نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و سوم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۰

# ارائه و پیاده‌سازی الگوی تعیین نوع هواپیمای خلبانان مبتنی بر فاکتورهای آنتروپومتریک

**مصطفی مرادی[۱]، علیرضا رودباری[۲]، حمیدرضا ضرغامی*[۳]، هادی لطفئی[۴]**
۱- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا (سوانح)، مدرس دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
۲- دانشیار مهندسی هوافضا دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
۳- استادیار مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
۴- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، مدرس دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۰۶/۰۱)

## چکیده

یکی از حوزه‌های مهم در بخش‌های صنعتی دنیا، انسان‌محوری در طراحی‌ها و تخصیص‌ها می‌باشد. یکی از زمینه‌های اصلی علمی در این مقوله، علم ارگونومی، آنتروپومتری و بیومکانیک شغلی بوده که توجه زیادی را در این عرصه به خود معطوف کرده است. به‌رغم سابقه بیش از ۲ قرن از ظهور این علوم در دنیا و پژوهش‌های متعدد انجام‌شده در این زمینه، تاکنون حتی پژوهشی عمومی برای کاربست ظرفیت‌های این علوم حیاتی در عرصه هوانوردی ایران انجام‌نشده و یا در صورت انجام به ثبت نرسیده است. ازآنجاکه یکی از فاکتورهای مهم موفقیت و کاهش سوانح پروازی، در نظرگرفتن تناسب فیزیکی خلبانان با فضای داخلی کابین هواپیمای مربوطه است ولیکن از شاخص‌ها و فاکتورهای آنتروپومتریک در تعیین هواپیمای خلبانان در پژوهش‌های پیشین و محیط‌های عملیاتی، غفلت شده و اولویت تعیین هواپیما و محل خدمتی خلبانان، تنها بر اساس معدل علمی و حداکثر ترکیب معدل علمی و عملی صورت می‌پذیرد، لذا در این پژوهش تلاش شده است که با رویکردی ترکیبی از شاخص‌های یادشده و فاکتورهای آنتروپومتریک در یک مسئله واقعی، ضمن رفع شکاف پژوهشی یادشده به حل مسئله تعیین اولویت خلبانان برای یک هواپیمای منتخب پرداخته شود. برای رسیدن به این هدف، ابتدا تلاش می‌شود با مروری بر مبانی و پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه در دنیا، شاخص‌های مؤثر انتخاب‌شده و سپس با بررسی استانداردهای مرتبط با وضعیت حداقلی و حداکثری قابل پذیرش این شاخص‌ها برای تعدادی هواپیمای منتخب مشخص گردیده است. ازآنجاکه مسئله اولویت‌بندی خلبانان برای هواپیمای منتخب (و سایر هواپیماها) یک مسئله چندمعیاره می‌باشد و حل مسائل این حوزه با کمک علم تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM[1]) انجام می‌شود، با استفاده از تکنیک‌های منتخب این حوزه (آنتروپی شانون و الکترِه) به اولویت‌بندی خلبانان در یک نمونه واقعی پرداخته‌شده است. نتایج پژوهش نشان دهنده تفاوت بسیار زیاد اولویت بندی خلبانان با دو مبنای مداخله / عدم مداخله شاخص‌های آنتروپومتریک می‌باشد. همچنین به‌کارگیری مدل و اولویت‌بندی خلبانان در مسئله پژوهش حاضر، نشان‌دهنده ظرفیت بالای علم آنتروپومتریک و MADM در این حوزه است و بر این مبنا با انجام پژوهش حاضر زمینه کاربست مدل پژوهش در تعیین نوع هواپیمای خلبانان مرکز موردمطالعه و سایر مراکز آموزش هوانوردی فراهم‌شده است. در اولویت بندی در پایان پیشنهادهای پژوهشی و کاربردی برای استفاده در پژوهش‌های آتی ارائه‌شده است.

**واژه‌های کلیدی:** *شاخص‌های آنتروپومتریک، ارگونومی، تعیین اولویت خلبانان، بیومکانیک، سوانح هوایی.*

# A framework for determining pilots' priorities using antropomethric charactristics

**Mostafa Moradi, Ali Reza Rudbari, Hamid Reza Zarghami, Hadi Lotfeei**

## Abstract

Anthropocentricism in designs and specialties is one of the most significant domains in the industrial sectors all over the world. Some of the main scientific fields in this category are ergonomics, anthropometry, and biomechanics. Despite the history of more than two centuries of the emergence of these sciences in the world and the numerous studies conducted in these fields, no general study has been carried out or recorded until now to apply capacities of these vital sciences to the subject of Iranian aviation. The priority of determining the aircraft and the place of service of the pilots is based only on the scientific Grade Point Average (GPA) and at most the combination of scientific and practical GPA. Thus, in this study, for the first time, an attempt has been made to solve the problem of determining the priority of pilots for a selected aircraft by taking a combination of the aforementioned indicators and anthropometric factors in a real issue while eliminating the mentioned research gap. To achieve this goal,

* نویسنده پاسخگو: حمیدرضا ضرغامی، پست الکترونیک: Zarghami@iust.ac.ir

[1] Multi Atrribute Decision Making .

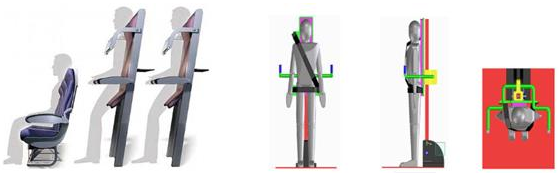
we first try to review the basics and background of research conducted in this area in the world, selected effective indicator, and then by examining the standards associated with the minimum and maximum acceptable status of these indicators have been recognized for a number of selected aircrafts. Since the issue of pilots' priorities for the selected aircraft (and other aircrafts) is a multi-criteria issue, solving problems in this area is done with the help of Multiple Attribute Decision Making (MADM) science using the selected techniques of this field (Electre & Shanon's entropy) in an attempt to deal with pilots' priorities in a real case. In the end, research and practical suggestions for use in aviation training centers are presented.

**Key words:** *Anthropometric indicators, Biomechanics, Determining pilots' priorities, Ergonomics, Flight incidents.*

## ۱- مقدمه

یکی از حوزه‌های مهم در بخش‌های صنعتی دنیا، انسان‌محوری در طراحی‌ها و تخصیص‌ها می‌باشد. یکی از زمینه‌های اصلی علمی در این مقوله، علم ارگونومی، آنتروپومتری و بیومکانیک شغلی بوده که توجه زیادی را در این عرصه به خود معطوف کرده است. با توجه به سابقه بیش از ۲ قرن از ظهور و بروز این علوم در دنیا و پژوهش‌های متعدد انجام‌شده در این زمینه، رشد شگفت‌انگیزی در بهره‌برداری از این علوم به چشم می‌خورد. بااین‌وجود تاکنون پژوهشی برای کاربست ظرفیت‌های این علوم حیاتی در حوزه خلبانی، طراحی هواپیما و کاهش سوانح پروازی در ایران انجام و یا به ثبت نرسیده است.

در حال حاضر، تنها عامل (معیار) تخصیص دانش‌آموختگان خلبانی معمولاً معیار معدل علمی و عملی پروازی و علاقه به نوع هواپیما و در پاره‌ای موارد، نیاز به استفاده از خلبانان روی نوع مشخصی از هواپیما (بسته به نیازمندی‌ها و شرایط زمانی) می‌باشد. و این سبب شده است که هیچ‌گونه توجهی به انطباق و تناسب شرایط اولیه فیزیک بدن (شاخص‌های آنتروپومتری) خلبان با هواپیمای مربوطه نشده است. این در حالی است که پژوهش‌های متعددی در دنیا در این خصوص انجام‌شده است، به‌عنوان نمونه، در پژوهش روملی و همکاران (۲۰۱۵) [۱] از ارگونومی برای طراحی صندلی عمودی کابین ایستاده در هواپیمای حمل‌ونقل تجاری استفاده‌شده است. شکل ۱ اهمیت ارگونومی در این نوع طراحی را نشان می‌دهد.



**شکل۱. ارگونومی در طراحی صندلی عمودی در کابین هواپیما [۱]**

از علم ارگونومی برای آسایش و راحتی و ارتقای بهره‌وری و انطباق کاربران با محیط‌های شغلی وابسته استفاده می‌شود.

روملی و امینیان (۲۰۱۸) [۲] و امینیان و روملی (۲۰۱۸) [۳] اشاره کردند که در این پژوهش‌ها، از ارگونومی استفاده‌شده است تا با طراحی دقیق صندلی کابین هواپیما محیط راحتی برای مسافران فراهم شود. هم‌چنین در سال ۲۰۱۱ از علم ارگونومی برای بهبود کنترل اجزای کابین هواپیما، از قبیل صندلی خلبان، شیشه‌های کابین، فرمان کنترلی خلبان استفاده‌شده است تا کنترل هواپیما بهبودیافته و خطرات ناشی از آن کمتر شود [۴].

فاکتورهای ذکرشده برای آسایش و راحتی خلبان، در هواپیماهای جنگنده بسیار حساس و مهم‌تر از سایر هواپیماها است. زیرا هواپیماهای جنگنده بنا به شرایط استفاده از آن‌ها، دقت و سرعت عمل بالایی را می‌طلبند و احتمال انواع آسیب عضلانی و جسمی در آن‌ها بیشتر است. هواپیماهای جنگنده دارای فناوری پیشرفته و سریع بوده و خلبانان بعد از یک دوره طولانی و سخت با اطلاعاتی دقیق آماده اجرای دستورات هستند. درنتیجه مناسب بودن محیط کاری در شرایط پرواز برای آنان بسیار مهم است. بنابراین در هواپیماهای جنگنده، استفاده از علم ارگونومی برای طراحی کنترلر هواپیما، شیشه‌ها و در کل صندلی و کابین خلبان اهمیت ویژه‌ای دارد. آلفردسان و اندرسون (۲۰۱۲) [۵] چگونگی استفاده از مهندسی عوامل انسانی ( ارگونومی ) برای توسعه هواپیماهای جنگنده را توضیح داده است.

پژوهش‌های متعددی در دنیا برای بهره‌برداری از علم بیومکانیک و آنتروپومتریک و ارگونومی در حوزه‌های طراحی مرتبط با هوانوردی انجام‌شده است. با بررسی اولیه محققین در پژوهش‌های منتشرشده در این حوزه در دنیا مشخص می‌شود که استفاده از این مقوله در حوزه هوانوردی بسیار گسترده بوده است. به‌نحوی‌که با یک جستجوی عادی کلیدواژه‌های

ترکیبی"Anthropometric + aviation" در تاریخ ۲۷ بهمن ۱۳۹۸ در پایگاه Google Scholar ؛ تعداد بیش از ۷۱۰۰ منبع علمی قابل‌استخراج می‌باشد. بااین‌وجود با جستجوی فارسی همین عبارت، هیچ منبع علمی مرتبطی به زبان فارسی یافت نمی‌شود. لذا ضروری است پژوهش‌هایی در این حوزه برای کاهش سوانح هوایی صورت پذیرد. یکی از عرصه‌های مهم در کاهش سوانح، هماهنگی ابعاد بدنی خلبان و شرایط داخلی کابین می‌باشد، ازآنجاکه یکی از حوزه‌های اثرگذار در این هماهنگی، از بدو آموزش خلبانان روی هواپیمای مربوطه و مهم‌تر از آن، تخصیص خلبان به هواپیما توجه به شاخص‌های آنتروپومتریک خلبان می‌باشد؛ در این پژوهش با عنایت به این ضرورت تلاش بر رفع شکاف پژوهشی یادشده و گشودن راه‌های برای پژوهش‌های آتی و تعمق نظری و عملی به این حوزه وجود دارد. لذا تلاش می‌شود با استخراج شاخص‌های تخصیص متناسب با آنتروپومتری برای انواع هواپیماها (نظامی – غیرنظامی) به شناسایی معیارهای تصمیم‌گیری و تخصیص مستخرج از شاخص‌های یادشده پرداخته‌شده است و درنهایت با ارائه و پیاده‌سازی مدل تصمیم‌گیری چند شاخصه برای تعیین اولویت خلبانان برای یک مجموعه آموزشی دفاعی (خلبانان دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری)، زمینه کاربست علم ارگونومی، بیومکانیک و آنتروپومتری در این حوزه حیاتی و حساس و درنهایت کاهش سوانح و ارتقای ایمنی پروازها مهیا می‌گردد.

## ۲- تعاریف و پیشینه پژوهش

### ارگونومی

کلمه ارگونومی از دو واژه یونانی ergo به معنی کار و nomies به معنی قانون است. در اصطلاح ارگونومی عبارت است از دانش به کار بردن اطلاعات علمی دریافت شده از بدن انسان برای طراحی محیط کار. به‌طوری‌که در این دانش ازنظر فیزیولوژیکی و ساختار بدنی، تمام ظرفیت‌ها و توانمندی‌های انسان بررسی‌شده و اطلاعات به‌دست‌آمده در طراحی دقیق محیط کاری استفاده می‌شود.

ارگونومی در ۴ شاخه کلی خلاصه و تشریح می‌شود که این ۴ شاخه عبارت‌اند از «فیزیولوژی کار»، «روان‌شناسی مهندسی»، «بیومکانیک» و «آنتروپومتری». در ادامه به تشریح هر یک از این ۴ بعد پرداخته خواهد شد.

### فیزیولوژی کار

فیزیولوژی کار یکی از زیرشاخه‌های مهم ارگونومی است به‌طوری‌که فاکتورهایی مانند ارزیابی توانایی کاری، ضربان قلب، اکسیژن مصرفی و ویژگی‌های فیزیکی کاربر و ابزار، با استفاده از طراحی دقیق منجر به کارایی بهینه و کمتر شدن آسیب‌های وارده می‌شود [۶]. هم‌چنین اختلالات ناشی از عدم تطابق قابلیت‌های فردی و نیازمندی‌های شغلی را کاهش می‌دهد و باعث ممانعت از اختلالات عضلانی و اسکلتی می‌شود.

### روان‌شناسی مهندسی

این زیرشاخه از ارگونومی تلاش دارد تا با طراحی دقیق، روابط انسان با وسایل مکانیکی و محیط کار را تطبیق دهد و ماشین‌هایی را طراحی کنند تا حین کار در بخش‌های مختلف، امنیت و راحتی آن‌ها تأمین‌شده و عملکرد سیستم بهبود یابد [۷]. این بخش بیشتر بر جنبه‌های بهداشت و سلامت روانی تأکید دارد و سعی دارد از اختلالات ناخواسته جلوگیری کند.

### بیومکانیک

بیومکانیک (بیومکانیک)، علم مکانیک را در علوم پزشکی بررسی می‌کند. مهندسی بیومکانیک کاربرد ترکیبی از مهندسی مکانیک و علم پزشکی در زندگی انسان بوده و سعی در بهبود زندگی بشر دارد.

### آنتروپومتری

آنتروپومتری یکی از مهم‌ترین حیطه‌های ارگونومی محسوب می‌شود که هدف آن اندازه‌گیری ویژگی‌هایی از انسان است که بر طراحی یک محصول خاص اثرگذار خواهد بود. فراهم‌سازی اطلاعات آنتروپومتری در یک جامعه می‌تواند به طراحی‌های موردنیاز آن جامعه کمک فراوانی نماید. بر این مبنا طراحان با در اختیار داشتن ابعاد آنتروپومتری قادر هستند کالاها و محصولاتی را طراحی نمایند که ضمن کسب رضایت کاربران، موفقیت اقتصادی و دستیابی به اهداف سیستم‌ها و سازمان‌ها را با سلامت و رفاه کاربران مهیا نماید. اقوام هر کشور و حتی منطقه‌ای به دلیل شرایط اقلیمی، نژادی و تغذیه‌ای از ابعاد بدنی متفاوتی برخوردار هستند و ازنظر آنتروپومتری تفاوت‌هایی با اقوام دیگر کشورها دارند. از سویی دیگر ابعاد آنتروپومتری می‌تواند در بین افراد یک کشور نیز متفاوت باشد، به‌ویژه در کشورهای وسیع و با شرایط اقلیمی و نژادی مختلف مانند کشور عزیزمان ایران. لذا گردآوری اطلاعات آنتروپومتری

می‌تواند کمک شایانی به تولیدکنندگان محصولات و کالاها بنماید [۸].

آگاهی از ابعاد موردنیاز برای طراحی‌ها، پیش از گردآوری اطلاعات آنتروپومتری؛ سبب هدف‌دار بودن اندازه‌گیری‌ها می‌شود. چراکه برای طراحی هر ابزار یا ایستگاه کاری، ابعاد آنتروپومتری ویژه‌ای موردنیاز است که دسترسی طراحی به‌اندازه آن ابعاد، به‌تناسب بیشتر محصول تولیدی منجر خواهد شد. در مطالعات آنتروپومتری، هدف عمده استفاده نتایج برای طراحی محیط‌های، ابعاد متنوعی مانند ارتفاع، پهنا، عمق، طول، محیط، انحنا، فاصله و ... جمع‌آوری می‌شوند. در ادامه به مروری بر پژوهش‌های مرتبط داخلی و خارجی پرداخته می‌شود.

پیشینه پژوهش‌های داخلی مرتبط:

با توجه به جذابیت موضوعات مرتبط با ارگونومی و بیومکانیک و سایر ابعاد آن، طی سالیان گذشته و به‌ویژه در سالهای اخیر پژوهش‌های متعددی در این حوزه در ایران انجام و منتشرشده است ولیکن بااین‌وجود پژوهش‌های اندکی در حوزه علم هوانوردی و پرواز به انجام رسیده است ولیکن در حوزه طراحی کابین و سایر ابعاد هواپیما به‌صورت خاص، پژوهشی انجام و یا گزارش نشده است. بر این مبنا و با توجه به اینکه پژوهش‌های متعددی در حوزه صرفاً مباحث عمومی مرتبط با ارگونومی انجام‌شده ولیکن پژوهش‌های کمی در حوزه علم هوانوردی، در این قسمت به معرفی اندک پژوهش‌های مرتبط با حوزه هوانوردی و پرواز پرداخته می‌شود.

مرتضوی و همکاران (۱۳۹۵) [۹] در پژوهشی با عنوان «ایجاد یک شاخص عددی جهت اندازه‌گیری میزان بارکاری در شبیه‌ساز وظایف خلبان» با تبیین اینکه بررسی عملکردی خلبان درزمانی که چندین وظیفه مختلف بر عهده وی گذاشته می‌شود، مستلزم رویه‌ای است که بر مبنای آن، بتوان مشخصه‌های یک سناریو را با کمک شبیه‌ساز طی یک روند سیستماتیک به دست آورد. سیمولاتور عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان یک شبیه‌ساز استاندارد از وظایف کلی خلبان است که در سازمان ناسا توسعه‌یافته است. در پژوهش یادشده، با بهره‌گیری از تئوری اطلاعات، نرخ تبادل داده تولیدشده در زیرسیستم‌های مختلف شبیه‌ساز محاسبه‌شده و با برآیند گیری از آن‌ها، یک ملاک عددی واحد جهت تخمین بارکاری کلی ارائه گردیده است. پس‌ازآن به‌منظور بررسی اعتبار شاخص استخراج‌شده، سه تست طراحی‌شده که در آن‌ها سطوح مختلف بارکاری شامل کم، متوسط و زیاد بر مبنای نرخ تبادل داده بکار رفته در هر یک برچسب زده‌شده است. این تست‌ها توسط سوژه‌های انسانی در جایگاه خلبان اجراشده و در خلال آن‌ها، نظر شخصی هر فرد پیرامون بارکاری ادراک‌شده توسط او به‌وسیله پرسشنامه ناسا- تی ال ایکس ثبت‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده حکایت از آن داشته که میانگین نمره اختصاص داده‌شده از سوی سوژه‌ها به بارکاری کلی، در سه سطح تعریف‌شده با استفاده از تئوری اطلاعات، دارای اختلاف معنادار آماری بوده است ($P<0.001$) ؛ به صورتی که این مقدار از سطح کم به متوسط و از متوسط به زیاد، روند صعودی قابل‌توجهی را از خود نشان می‌دهد. نتیجه این پژوهش نشان داده است که شاخص کمی پیشنهادشده، در تعیین میزان بارکاری موجود در شبیه‌ساز ناسا از کارایی کافی برخوردار بوده است.

مصطفایی و همکاران (۱۳۹۴) [۱۰] در پژوهشی با عنوان «بررسی وضعیت آلودگی صدا در بخش ایمنی زمینی فرودگاه مهرآباد و ارتباط آن باقدرت شنوایی کارکنان» با ذکر این مقدمه که بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، کار کردن در فرودگاه از مشاغل پر صدا در دنیا است و کارکنان فرودگاه در معرض ابتلا به کاهش شنوایی می‌باشند. به ارزیابی تراز فشار صوت در اپرون (پارکینگ هواپیما) های مجاور اداره ایمنی زمینی در فرودگاه مهرآباد تهران و وضعیت شنوایی کارکنان اداره ایمنی زمینی پرداخته‌اند. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی میزان مواجهه شغلی کارکنان اداره ایمنی زمینی فرودگاه مهرآباد با صدا، اندازه‌گیری صدا در اپرونهای موردنظر به‌وسیله دستگاه صداسنج و آنالیزور انجام پذیرفته است.

**پیشینه پژوهش‌های خارجی مرتبط:**

برخلاف پیشینه فارسی پژوهش، پژوهش‌های بسیار متنوع و متعددی در حوزه هوانوردی و هواپیما و طراحی هواپیما و سایر ابعاد مرتبط در پیشینه خارجی موجود است به‌طوری‌که در تاریخ ۱۰ شهریور ۱۳۹۸ بالغبر ۶۷۰۰۰ مقاله با سرچ دو کلیدواژه Ergonomics + Aircraft در دیتابیس‌های علمی گوگل اسکالر حاصل شد. اگر سایر ابعاد و جنبه‌های مختلف با سرچ و کلیدواژه‌های دقیق‌تر را نیز درنظر بگیریم، به نظر می‌رسد حجم بسیار انبوهی از مقالات و پژوهش‌ها حاصل خواهند شد که فرصت بررسی نه‌تنها در این پژوهش و بلکه در

هیچ پژوهش واحدی را ممکن نمی‌نماید. لذا خلاصه نتایج شاخص‌های آنتروپومتریک که از جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های معتبر مرور شده به‌دست‌آمده است، در جدول ۱ درج‌شده است[۱].

**جدول ۱- ابعاد و شاخص‌های آنتروپومتریک مؤثر بر عملکرد خلبانان.**

| شماره | جنبه / بُعد | شاخص آنتروپومتریک مربوطه | نکات |
|---|---|---|---|
| ۱ | دید از کابین خلبان به خارج و به سمت پانل ابزار | ارتفاع چشم، نشسته | نکته: چندین جنبه دید از کابین خلبان می‌بایست اندازه‌گیری شود ،برای دید خارجی، چشم‌انداز بیش از دماغه و همچنین پشت کابین و برای دید داخلی، دید به سمت پانل و قسمت‌های بدن ازجمله زانو و قلم پا. در صورت لزوم بینایی را از پنجره‌های جانبی اندازه‌گیری شود. |
| | | قد | |
| ۲ | دسترسی دست(انگشت شست) به کنترل‌ها | طول دست | نکته۱: دسترسی به ابزارها و دکمه‌ها به ۴ صورت می‌گیرد:<br>۱) آن‌هایی که به‌طورمعمول با نوک اشاره عمل می‌کنند<br>۲) آن‌هایی که با انگشت شست و اشاره عمل می‌کنند<br>۳) آن‌هایی که با تمام دست گرفته‌شده‌اند (فرمان یا دستگیره کنترل) عمل می‌کنند<br>۴) آن‌هایی که با انگشتان دست به‌عنوان قلاب عمل می‌کنند.<br>نکته۲: مهم‌ترین دسترسی مربوط است به دریچه کنترل بخار یا بنزین |
| | | ارتفاع شانه، نشسته | |
| | | ارتفاع چشم، نشسته | |
| | | عرض شانه | |
| | | پهنای دست‌ها(به‌صورت باز)(Span) | |

[۱] علاقه‌مندان به مطالعه پیشینه وسیع‌تر این پژوهش می‌توانند به متن پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرادی (۱۳۹۸) [۱۲] دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری مراجعه بفرمایند.

| شماره | جنبه / بُعد | | شاخص آنتروپومتریک مربوطه | | نکات |
|---|---|---|---|---|---|
| ۳ | دسترسی به پدال سکان | | طول پا | | نکته۱: دستیابی به فشار پدال سکان و ترمز به‌صورت هم‌زمان باید مدنظر قرار گیرد.<br>نکته۲: طول پا به‌صورت ترکیب طول باسن-زانو و ارتفاع زانو، نشسته به نام یا(Combo leg) برای سنجش در نظر گرفته می‌شود. |
| | | | طول باسن-زانو | | |
| | | | ارتفاع زانو، نشسته | | |
| ۴ | تداخل فرمان با ران | | عرض ران | | نکته: برای اندازه‌گیری عرض ران باید به این نکته توجه نمود که خلبان توانایی کارکرد بافرمان را به‌صورت کامل در هنگام باند شدن هواپیما، داشته باشد. |
| ۵ | فضای پا | فضای ترخیص | طول باسن-زانو | | نکته۱: منظور از فضای ترخیص، فضای استاتیک بیرون کشیدن زانو ، پا و تنه با ساختارهای کابین خلبان می‌باشد.<br>نکته۲: موضوعات مربوط به فضای ترخیص باید در نزدیکی دامنه بالای طول باسن-زانو ، ارتفاع نشسته زانو، و عرض شانه(بیرون تا بیرون) باشد. |
| | | | ارتفاع زانو، نشسته | | |
| | | | وزن | | |
| | | فضای عملیاتی | عملیاتی پا با صفحه اصلی ابزار | طول پا | نکته۱: داده‌ها باید در طیف وسیعی از مقادیر برای ترکیبی از طول باسن-زانو و ارتفاع زانو به‌صورت نشسته) طول ترکیبی "طول پا یا " (" Combo Leg جمع‌آوری شوند.<br>نکته۲: اضافه کردن فضای جلوی زانو و قلم پا برای به دست آوردن مقدار فضای آستانه لازم است.<br>نکته۳: در بدترین حالت پدال سکان ، پدال خنثی یا راست یا چپ کامل گزارش‌شده است. |
| | | | | طول باسن-زانو | |
| | | | | ارتفاع زانو، نشسته | |
| | | | عملیاتی پا با فرمان | ارتفاع چشم، | - |

| شماره | جنبه / بُعد | | شاخص آنتروپومتریک مربوطه | | نکات |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | نشسته | |
| | | | | عرض ران | |
| | | | | دور ران | |
| | | | | عمق شکم | |
| ۶ | فضای بالای سر | | ارتفاع نشستن | | نکته۱: باید مطمئن گردید که سر با قسمت زیر سایبان یا سربار دیگر تماسی صورت نگیرد.<br>نکته۲: می‌توان سنجش را با سر برهنه انجام و میزان ضخامت کلاه ایمنی را به مقادیر به‌دست‌آمده اضافه نمود. |

دریکی از مرتبط‌ترین و جامع‌ترین پژوهش‌های مرتبط با شاخص‌های آنتروپومتریک خلبانان نظامی در نیروی هوایی ایالات‌متحده، زِهنر و هاندسودن (۲۰۰۲) [۱۱] با بررسی ابعاد بدنی موردنیاز برای انواع هواپیماهای نیروی هوایی آمریکا زمینه تدوین استانداردهای موردنیاز (حداقل و حداکثر شاخص‌ها) را فراهم نموده‌اند. در پژوهش یادشده به هفت بعد توجه شده است که این ابعاد عبارت‌اند از:

۱ .فضای پشت سر.
۲.حرکت و جابجایی Rudder pedal
۳ .دید داخلی و خارجی.
۴ -تناسب فضای استاتیک زانو، پا و تنه در کابین.
۵ .فضای عملیاتی حرکت پی خلبان.
۶ .فضای عملیاتی پا با دستگیره(Stick) کنترل حرکتی (توانایی خلبان درحرکت دستگیره از طریق طیف گسترده‌ای از ابزارهای موردنیاز کابین).
۷. دستیابی دست به اِستیک (Stick).

در ادامه استاندارد شاخص‌های آنتروپومتریک برای هواپیماهای منتخب (T-37، T-6، T-1، T-38، F-16، F-15، A-10، F-117، F-22) بر اساس پژوهش یادشده ارائه‌شده است.

ابعاد آنتروپومتریک موردمطالعه عبارت‌اند از:

- ارتفاع چشم، نشسته
- طول پا
- طول باسن-زانو
- ارتفاع زانو، نشسته
- طول دست
- ارتفاع شانه
- عرض شانه (عرض آکرومیال‌ها)
- فضای قلم پا تا پنل ابزار(قلم تا لبه پایینی پنل اصلی)
- ارتفاع نشستن

جدول شماره ۲ نشان‌دهنده اطلاعات ارتفاع نشسته چشم می‌باشد.

**جدول ۲. اطلاعات ارتفاع نشسته چشم [۱۱]**

| نوع هواپیما | مینیمم ارتفاع چشم، نشسته(اینچ) | ارتفاع اضافی چشم (اینچ) لازم برای حرکت صندلی به پایین |
|---|---|---|
| **T-37** | 27.5 | .625 per notch* |
| **T-6** | 25.0 | 1/1* |
| **T-1** | 29.6 | .80 per notch* |
| **T-38** | 29.75 | 1/1 |
| **F-16** | 30.2 | 1/1 |
| **F-15** | 30.5 | 1/1 |
| **A-10** | 29.0 | 1/1 |
| **F-117** | 29.6 | 1/1 |
| **F-22** | 29.0 | 1/1 |

ترکیب طول باسن-زانو و ارتفاع زانو، نشسته شاخصی جدید به نام کامبولگ[1] را به وجود می‌آورد. برای مثال اگر اندازه ۴۲ اینچ نیاز باشد مهم نیست که طول باسن-زانوی خلبان ۲۳ اینچ و ارتفاع زانو ۱۹ اینچ یا طول باسن-زانو خلبان ۲۲ اینچ و ارتفاع زانو ۲۰ اینچ باشد. در جدول ۳ حداقل اندازه کامبولگ موردنیاز برای خلبان هواپیماهای مختلف موردمطالعه درج‌شده است.

**جدول ۳. اطلاعات مینیمم کامبولگ**

| نوع هواپیما | مینیمم کامبولگ(اینچ) |
|---|---|
| **T-37** | 40.5 |
| **T-6** | 40.0 |
| **T-1** | 38.6 |
| **T-38** | 43.0 |
| **F-16** | 38.5 |
| **F-15** | 38.75 |
| **A-10** | 42.5 |
| **F-117** | 36.25 |
| **F-22** | 40.0 |

دسترسی دست به کنترل‌ها :

رسیدن به کنترل خاص تابعی از طول بازو ، قد شانه و ارتفاع چشم است. ارتفاع نشسته چشم دوباره در تنظیم صندلی نقش زیادی ایفا می‌کند ، زیرا خلبان باید حداقل دید کافی را حفظ کند. حرکت صندلی به بالا ، خلبان را از بیشتر کنترل‌ها دورتر می‌کند زیرا ارتفاع شانه‌ها نسبت به کنترل مستقیماً روی توانایی دستیابی خلبان تأثیر می‌گذارد.

رسیدن بازو نیز تحت تأثیر عرض شانه‌ها است، در درجه اول به دلیل سیستم بازدارندگی. در مورد شانه‌های باریک ، بند ممکن است باعث شود حرکت شانه به جلو حرکت نکند. بااین‌حال ، افراد با شانه پهن بهتر قادرند ضمن رسیدن ، شانه‌های خود را به بیرون از بندها بکشند.

برای رفع نیاز به رگرسیون که نیاز به سه متغیر پیش‌بینی کننده دارد ، متغیر طول دست‌ها به‌طور باز را برای رسیدن نوک انگشت شست و عرض شانه (عرض آکرومیالها) جایگزین شده است و با استفاده از طول دست‌ها به‌طور باز و ارتفاع شانه به‌طور نشسته رگرسیون دو متغیر را ایجاد نمودیم. برای برخی از کنترل‌ها ، به‌ویژه آن‌هایی که بالای سر و یا روی قسمت عقبی کنسول‌های جانبی قرار دارند ، ارتفاع شانه متغیر قابل‌توجهی در معادلات رگرسیون است. بنابراین، بیشتر اوقات، فقط طول دست‌ها به‌طور باز برای پیش‌بینی توانایی دستیابی لازم است.

**جدول ۴ - اطلاعات معادله رگرسیون**

| نوع هواپیما | معادله رگرسیون(عرض شانه=acrht ) |
|---|---|
| **T-37** | Stick = .38603 * acrht- .70890 * span + 34.4 (*) |
| **T-6** | Stick= Min Span 60.1" (*) |
| **T-1** | Throttle = .5468 * span - 31.6 |
| **T-38** | Throttle = .3239 * span - 21.6 |
| **F-16** | Throttle = .5328* span - 32.5 |
| **F-15** | Ebrake/Steer = .3318* span - 22.6 |
| **A-10** | Canopy Jettison = .39154*span-26.8 |
| **F-117** | Drag Chute = .6256 * span -39.7 |
| **F-22** | Gear ovrd = 14.8 + .83939 * acrht- .515 * span |

جدول ۵ نشان‌دهنده اطلاعات حداکثر طول باسن-زانو برای انواع مختلف هواپیما می‌باشد.

**جدول ۵. اطلاعات حداکثر طول باسن – زانو**

| نوع هواپیما | حداکثر طول باسن-زانو(اینچ) |
|---|---|
| **T-37** | 27.3 |
| **T-6** | 27.9 |
| **T-1** | 27.4 |
| **T-38** | 30.8 |
| **F-16** | 27.1 |
| **F-15** | 27.2 |
| **A-10** | 26.7 |
| **F-117** | 28.2 |
| **F-22** | 27.9 |

## ۳- متدولوژی پژوهش:

بررسی‌های پژوهشگران در منابع علمی معتبر و انتخاب سازوکار بهره‌برداری از شاخص‌های آنتروپومتریک در تعیین اولویت خلبانان برای هواپیماها نشان داد که در این مسئله با توجه به ماهیت و ذات تصمیم مربوطه که در آن تعداد متعددی شاخص درگیر مسئله می‌شوند، با استفاده از روش‌های سنتی، امکان اولویت‌بندی خلبانان وجود ندارد. لذا لازم است که از تکنیک‌های توسعه‌یافته برای این منظور استفاده شود که در علم تصمیم‌گیری چندمعیاره و زیرشاخه تصمیم‌گیری چند شاخصه مطرح می‌باشند (مؤمنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۴؛

[1] Comboleg

اصغرپور، ۱۳۹۷) [۱۳ و ۱۴]. لذا چنانکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود پس از تعیین شاخص‌های آنتروپومتریک مبتنی بر پیشینه پژوهش حداقل و حداکثر شاخص‌ها مبتنی بر استانداردها و وجود حداقل معیارها برای خلبانان موردبررسی (گزینه‌ها)، برای وزن دهی به معیارها از یکی از تکنیک‌های شاخص علم تصمیم‌گیری (آنتروپی شانون) استفاده شد و پس از تعیین وزن شاخص‌ها برای تعیین اولویت خلبانان نیز از یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه با عنوان الکتره استفاده شد. لازم به ذکر است که برای وزن دهی به شاخص‌ها از روش‌های دیگری همچون روش مقایسات زوجی و روش تعیین دستی وزن معیارها نیز می‌توان استفاده کرد. به‌منظور تعیین روایی پژوهش، الگوی عنوان‌شده به تأیید ۳ نفر از خبرگان علم تصمیم‌گیری چند شاخصه و ۵ نفر از خبرگان طب هوایی و هوانوردی رسیده است و حسب مورد در پژوهش‌ها و فعالیت‌های کاربردی آتی قابل‌استفاده است. در ادامه این الگو در یک نمونه واقعی عملی پیاده‌سازی می‌شود. به‌منظور ارتقای پایایی الگوی ارائه‌شده، به مستندسازی و تشریح نتایج اجرای الگو به‌صورت دقیق پرداخته شد.

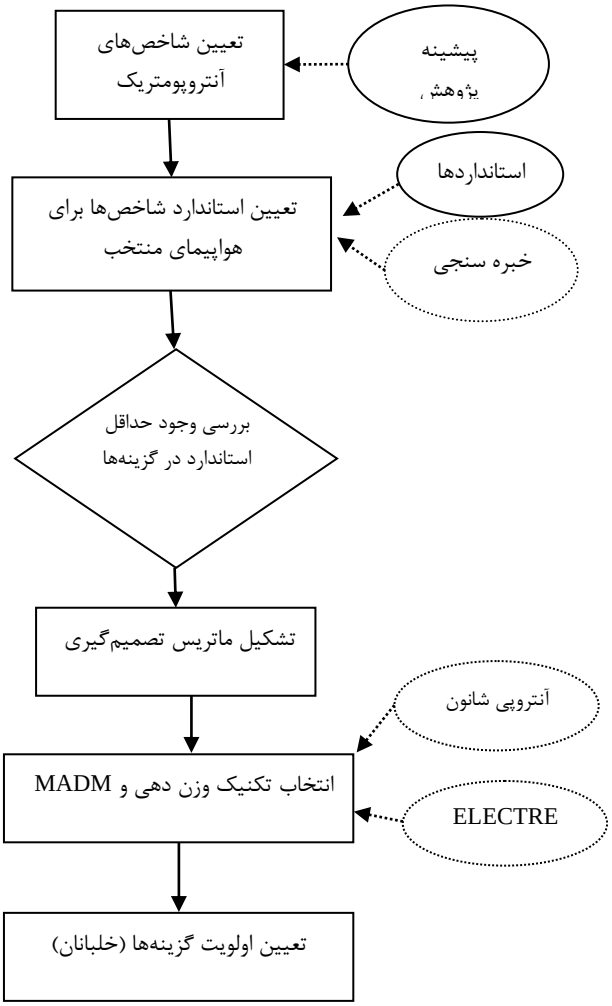
**مطالعه موردی یک نمونه واقعی اولویت‌بندی خلبانان مبتنی بر شاخص‌های آنتروپومتریک**

در این پژوهش به دلیل محدودیت تحلیل روی هواپیماهای داخلی به علت مشخص نبودن استانداردهای طراحی داخلی کابین و عدم دسترسی به استانداردهای موردنیاز در خصوص این شاخص‌ها و رعایت حیطه‌بندی اطلاعاتی، به تحلیل اولویت تخصیص خلبانان برای هواپیمای T37 پرداخته شد. لازم به ذکر است که اطلاعات مرتبط با شاخص‌های آنتروپومتریک این هواپیما و تعداد قابل‌توجهی از هواپیماهای دیگر در بخش قبل و پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرادی(۱۳۹۸) [۱۲] ارائه‌شده است. ازآنجاکه ایده محوری این پژوهش تشریح اهمیت و جایگاه شاخص‌های آنتروپومتریک و ارائه سازوکاری علمی و منطقی برای استفاده از این شاخص‌ها در تعیین اولویت تخصیص خلبانان به هواپیماها بر اساس یک نمونه واقعی بوده است.

از بین شاخص‌های تعیین‌شده با همکاری متخصصین حوزه طب هوایی و خبرگان هوانوردی تعداد ۹ شاخص مؤثر انتخاب شدند و در پرسشنامه پژوهش درج شدند و درنهایت در ماتریس تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی خلبانان و هواپیمای موردمطالعه درج شد، این معیارها عبارت‌اند از:

۱- معدل علمی (c1)
۲- معدل پروازی (c9)
۳- وزن (برحسب کیلوگرم) (c2)
۴- کامبولگ / که خود ترکیبی از طول باسن-زانو و ارتفاع زانو در حال نشسته است (برحسب سانتی‌متر) (c3)
۵- ارتفاع چشم نشسته (برحسب سانتی‌متر) (c4)
۶- عرض شانه (برحسب سانتی‌متر) (c5)
۷- طول دست (c6)
۸- ارتفاع شانه(c7)
۹- طول پا(c8)

بر این مبنا ماتریس تصمیم‌گیری مسئله پژوهش در جدول شماره ۴ درج‌شده است. ماتریسی ۹*۱۵ به‌عنوان ماتریس تصمیم برای اولویت‌بندی تعداد ۱۵ گزینه (خلبان) که اطلاعات آنتروپومتریک ایشان استخراج و حداقل‌های لازم برای هواپیمای منتخب را داشتند، در خصوص ۹ معیار پژوهش تشکیل شد. اطلاعات این خلبانان واقعی بوده و با کمک متخصصان طب هوایی بیمارستان بعثت نهاجا گردآوری شد. چنانکه مشاهده می‌شود میانگین، انحراف معیار و میانه هر شاخص برای خلبانان موردمطالعه در ستون مربوطه درج‌شده است.




**شکل ۳. فرایند پژوهش**

**جدول ۴- ماتریس تصمیم‌گیری اولویت‌بندی خلبانان**

| | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| گزینه ۱ | 15.76 | 80 | 119 | 81 | 42 | 18 | 147 | 26 | 17.36 |
| گزینه ۲ | 16.12 | 77 | 111 | 77 | 36 | 18 | 146 | 26 | 16.79 |
| گزینه ۳ | 16.81 | 78 | 118 | 80 | 34 | 20 | 151 | 27 | 19.02 |
| گزینه ۴ | 17.05 | 84 | 117 | 71 | 37 | 19 | 148 | 28 | 18.75 |
| گزینه ۵ | 14.75 | 69 | 108 | 76 | 34 | 19 | 142 | 25 | 15.73 |
| گزینه ۶ | 16.83 | 95 | 116 | 73 | 34 | 18 | 149 | 26 | 18.03 |
| گزینه ۷ | 17.84 | 85 | 104 | 77 | 39 | 19 | 143 | 25 | 19.02 |
| گزینه ۸ | 15.62 | 71 | 104 | 73 | 37 | 18 | 142 | 23 | 14.63 |
| گزینه ۹ | 16.07 | 84 | 114 | 81 | 38 | 20 | 151 | 26 | 15.55 |
| گزینه ۱۰ | 17.33 | 74 | 108 | 73 | 35 | 18 | 140 | 25 | 17.95 |
| گزینه ۱۱ | 14.85 | 90 | 122 | 77 | 37 | 20 | 153 | 25 | 17.03 |
| گزینه ۱۲ | 15.43 | 85 | 117 | 82 | 40 | 18 | 145 | 25 | 16.78 |
| گزینه ۱۳ | 17.62 | 90 | 118 | 74 | 36 | 20 | 155 | 27 | 15.93 |
| گزینه ۱۴ | 16.02 | 94 | 121 | 78 | 37 | 20 | 158 | 28 | 14.83 |
| گزینه ۱۵ | 17.13 | 95 | 116 | 73 | 35 | 19 | 153 | 27 | 18.09 |
| میانگین | 16.35 | 83.40 | 114.20 | 76.40 | 36.73 | 18.93 | 148.20 | 25.93 | 17.03 |
| انحراف استاندارد | 0.93 | 8.19 | 5.64 | 3.38 | 2.24 | 0.85 | 5.11 | 1.29 | 1.41 |
| میانه | 16.12 | 84 | 116 | 77 | 37 | 19 | 148 | 26 | 17.03 |

## تعیین وزن معیارها

برای تعیین وزن معیارها دور رویکرد وزن دهی وجود دارد که رویکرد اول استفاده از شیوه وزن دهی مبتنی بر نظرات خبرگان است که با استفاده از روش‌هایی همچون ماتریس مقایسات زوجی و یا میانگین‌گیری ازنظرات خبرگان استفاده می‌شود. رویکرد دوم استفاده از ماتریس تصمیم مسئله موردبررسی مبتنی بر روش آنتروپی شانون است. در این پژوهش به دلیل دقت این شیوه از روش شانون استفاده‌شده است.

مفهوم آنتروپی شانون (شانون ، ۱۹۴۸) [۱۵] نقش مهمی در نظریه اطلاعات دارد. این مفهوم درزمینه‌های مختلف علمی ، ازجمله فیزیک ، علوم اجتماعی و غیره توسعه‌یافته است. در تئوری اطلاعات ، آنتروپی اندازه‌گیری مقدار اطلاعات موردنیاز برای توصیف متغیر تصادفی است.

گام اول: ابتدا ماتریس تصمیم را تشکیل می‌دهیم. برای تشکیل این ماتریس تصمیم کافی است اگر معیارها کیفی هستند از عبارات کلامی ارزیابی هر گزینه را نسبت به هر معیار به دست آوریم و اگر معیارها کمی هستند عدد واقعی آن ارزیابی را قرار دهیم. در شکل زیر که ماتریس تصمیم می‌باشد ستون‌ها معیار و سطرهای گزینه‌ها هستند. به‌عنوان‌مثال درایه x12 امتیاز گزینه اول نسبت به معیار دوم است.

$$X = [x_{ij}]_{n\times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & xnm \end{bmatrix} \quad (۱)$$

گام دوم: ماتریس را نرمالیزه می‌کنیم و هر درایه نرمال شده را pijمی‌نامیم. نرمالیزه کردن ماتریس به این صورت می‌باشد که درایه هر ستون را بر مجموع ستون تقسیم می‌کنیم.

گام سوم: محاسبه آنتروپی هر شاخص: آنتروپی Ej به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد و k به‌عنوان مقدار ثابت مقدار Ej را بین ۰ و ۱ نگه می‌دارد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} P_{ij} \times Ln\, P_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,m \quad (۲)$$

که در آن p (x) توزیع احتمال متغیر تصادفی X است. افزایش در آنتروپی شانون باعث افزایش عدم اطمینان و کاهش طلاعات در مورد دانش فاکتور مربوطه می‌شود.

گام چهارم: در ادامه مقدار $d_j$ (درجه انحراف) محاسبه می‌شود.

$$d_j = 1 - E_j \quad (۳)$$

گام پنجم: سپس مقدار وزن $W_j$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. درواقع وزن معیار برابر با هر $d_j$ تقسیم‌بر مجموع $d_j$ ها می‌باشد.

$$w_j = d_j / \sum d_j \quad (۴)$$

پس از طی مراحل عنوان‌شده برای تعیین وزن شاخص‌ها، درنهایت وزن هر یک از معیارهای این مسئله به شرح جدول ۶ محاسبه شد. لازم به ذکر است که در این جدول ماهیت و جنس معیار (مثبت و منفی) نیز مشخص‌شده است. این ماهیت و جنس معیارها در مراحل بعدی و محاسبات روش Electre به کار می‌آید و معیار از جنس سود (هزینه) معیاری است که مطلوبیت آن با افزایش مقدار افزایش (کاهش) می‌یابد.

## ۴- نتایج پژوهش

در ادامه به تحلیل یافته‌های پژوهش به‌صورت گام‌به‌گام و مبتنی بر متدولوژی ارائه‌شده پرداخته می‌شود.

### مراحل اولویت‌بندی مبتنی بر روش ELECTRE

در ادامه مراحل اولویت‌بندی گزینه‌ها (۱۵ خلبان مسئله موردمطالعه) مبتنی بر روش الکتره تشریح می‌شود. در این روش در مرحله اول ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود (این ماتریس در مرحله قبل تشکیل شد) و در مرحله دوم سعی می‌شود معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بدون بعد تبدیل شوند برای بی مقیاس (نرمالیزه) کردن از رابطه ۶ استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (۶)$$

**جدول۶. وزن و ماهیت شاخص‌ها**

| | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نوع شاخص | مثبت | منفی | مثبت | مثبت | مثبت | مثبت | مثبت | مثبت | مثبت |
| وزن شاخص | ۰.۰۴۷۵ | ۰.۰۲۸۷۷ | ۰.۰۲۳۱ | ۰.۰۵۸۱ | ۰.۰۱۸۵ | ۰.۰۶۰۳ | ۰.۰۳۵۳ | ۰.۰۲۳۸ | ۰.۰۲۰۴۷ |

نتیجه محاسبات و ماتریس نرمالیزه شده این مسئله به‌صورت جدول ۷ می‌باشد.

**جدول ۷ ماتریس نرمالیزه شده**

| | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |
| A2 | 0.25 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.25 |
| A3 | 0.27 | 0.24 | 0.27 | 0.27 | 0.24 | 0.27 | 0.26 | 0.27 | 0.29 |
| A4 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.28 | 0.28 |
| A5 | 0.23 | 0.21 | 0.24 | 0.26 | 0.24 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.24 |
| A6 | 0.27 | 0.29 | 0.26 | 0.25 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.27 |
| A7 | 0.28 | 0.26 | 0.23 | 0.26 | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.29 |
| A8 | 0.25 | 0.22 | 0.23 | 0.25 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.23 | 0.22 |
| A9 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 0.23 |
| A10 | 0.27 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.25 | 0.27 |
| A11 | 0.23 | 0.28 | 0.28 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.25 | 0.26 |
| A12 | 0.24 | 0.26 | 0.26 | 0.28 | 0.28 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| A13 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.24 |
| A14 | 0.25 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.22 |
| A15 | 0.27 | 0.29 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.27 |

در مرحله چهارم روش الکتره به تعیین ماتریس تصمیم وزن‌دار نرمال شده پرداخته می‌شود. این ماتریس از ضرب ماتریس تصمیم بی مقیاس شده در برابر وزن معیارها به دست می‌آید.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \qquad j = 1,2,\dots,n; i = 1,2,\dots,m \quad (۷-۳)$$

جدول ۸ نشان‌دهنده مقدار حاصل‌ضرب مقادیر ماتریس نرمالیزه شدن در وزن معیارها برای هر یک از گزینه‌ها می‌باشد.

**جدول ۸. ماتریس تصمیم وزن‌دار**

| | c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 0.024 | 0.071 | 0.020 | 0.016 | 0.032 | 0.015 | 0.009 | 0.019 | 0.054 |
| A2 | 0.025 | 0.069 | 0.018 | 0.015 | 0.027 | 0.015 | 0.009 | 0.019 | 0.052 |
| A3 | 0.026 | 0.069 | 0.020 | 0.016 | 0.026 | 0.016 | 0.009 | 0.020 | 0.059 |
| A4 | 0.026 | 0.075 | 0.019 | 0.014 | 0.028 | 0.016 | 0.009 | 0.021 | 0.058 |
| A5 | 0.023 | 0.061 | 0.018 | 0.015 | 0.026 | 0.016 | 0.009 | 0.018 | 0.049 |
| A6 | 0.026 | 0.085 | 0.019 | 0.014 | 0.026 | 0.015 | 0.009 | 0.019 | 0.056 |
| A7 | 0.027 | 0.076 | 0.017 | 0.015 | 0.030 | 0.016 | 0.009 | 0.018 | 0.059 |
| A8 | 0.024 | 0.063 | 0.017 | 0.014 | 0.028 | 0.015 | 0.009 | 0.017 | 0.045 |
| A9 | 0.025 | 0.075 | 0.019 | 0.016 | 0.029 | 0.016 | 0.009 | 0.019 | 0.048 |
| A10 | 0.027 | 0.066 | 0.018 | 0.014 | 0.027 | 0.015 | 0.009 | 0.018 | 0.056 |
| A11 | 0.023 | 0.080 | 0.020 | 0.015 | 0.028 | 0.016 | 0.009 | 0.018 | 0.053 |
| A12 | 0.024 | 0.076 | 0.019 | 0.016 | 0.031 | 0.015 | 0.009 | 0.018 | 0.052 |
| A13 | 0.027 | 0.080 | 0.020 | 0.015 | 0.027 | 0.016 | 0.010 | 0.020 | 0.049 |
| A14 | 0.025 | 0.084 | 0.020 | 0.015 | 0.028 | 0.016 | 0.010 | 0.021 | 0.046 |
| A15 | 0.026 | 0.085 | 0.019 | 0.014 | 0.027 | 0.016 | 0.009 | 0.020 | 0.056 |

در مرحله پنجم به تشکیل مجموعه معیارهای موافق و مخالف پرداخته می‌شود.

برای هر زوج گزینه k و e مجموعه معیارها به دو زیرمجموعه موافق و مخالف تقسیم می‌شوند. مجموعه موافق $(S_{ke})$ مجموعه‌ای از معیارهایی است که در آن گزینه k به گزینه e ترجیح دارد و مجموعه مکمل آن مجموعه مخالف $(D_{ke})$ می‌باشد مجموعه معیارهای موافق برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$S_{ke} = \{j | v_{kj} \geq v_{ej}\} \quad (۸)$$

$$S_{ke} = \{j | v_{kj} \geq v_{ej}\} \quad (۹)$$

مجموعه معیارهای مخالف برای مثبت و منفی به ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D_{ke} = \{j | v_{kj} < v_{ej}\} = J - S_{ke} \quad (۱۰)$$

$$D_{ke} = \{j | v_{kj} > v_{ej}\} = J - S_{ke} \quad (۱۱)$$

در مرحله بعد تشکیل ماتریس هماهنگی انجام می‌شود. ماتریس توافق (هماهنگی) یک ماتریس مربعی است که بعد آن

تعداد گزینه‌ها می‌باشد. هر یک از درایه‌های این ماتریس، شاخص توافق بین دو گزینه نامیده می‌شود. مقدار این شاخص، از جمع وزن معیارهایی که در مجموعه موافق وجود دارند، به دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر برای محاسبه شاخص توافق ($C_{ke}$) باید گزینه k و گزینه e مقایسه شده و مقدار آن از جمع وزن معیارهایی که گزینه k نسبت به گزینه e ترجیح دارد، به دست می‌آید. به زبان ریاضی، شاخص توافق از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{ke} = \sum_{j \in S_{ke}} W_j \qquad (۱۲)$$

شاخص توافق، بیانگر میزان برتری گزینه k بر گزینه e بوده و مقدار آن از صفر تا یک تغییر می‌کند. ماتریس توافق برای این مسئله به‌صورت جدول ۹ حاصل شد.

**جدول ۹. ماتریس هماهنگی (توافق)**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | - | 0.61 | 0.24 | 0.53 | 0.65 | 0.66 | 0.64 | 0.71 | 0.81 | 0.41 | 0.83 | 0.94 | 0.73 | 0.66 | 0.53 |
| A2 | 0.52 | - | 0.40 | 0.35 | 0.65 | 0.59 | 0.53 | 0.60 | 0.66 | 0.41 | 0.52 | 0.76 | 0.66 | 0.59 | 0.46 |
| A3 | 0.76 | 0.60 | - | 0.72 | 0.71 | 0.90 | 0.79 | 0.60 | 0.83 | 0.51 | 0.78 | 0.83 | 0.76 | 0.71 | 0.76 |
| A4 | 0.47 | 0.65 | 0.28 | - | 0.65 | 0.91 | 0.53 | 0.65 | 0.74 | 0.56 | 0.77 | 0.83 | 0.68 | 0.77 | 0.81 |
| A5 | 0.35 | 0.35 | 0.40 | 0.41 | - | 0.52 | 0.50 | 0.79 | 0.49 | 0.59 | 0.36 | 0.42 | 0.35 | 0.49 | 0.41 |
| A6 | 0.47 | 0.54 | 0.21 | 0.09 | 0.59 | - | 0.18 | 0.60 | 0.45 | 0.51 | 0.38 | 0.47 | 0.20 | 0.30 | 0.42 |
| A7 | 0.36 | 0.53 | 0.41 | 0.53 | 0.64 | 0.82 | - | 0.71 | 0.41 | 0.64 | 0.83 | 0.72 | 0.76 | 0.70 | 0.82 |
| A8 | 0.35 | 0.46 | 0.40 | 0.46 | 0.24 | 0.52 | 0.36 | - | 0.29 | 0.55 | 0.49 | 0.45 | 0.40 | 0.40 | 0.46 |
| A9 | 0.33 | 0.41 | 0.26 | 0.55 | 0.51 | 0.62 | 0.59 | 0.71 | - | 0.41 | 0.69 | 0.56 | 0.52 | 0.82 | 0.52 |
| A10 | 0.65 | 0.65 | 0.49 | 0.44 | 0.56 | 0.61 | 0.44 | 0.57 | 0.59 | - | 0.66 | 0.72 | 0.49 | 0.59 | 0.55 |
| A11 | 0.17 | 0.54 | 0.28 | 0.34 | 0.71 | 0.62 | 0.30 | 0.61 | 0.37 | 0.41 | - | 0.45 | 0.79 | 0.74 | 0.62 |
| A12 | 0.12 | 0.30 | 0.17 | 0.24 | 0.65 | 0.59 | 0.64 | 0.61 | 0.44 | 0.41 | 0.63 | - | 0.66 | 0.66 | 0.53 |
| A13 | 0.27 | 0.45 | 0.45 | 0.32 | 0.65 | 0.80 | 0.24 | 0.60 | 0.54 | 0.51 | 0.56 | 0.34 | - | 0.65 | 0.80 |
| A14 | 0.34 | 0.41 | 0.35 | 0.41 | 0.51 | 0.70 | 0.30 | 0.71 | 0.24 | 0.41 | 0.43 | 0.34 | 0.41 | - | 0.70 |
| A15 | 0.47 | 0.54 | 0.32 | 0.25 | 0.65 | 1.00 | 0.24 | 0.60 | 0.48 | 0.61 | 0.41 | 0.47 | 0.28 | 0.30 | - |

در مرحله بعد ماتریس مخالف (ناهماهنگی) تعیین می‌شود. ماتریس مخالف یک ماتریس مربعی می‌باشد که بعد آن تعداد گزینه‌ها می‌باشد. هر یک از درایه‌های این ماتریس، شاخص عدم توافق (مخالفت) بین دو گزینه نامیده می‌شود. مقدار این شاخص از رابطه زیر به دست می‌آید. جدول ۱۰ ماتریس ناهماهنگی را نشان می‌دهد.

$$d_{ke} = \frac{\max_{j \in D_{ke}} |v_{kj} - v_{ej}|}{\max_{j \in J} |v_{kj} - v_{ej}|} \qquad (۱۳)$$

**جدول ۱۰. ماتریس ناهماهنگی**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | - | 0.58 | 0.84 | 1 | 1 | 0.16 | 1 | 0.95 | 0.29 | 1 | 0.19 | 0.04 | 0.32 | 0.13 | 0.17 |
| A2 | 1 | - | 1 | 0.97 | 1 | 0.24 | 0.97 | 0.8 | 0.26 | 1 | 0.16 | 0.43 | 0.2 | 0.11 | 0.25 |
| A3 | 1 | 0.22 | - | 0.43 | 0.79 | 0 | 0.61 | 0.46 | 0.28 | 1 | 0.21 | 0.66 | 0.14 | 0.16 | 0.05 |
| A4 | 0.89 | 1 | 1 | - | 1 | 0.04 | 0.69 | 0.91 | 0.2 | 1 | 0.22 | 0.38 | 0.1 | 0.11 | 0.04 |
| A5 | 0.62 | 0.46 | 1 | 0.7 | - | 0.31 | 0.72 | 0.67 | 0.23 | 1 | 0.22 | 0.32 | 0.24 | 0.1 | 0.32 |
| A6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.69 | 0.23 | 1 |
| A7 | 0.87 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.22 | - | 0.92 | 0.15 | 1 | 0.48 | 0.31 | 0.24 | 0.22 | 0.22 |
| A8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.49 | 1 | - | 0.25 | 1 | 0.44 | 0.53 | 0.24 | 0.18 | 0.5 |
| A9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.78 | 1 | 1 | - | 1 | 0.86 | 1 | 0.45 | 0.17 | 0.8 |
| A10 | 1 | 0.22 | 0.93 | 0.28 | 0.65 | 0.07 | 0.34 | 0.26 | 0.26 | - | 0.16 | 0.39 | 0.12 | 0.12 | 0.08 |
| A11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 0.32 | 0.79 |
| A12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.44 | 1 | 1 | 0.43 | 1 | 0.37 | - | 0.76 | 0.28 | 0.46 |
| A13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 1 | - | 0.22 | 1 |
| A14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 |
| A15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.67 | 0.15 | - |

در مرحله بعد ماتریس تسلط موافق (بولینی هماهنگی) تشکیل می‌شود. در این مرحله یک مقدار معین برای شاخص توافق مشخص می‌شود که آن را آستانه موافقت می‌نامند و با $\bar{C}$ نشان داده می‌شود. آستانه موافقت از میانگین‌گیری شاخص‌های توافق (درایه‌های ماتریس توافق) به دست می‌آید. به زبان ریاضی مقدار آستانه موافقت از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\bar{c} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{e=1}^{m} \frac{C_{ke}}{m(m-1)} \qquad (۱۴)$$

ماتریس تسلط موافق (F) با توجه به مقدار آستانه موافقت تشکیل می‌شود. اگر $C_{ke}$ بزرگ‌تر از $\bar{C}$ باشد، برتری گزینه k بر گزینه e قابل‌قبول است در غیر این صورت گزینه k بر گزینه e برتری ندارد لذا درایه‌های ماتریس تسلط موافق از رابطه زیر تعیین می‌شود. این ماتریس در جدول ۱۱ نشان داده‌شده است.

$$f_{ke} = \begin{cases} 1 & c_{ke} \geq \bar{c} \\ 0 & c_{ke} < \bar{c} \end{cases} \qquad (۱۵)$$

**جدول ۱۱. ماتریس بولینی هماهنگی**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | - | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| A2 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| A3 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A4 | 0 | 1 | 0 | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | - | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| A10 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| A11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 1 | 1 |
| A12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | - | 1 | 1 | 0 |
| A13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | - | 1 | 1 |
| A14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 |
| A15 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

در مرحله بعد ماتریس تسلط مخالف (بولینی ناهماهنگی) تشکیل می‌شود. ماتریس تسلط مخالف (G) مانند ماتریس تسلط موافق تشکیل می‌شود. بدین منظور ابتدا باید مقدار آستانه مخالفت ($\bar{d}$) از میانگین‌گیری شاخص‌های مخالفت (درایه‌های ماتریس مخالف) محاسبه شود. به زبان ریاضی مقدار آستانه مخالفت از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{e=1}^{m}\frac{d_{ke}}{m(m-1)} \qquad (۱۶-۳)$$

همان‌گونه که در مرحله قبل بیان شد، مقدار شاخص مخالفت ($d_{ke}$)هر چه کمتر باشد بهتر است. زیرا میزان مخالفت (عدم توافق) برتری گزینه k بر گزینه e را بیان می‌کند. چنانچه $d_{ke}$ از ($\bar{d}$)بزرگ‌تر باشد میزان مخالفت زیاد بوده و نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد بنابراین درایه‌های ماتریس تسلط مخالف (G) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$g_{ke} = \begin{cases} 1 & d_{ke} \geq \bar{d} \\ 0 & d_{ke} < \bar{d} \end{cases} \qquad (۱۷)$$

هر عضو ماتریس G نیز نشان‌گر رابطه تسلط مابین گزینه‌ها می‌باشد. این ماتریس در جدول ۱۲ نشان داده‌شده است.

**جدول ۱۲. ماتریس بولینی ناهماهنگی**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A2 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A3 | 0 | 1 | - | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A4 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A5 | 1 | 1 | 0 | 1 | - | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | - | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | - | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| A10 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 |
| A12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | - | 0 | 1 | 1 |
| A13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 |
| A14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| A15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

درنهایت تشکیل ماتریس چیرگی نهایی از ضرب تک تک درایه‌های ماتریس‌های G و F به دست می‌آید. بر این مبنا ماتریس چیرگی نهایی مطابق جدول ۱۳ می‌باشد.

**جدول ۱۳. ماتریس چیرگی نهایی**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| A2 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| A3 | 0 | 1 | - | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A4 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A5 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | - | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| A10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| A11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 1 | 0 |
| A12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | - | 0 | 1 | 0 |
| A13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 1 | 0 |
| A14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| A15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

درنهایت مطابق جدول ۱۴با محاسبه تعداد چیرگی هر گزینه، اولویت هر یک از خلبانان موردمطالعه برای هواپیمای موردمطالعه مشخص می‌شود.

**جدول ۱۴. تعداد چیرگی هر گزینه**

| اولویت | گزینه | تعداد چیرگی |
|---|---|---|
| اولویت ۱ | گزینه۳ | 11 |
| اولویت ۲ | گزینه۱۰ | 9 |
| اولویت ۳ | گزینه۱ | 7 |
| اولویت ۴ | گزینه۷ | 6 |
| اولویت ۵ | گزینه۴ | 7 |
| اولویت ۶ | گزینه۲ | 5 |
| اولویت ۷ | گزینه۱۲ | 3 |
| اولویت ۸ | گزینه۱۱ | 2 |
| اولویت ۹ | گزینه۵ | 1 |
| اولویت ۹ | گزینه۹ | 1 |
| اولویت ۹ | گزینه۱۳ | 1 |
| اولویت ۹ | گزینه۱۵ | 1 |
| اولویت ۱۳ | گزینه۶ | 0 |
| اولویت ۱۳ | گزینه۸ | 0 |
| اولویت ۱۳ | گزینه۱۴ | 0 |

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن بررسی نهایی ملاک‌ها و معیارهای آنتروپومتریک مؤثر در تعیین اولویت خلبانان برای هواپیماها مبتنی بر پیشینه پژوهش، شاخص‌ها و معیارها تعیین و در یک هواپیمای مثالی (T37) به اولویت‌بندی خلبانان موردمطالعه (در یک نمونه واقعی) پرداخته شد و نتایج اولویت‌بندی خلبانان مبتنی بر الگوی ارائه‌شده در شکل ۳ (الگوی تعیین اولویت خلبانان مبتنی بر شاخص‌های آنتروپومتریک) به‌صورت گام‌به‌گام ارائه شد. نقاط قوت این الگو عبارت است از:

- استفاده از شاخص‌های آنتروپومتریک در تعیین اولویت خلبانان برای اولین بار
- مطالعه جامع شاخص‌های یادشده مبتنی بر پیشینه بین‌المللی موضوع
- پیاده‌سازی الگوی ارائه‌شده در یک نمونه موردی واقعی از خلبانان
- به‌کارگیری روش‌های علم تصمیم‌گیری چند شاخصه

با تحلیل نتایج با استفاده از گام‌های تکنیک منتخب (ELECTRE) و نرم‌افزارهای Excel و Electre Solver، اولویت خلبانان برای تخصیص به هواپیمای منتخب مشخص و در بخش قبل ارائه شد. به دلیل رعایت مشخصات شخصی خلبانان موردمطالعه به‌جای نام ایشان از عنوان گزینه X استفاده‌شده است. در جدول ۱۵ به مقایسه اولویت‌بندی بر اساس الگوی سنتی (اولویت بر اساس میانگین معدل علمی و عملی ) با الگوی پژوهش حاضر که مبتنی بر شاخص‌های علمی- عملی و آنتروپومتریک (هم‌زمان) بوده پرداخته‌شده است. مشاهده می‌شود که تغییر بسیار زیادی در اولویت تعیین هواپیمای خلبانان با این دو رویکرد وجود دارد. بیشترین تغییر برای خلبانان گزینه ۱۰ است که در اولویت ۲ بر مبنای شاخص‌های آنتروپومتریک و معدل است و اگر صرفاً بر اساس معدل علمی و عملی دوران دانشجویی طبقه‌بندی شوند در اولویت ۹ قرار می‌گیرد و خلبان گزینه ۷ که بر اساس معدل در رتبه اول است در اولویت‌بندی مبتنی بر ترکیب معدل و این شاخص‌ها (الگوی پژوهش حاضر) در اولویت ۴ قرار می‌گیرد و چه‌بسا که به‌کارگیری خلبان بدون در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپومتریک سبب محرومیت از تمامی مزایای عنوان‌شده و تحمیل هزینه‌های ناشی از عدم تناسب ویژگی‌های بدنی با کابین می‌شود.

**جدول ۱۵. مقایسه اولویت خلبانان بر اساس الگوی پژوهش حاضر و رویکرد سنتی**

| اولویت بر اساس الگوی پژوهش | گزینه | اولویت بر اساس معدل |
|---|---|---|
| اولویت ۱ | گزینه۳ | اولویت ۲ (-۱) |
| اولویت ۲ | گزینه۱۰ | اولویت ۹ (-۷) |
| اولویت ۳ | گزینه۱ | اولویت ۸ (-۵) |
| اولویت ۴ | گزینه۷ | اولویت ۱ (+۳) |
| اولویت ۵ | گزینه۴ | اولویت ۳ (+۲) |
| اولویت ۶ | گزینه۲ | اولویت ۹ (-۳) |
| اولویت ۷ | گزینه۱۲ | اولویت ۱۰ (-۳) |
| اولویت ۸ | گزینه۱۱ | اولویت ۱۱ (-۳) |
| اولویت ۹ | گزینه۵ | اولویت ۱۴ (-۵) |
| اولویت ۹ | گزینه۹ | اولویت ۱۲ (-۳) |
| اولویت ۹ | گزینه۱۳ | اولویت ۷ (-۲) |
| اولویت ۹ | گزینه۱۵ | اولویت ۵ (+۴) |
| اولویت ۱۳ | گزینه۶ | اولویت ۶ (+۷) |
| اولویت ۱۳ | گزینه۸ | اولویت ۱۵ (-۲) |
| اولویت ۱۳ | گزینه۱۴ | اولویت ۱۳ (-) |

یکی از نقاط قوت و ارزش افزای استفاده از مدل‌ها و الگوهای با دقت و تعداد معیار بالا در تصمیم‌گیری، این است که به‌ندرت و تقریباً با احتمال نزدیک به صفر، امکان بروز اولویت یکسان بین دو یا چند گزینه رخ می‌دهد چراکه اولاً تعداد معیارها نسبت به حالت معمول بسیار زیاد است چون در حالت معمول فقط یک یا حداکثر دو معیار (معدل علمی و عملی) در اولویت‌بندی و تخصیص هواپیما به خلبانان ملاک ارزیابی است و ثانیاً دقت مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه بسیار بالاست که امکان بروز اولویت یکسان را به نزدیک به صفر می‌رساند. بااین‌وجود فرض محال، محال نمی‌باشد و در صورت شرایط یکسان باید به این نکته دقت کرد که مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، ابزار کمکی تصمیم‌گیرنده و صاحب مسئله (در اصطلاح علم تصمیم‌گیری: DM[1]) است و نظر و تصمیم نهایی در چنین شرایطی با صاحب مسئله است و بر این اساس اگر اولویت بین دو خلبان یکسان باشد، نظر نهایی درباره اولویت‌بندی دو خلبان بهتر است بر اساس نظر خبرگی و تفاوت در نمرات در معیارها در نظر گرفته شود. مثلاً از DM پرسیده شود که کدام معیار برای شما مهم‌ترین است و اگر در آن معیار میزان نمره متفاوت بود، اولویت به فرد دارای نمره مطلوب‌تر تخصیص داده می‌شود و اگر در این معیار (و معیارهای دارای اهمیت بعدی ازنظر DM) نیز نمرات یکسان بود، تصمیم و اولویت بر اساس معیارهای بعدتر به لحاظ درجه اهمیت اتخاذ می‌شود (هرچند که تقریباً وقوع این حالت با توجه به تفاوت ابعاد بدنی و شاخصه‌های آنتروپومتریک افراد بعید به نظر می‌رسد.

## پیشنهادات کاربردی

با توجه به مجموعه مطالعات انجام‌شده پیشنهاد می‌گردد:

- مراکز آموزشی حوزه هوانوردی در تعیین اولویت تخصیص خلبانان خود به انواع هواپیماها از روش ارائه‌شده در این پژوهش استفاده نمایند.
- نهادها و سازمان‌های فعال در حوزه‌های هوانوردی بیش‌ازپیش به شاخص‌های مرتبط با ارگونومی و علم بیومکانیک و آنتروپومتریک توجه نمایند.
- پیشنهاد می‌شود در سازمان‌های مرتبط با هوانوردی کارگروه‌هایی جهت استفاده از شاخص‌های آنتروپومتریک در حوزه‌های مختلف تشکیل گردد.
- در اسرع وقت اقدامات موردنیاز به‌منظور تخصیص خلبانان به هواپیماها با در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپومتریک در سطوح مختلف اجرائی و پژوهشی برنامه‌ریزی شود.

## پیشنهادات پژوهشی

با توجه به نتایج ارائه‌شده این پژوهش از سویی و محدودیت‌های آن از دیگر سو، پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران آتی به مطالعات زیر بپردازند:

- تعیین استاندارد و شاخص‌های آنتروپومتریک مؤثر در فعالیت خلبانان برای انواع مختلف هواپیماهای داخلی
- استفاده عملی از الگوی ارائه‌شده در این پژوهش و ارائه نتایج برای انواع مختلف هواپیماها
- استفاده از شاخص‌ها و علم ارگونومی و آنتروپومتریک در طراحی محیط‌های کاری مرتبط با خلبانی و تعمیر و نگهداری هواپیما و سایر حوزه‌های مرتبط با هوانوردی
- وزن دهی به شاخص‌ها و امکان‌سنجی استفاده از سایر روش‌ها و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه برحسب مورد در مسئله تعیین اولویت خلبانان: ازآنجاکه ممکن است وزن معیارها برای یک مرکز خاص آموزش هوانوردی متفاوت باشد و چنانکه پیش‌تر عنوان شد، در این پژوهش به دلیل محدودیت‌ها و شرایط حاکم بر مسئله از روش آنتروپی شانون برای وزن دهی استفاده‌شده است، لذا پژوهشگران آتی و محیط‌های عملیاتی استفاده‌کننده از رویکرد و مدل این پژوهش، می‌توانند با بهره‌گیری از سایر روش‌های وزن دهی (مثلاً وزن دهی بر اساس نظرات تعدادی از خبرگان) به تعیین وزن معیارها بپردازند.
- تعریف پروژه‌ای جامع با همکاری متخصصان دانشگاهی و پژوهشگران حوزه طب هوایی در نهاجا و ارائه الگوی جامع برای استفاده در تعیین اولویت خلبانان آ برای انواع مختلف هواپیماها

[1] . Decision Maker

**منابع و مراجع**

[1]. F. Izzuddin Romli, A. Nabilla Asmadi, N. Dasuki “Ergonomics Study of Vertical Seat Design for Standing Cabin Concept in Commercial Transport Aircraft” International Review of Aerospace Engineering 8(3):17-22 · June 2015

[2]. F. Izzuddin Romli, N. Ozve Aminian” Ergonomic Analysis of Aircraft Passenger Seat: A Malaysian Case Study” International Journal of Pure and Applied Mathematics 119(15):3749-3754 · January 2018

[3]. N. Ozve Aminian, F. Izzuddin Roml”Ergonomics assessment of current aircraft passenger seat design against Malaysian anthropometry data” International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.13) (2018) 18-21

[4]. Ionuţ, C. Î. M. P. I. A. N. (2011). Ergonomic design of aircraft cockpit. Journal of Industrial Design and Engineering Graphics, 6(1), 25-28.

[5]. Jens Alfredson, Rikard Andersson, “Managing Human Factors in the Development of Fighter Aircraft”, (www.igi-global.com/chapter/managing-human-factors-developmentfighter/55969)

[۶]. پورقاسمی علی (۱۳۸۰)، مهندسی عوامل انسانی در برنامه‌ریزی تولید، فصلنامه تدبیر، شماره ۱۱۹، ۷۱-۶۸.

[7]. Nolen-Hoeksema, Susan, Fredrickson, Barbara L., Loftus, Geof. (2009). "Atkinson & Hilgard's Introduction to psychology, 15th".

[۸]. امامقلی زاده مینایی, حاج آقازاده, اللهیاری, تیمور, خلخالی و کرامت. (۱۳۹۵). مطالعه ابعاد آنتروپومتری پا در دانشجویان. مجله ارگونومی, ۴(۱), ۲۸-۳۸.

[۹]. مرتضوی محمدرضا, رییسی کامران, هاشمی سیدحامد (۱۳۹۵)، ایجاد یک شاخص عددی جهت اندازه‌گیری میزان بارکاری در شبیه‌ساز وظایف خلبان، فصلنامه ارگونومی، زمستان ۹۵، صص ۲۴ – ۳۱.

[۱۰]. مصطفایی مریم، نصیری پروین، بهزادی محمد حسن. بررسی وضعیت آلودگی صدا در بخش ایمنی زمینی فرودگاه مهرآباد و ارتباط آن باقدرت شنوایی کارکنان. بهداشت و ایمنی کار . ۱۳۹۴; ۵ (۲) :۲۳-۳۴

[11]. ZEHNER, G.F. and J.A. Hudson, Body Size Accommodation in USAF Aircraft, Technical Report AFRL-HE-WP-TR-2002-0118, Crew System Interface Division, Human Effectiveness Directorate, Wright-Patterson AFB, OH, January 2002.

[۱۲]. مرادی مصطفی (۱۳۹۸)، «ارائه و پیاده‌سازی الگوی تعیین نوع هواپیمای خلبانان مبتنی بر فاکتورهای آنتروپومتریک برای کاهش سوانح هوایی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا (سوانح)، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

[۱۳]. اصغرپور، محمد جواد (۱۳۹۷)، تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۴]. مؤمنی، منصور؛ شریفی سلیم علیرضا (۱۳۹۴)، مدل‌ها و نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری چند شاخصه، انتشارات دانشگاه تهران.

[15]. Shannon C E (1948) A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal. 27(379): 623.