Mn 0.46	P 0.016	S 0.018	Cr 0.63	Mo 0.02	Ni 3.6	Al 0.041	Co 0.04	Cu 0.04
Nb <0.005	Ti <0.002	V 0.01	W <0.02	Sn <0.005	B *	As <0.002	Fe Base	آلیاژ معادل DIN 31NiCr14		

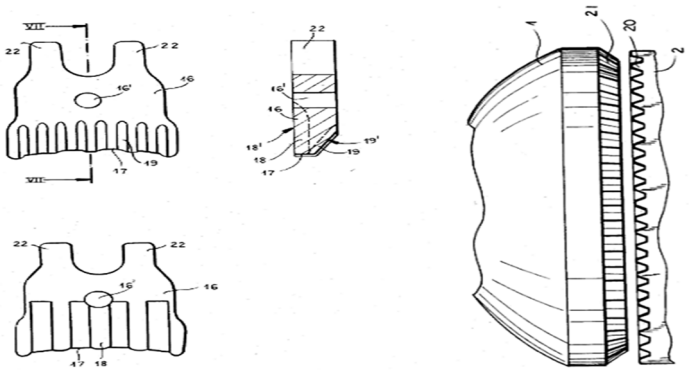
جدول ۴. نمایش کامل ماتریس تصمیم‌گیری جهت انتخاب بهترین محصول آداپتور چرخان برای مهندسی معکوس

شرکت اوسر	شرکت پروتئور	شرکت فیلائور	شرکت اتوبوک	شرکت اشتریفندر		موضوع انتخاب بهترین محصول
مبنا	+۱	+۱	+۱	۰	۲۰	وزن محصول
	+۱	+۱	+۱	۰	۲۱	اندازهٔ قطعه
	−۱	+۱	+۱	+۱	۲۷	بیشترین وزن قابل تحمل
	+۱	+۱	+۱	+۱	۲۴	تعداد قطعات
	+۱	+۱	+۱	+۱	۱۴	آسانی تعمیرات
	۰	−۱	+۱	−۱	۲۷	تأیید وزارت بهداشت
	+۱	۰	+۱	۰	۹	دسترسی آسان در بازار
	−۱	−۱	۰	−۱	۲۷	عمر محصول
	+۱	+۱	+۱	۰	۱۶	ظاهر مناسب محصول
	+۱	−۱	۰	+۱	۱۴	آسانی در استفاده

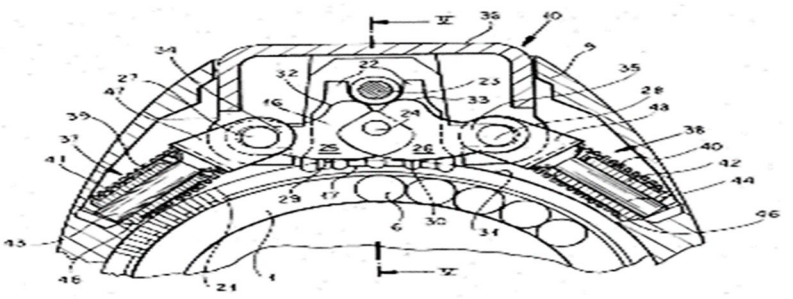
شرکت اوسر	شرکت پروتئور	شرکت فیلائور	شرکت اتوبوک	شرکت اشتریفندر		موضوع انتخاب بهترین محصول
	۰	+۱	۰	+۱	۲۳	مقاومت در قبال برخوردها
	+۱	+۱	+۱	۰	۱۴	بی‌خطر بودن در زمان خرابی
	−۱	+۱	+۱	−۱	۹	سروصدا
	۰	۰	۰	۰	۱۳	قیمت
	+۱	+۱	+۱	۰	۱۴	فاصلهٔ بین سرویس‌ها
	+۱	+۱	+۱	+۱	۲۰	گسترهٔ استفاده
	+۱	+۱	+۱	−۱	۶	رنگ‌های دستگاه
	۰	۰	+۱	۰	۱۷	گارانتی
	+۱	+۱	−۱	+۱	۱۴	وجود قطعات یدکی



شکل ۲۰. نقشهٔ مونتاژشده و کامل مجموعهٔ پروتز آداپتور چرخان[۲۷]

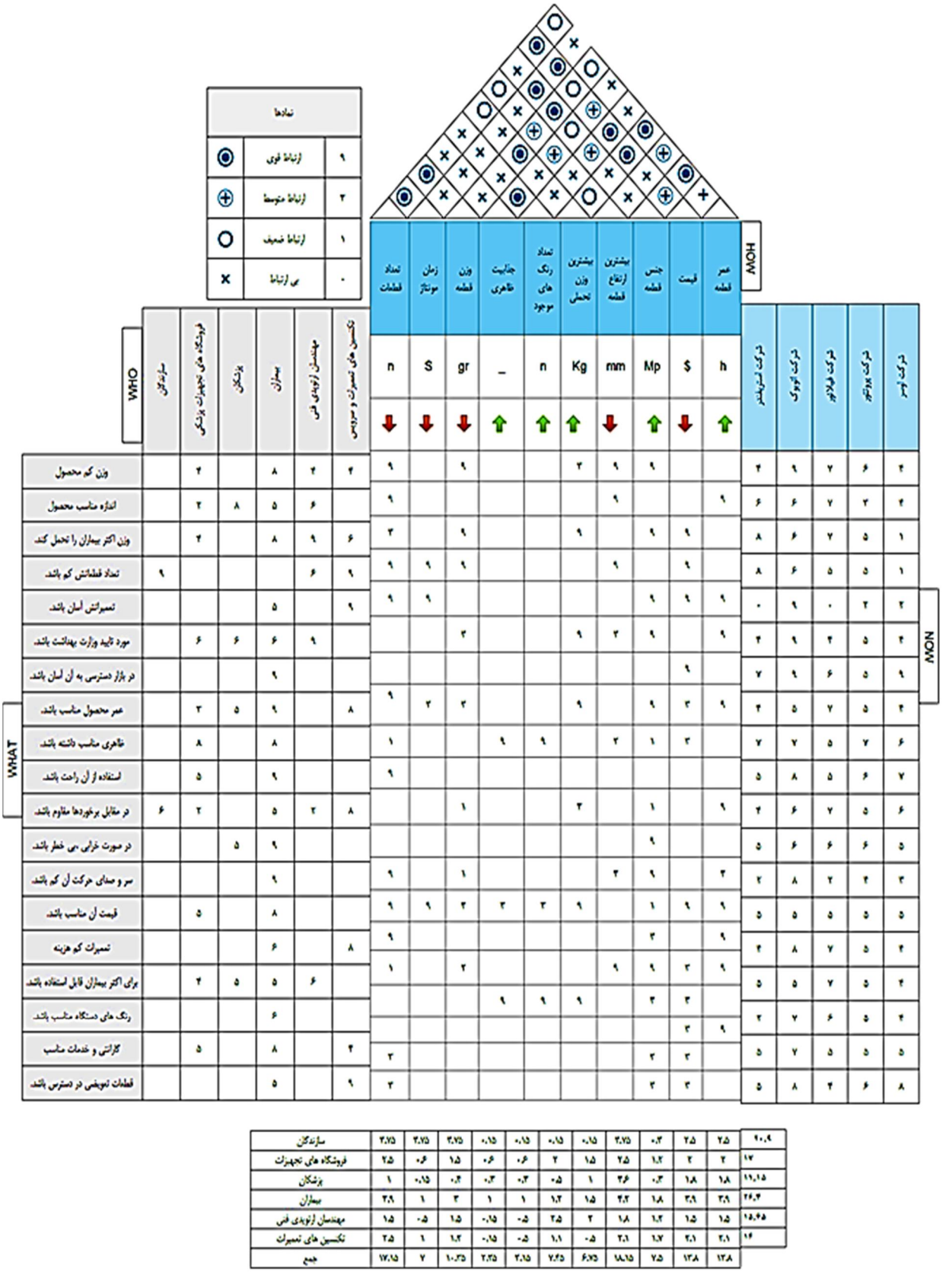


شکل ۲۱. نقشهٔ ابزار قفل [۲۷]



شکل ۲۲. نمایش مکانیزم چرخش و قفل [۲۷]

جدول ۵. خانهٔ کیفیت کامل جهت محصول آداپتور چرخان



سازندگان	۲.۷۵	۳.۷۵	۳.۷۵	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۵	۳.۷۵	۰.۳	۲.۵	۲.۵	۹۰.۹
فروشگاه های تجهیزات	۲.۵	۰.۶	۱.۵	۰.۶	۰.۶	۲	۱.۵	۲.۵	۱.۲	۲	۲	۱۷
پزشکان	۱	۰.۱۵	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۵	۱	۳.۶	۰.۳	۱.۸	۱.۸	۱۱.۱۵
بیماران	۳.۹	۱	۳	۱	۱	۱.۲	۱.۵	۴.۲	۱.۸	۳.۹	۳.۹	۲۶.۴
مهندسان ژنوپدی فنی	۱.۵	۰.۵	۱.۵	۰.۱۵	۰.۵	۲.۵	۲	۱.۸	۱.۲	۱.۵	۱.۵	۱۵.۶۵
تکنسین های تعمیرات	۲.۵	۱	۱.۲	۰.۱۵	۰.۵	۱.۱	۰.۵	۲.۱	۱.۲	۲.۱	۲.۱	۱۴
جمع	۱۷.۱۵	۷	۱۰.۳۵	۲.۲۵	۲.۱۵	۷.۴۵	۶.۷۵	۱۸.۱۵	۷.۵	۱۳.۸	۱۳.۸	

۵. مآخذ

[1] V. Majstorovic, M. Trajanovic, N. Vitkovic, M. Stojkovic, Reverse Engineering of Human Bones by Using Method of Anatomical Features, *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1, pp. 167–170,2013.

[2] T. Varady, R. Martin, J. Cox, Reverse Engineering of Geometric Models, *an Introduction Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.

[3] N. Anwer, L. Mathieu, from reverse engineering to shape engineering in mechanical design, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 165-168, 2016.

[4] F. Laroche, A. Bernard, B. Hervy, DHRM: A New Model for PLM Dedicated to Product Design Heritage, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 161–164, 2015.

[5] V. Raja, J. Fernandes, *reverse engineering:an industrial perspective*, Berlin: Springer: 2008.

[6] K. Otto, K. Wood, Product Evolution: A reverse Engineering and Redesign Methodology, *Research in Product Development*, Vol. 10, No. 4, pp. 226–243, 1998.

[7] G. Erdos, T. Nakano, J. Vancza, Adapting CAD Models of Complex Engi-neering Objects to Measured Point Cloud Data, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 63, No, 1, pp. 157–160, 2014.

[8] R. Stark, H. Grosser, P. Muller, Product Analysis Automation for Digital MRO Based on Intelligent 3D Data Acquisition, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 2, pp. 123–126, 2013.

[9] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*, Fifth Edition, New York: McGrawHill, 2015.

[10] J. M. Nichol, *Project management for engineering, business and technology*, Taylor & Francis, 2017.

[11] J. R. Hauser, D. Clausing, *The House of Quality*, Harvard Business Review Vol. 21, 1998.

[12] A. R. Krueger, *Focus Groups: A Practical Guide for Applied Research*, Sage Publishing, New York: Newbury Park, Calif. 1998.

[13] M. H. Jillian, L. D. Douglas, L. R. Thomas, F. N. Jay, An Examination of the Impact of Stimuli Type and GSS Structure on Creativity: Brainstorming versus Non-brains torming Techniques in a GSS Environment, *Journal of Management Information Systems*, Vol. 18, No. 4, spring, pp. 59-85, 2002.

[14] G. Swift, J.D. Booker, *Process Selection from design to manufacture, Butterworth-Heinemann an imprint of Elsevier*, Oxford, 2003.

[15] P. C. Sharma, *A Textbook of Production Enginerring*, Shikago. S. Chand, 2000.

[16] S. L. Soh, S. K. Ong, A. Y. C. Nee, Design for assembly and disassembly for remanufacturing, *Assembly Automation*, Vol. 36. pp. 12–24, 2016.

[17] M. S. Hundal, *Mechanical Life Cycle Handbook*, Belin: Marcell Dekker, 2001.

[18] R. Seymour, *Prosthetics and Orthotics: Lower Limb and Spinal,* Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

[19] D. G. Smith, G. J. Michael, H. J. Bowker, *atlas of amputations and limb deficiencies surgical prosthetic and rehabilitation principles*, 3rd Edition, New York: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2004.

[20] Otto Bock company, www.ottobock.com (accessed on July 2015).

[21] STREIFENEDER prosthesis, http//www.streifeneder-usa.com (accessed 5 July 2015).

[22] Fillauer company; www.fillauer.com (accessed 13 July 2015).

[23] Proteor Industries, www.proteor.com (accessed 10 July 2015).

[24] Ossur Prosthesis, www.ossur.asia (accessed 10 July 2015).

[25] M. Kedzierski, A. Fryskowska, Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling, *J. Measurement*. Vol. 74, pp. 221–232, 2015.

[26] E. Horvath. PATENT OF ROTARY JOINT ESPECIALLY FOR A KNEE PROSTHESIS. Patent. United States Patent. Vienna, Austria, 1989.

[۲۷] ع. معصومی. تحقیق، مدلسازی و ارزیابی ساخت مجموعهٔ پروتز آداپتور چرخان، پایان‌نامهٔ کارشناسی مهندسی مکانیک،

[29] A. Y, ChingNee, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Berlin: Springer. 2014.

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، همدان، ۱۳۹۴.

[28] L. R. Lehman, *Mechanical Engineering Handbook*, New York: Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

پی‌نوشت

1. House Of Quality
2. Akao
3. Mitsubishi's Kobe
4. function
5. form
6. Structure
7. Brainstorming
8. Paugh
9. Trans femoral adapter
10. Rotational adapter
11. Edvard Hervath
12. STREIFENEDER
13. Ossgian
14. Proteor
15. Ossur
16. PRocess INformation Maps