بررسی ارگونومیکی برخی از اجزای تراکتورهای متداول وجدید در ایران

محمدعلی رستمی، ارژنگ جوادی، محمد شاکر، عباس مهدی نیا و محسن حیدری سلطان آبادی
به ترتیب عضو هیئت علمی بخش تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی کرمان
و دانشجوی دکتری دانشگاه شیراز و اعضای هیئت علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی فارس، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان و مرکز تحقیقات کشاورزی اصفهان
marostamy@yahoo.com

چکیده:

در طول سال ها، مدل های مختلف تراکتور و ماشین های کشاورزی از کشورهای خارجی وارد شده یا در کشور مونتاژ شده اند. سازگاری تولیدات خارجی با ویژگی های بومی و بهبود بخشیدن تراکتورهای ساخت داخل از نظر تناسب ابعاد ، اندازه ها ومحل قرار گیری برخی از مهمترین اجزای آن ها با ابعاد واندازه ها، توانائی ها ومقدورات کاربران ایرانی از جمله مسائل مهمی است که باید مورد بررسی قرار می گرفت. دراین طرح تحقیقاتی تناسب ابعاد و اندازه ها، محل قرار گیری برخی تجهیزات کنترل و فضای کار راننده از جمله مواردی است که با ابعاد، اندازه ها، توانائی ها و مقدورات رانندگان تراکتورها در ۵ استان کشور بررسی شد. داده های تن سنجی نیاز اساسی برای تطبیق تجهیزات ماشین ها با قابلیت ها و مقدورات انسان بود. در این طرح ابتدا داده های تن سنجی مورد نیاز، در پنج استان کشور برای حدود ۲۵۰ نفر از کاربران تراکتورها که در رده سنی ۶۰-۲۰ بودند و به طور تصادفی انتخاب شدند اندازه گیری شد. سپس برخی مشخصات تراکتورها با داده های نظیر تن سنجی صدک های پنجم و نود و پنجم کاربران مقایسه و تطابق هر مورد بررسی گردید. نتایج نشان داد فاصله جاپایی تراکتورهای مطالعه شده از زمین و ارتفاع پلکان های آن ها بیش از حد مطلوب است. به عبارتی سوار شدن بر هیچ یک از تراکتورهای مطالعه شده از نظر راننده و محققین راحت نبوده است. با افزایش تعداد پلکان های تراکتورها و کاهش ارتفاع آن ها می توان وضعیت مطلوب را ایجاد نمود. عمق صندلی تراکتورها ی نیو هلند و والترا برای رانندگان صدک پنجم زیاد بوده ودر نظر گرفتن پشتی مناسب که ضخامت آن قابل تغییر باشد برای رفع مشکل پیشنهاد گردید. بررسی ها نشان داد، عمق صندلی تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ کوتاه تر از طول ران رانندگان صدک نود و پنجم بود، که این از آسایش راننده می کاهد. برای حل این مشکل افزایش ۱۰ سانتی متر به عمق صندلی این دو تراکتور پیشنهاد می شود. ارتفاع پشتی صندلی تراکتورها برای رانندگان صدک نود و پنجم کوتاه بود. در تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و والترا فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی بیشتر از طول دست رانندگان صدک پنجم بود. بنابراین دست رانندگان برای تسلط مطلوب بر فرمان کوتاه ارزیابی گردید. بررسی ها نشان داد رانندگان برای دسترسی به اهرم دنده در تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ دچار مشکل هستند. بنابراین افزایش گستره جابجایی صندلی برای تسلط بهتر رانندگان روی اهرم دنده به میزان ۱۰ – ۵ سانتی متر توصیه می گردد.

واژه‌های کلیدی:

ارگونومی، تن سنجی و تراکتور.

سوابق تحقیق در داخل و خارج از کشور با تاکید بر نتایج آن ها :

مطالعاتی روی تراکتورهای مونتاژ شده در نیجریه برای مشخص کردن تناسب آن ها با کاربر نیجریه ای انجام شد. در این مطالعه پارامترهای دسترسی به تراکتور، طرح صندلی، طراحی فرمان تراکتور، فضای کاری و کنترل تراکتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد به علت کمبود جای پا در تراکتور استیر ۸۰۷۵ ۱، کاربران به سختی سوار تراکتور می شدند. به علاوه کاربران دچار کشیدگی حاصل از اندازه و ضخامت فرمان شده و در هنگام فعال کردن کنترل ها، درد حاصل از حرکات بدن را تجربه می کردند. فقدان محافظت در برابر باران و سایر فاکتورهای محیطی به عنوان یک کمبود اصلی در تراکتورها تشخیص داده شد. برای ارتقای امنیت و راحتی کاربر پیشنهاد شد که جای پا، برای تراکتور استیر و تکیه گاه دست، برای تراکتور فیات، تعبیه شود. اندازه و ضخامت فرمان برای تراکتور استیر کاهش یافته و یک کابین با تهویه خوب و ساختار محافظت کننده از غلتیدن تراکتور برای هر دو تراکتور استیر و فیات پیشنهاد شد (۸).

در یک مطالعه، ارگونومی فرآیند بسته بندی سیب مورد بررسی قرار گرفت، در این مطالعه مشکلات طراحی میز درجه بندی که بر چگونگی کار درجه بندی کارگران تأثیر می گذارد، بررسی شد. نتایج نشان داد که طراحی ارگونومیک می تواند کار دسته بندی را ارتقا بخشد. با طراحی میزهای پهن، کارگران حرکات کششی مکرری را انجام می دادندکه خارج از منطقه کاری خودشان بود (٤).

فاکتورهای انسانی دارای اهمیت بسیار زیاد در توسعه ماشین های کشاورزی می باشند، زیرا این ماشین ها اغلب توسط افرادی با حداقل مهارت و یا حداقل درک از سیستم هدایت می شوند، بنابراین ماشین های کشاورزی باید، برای هدایت کردن، ساده و تا حد ممکن از خطر به دور باشند (٦).

نتایج یک تحقیق که روی برخی بالغین آلمانی زن و مرد انجام شد نشان داد که طراحی و ارزیابی ابزار دستی و کنترل ها، براساس اندازه دست، ضروری بوده و مسافتی که پا و دست در یک حرکت کششی می پیمایند، تا به کنترل دست پیدا کنند، در هدایت وسیله اهمیت دارد. مشاهدات نشان دادند، انسان ها به عنوان منبع قدرت و کنترل کننده عمل می کنند. وسیله ای که آن ها هدایت می کنند باید با اندازه، شکل، قدرت و حواس (مانند بینایی و شنوایی)جمعیت کاربر سازگار باشد. نتایج همچنین نشان داد که راحت ترین حالت برای کاربران درحین بالا رفتن از تراکتور زمانی است که زاویه زانو بین ۱۱۰ تا ۱٦۰ درجه بوده و بهترین وسیله ارزیابی ارگونومیکی ابزار و تجهیزات، دریافت با دقت داده های فردی به وسیله مشاهده و دسته بندی عقاید کاربران است (۵).

نتایج یک تحقیق روی فرمان و فلکه فرمان تراکتور نشان داد موقعیت فلکه فرمان نسبت به راننده تراکتور، روی نیروی فرمان دادن، سرعت فرمان دادن، انرژی مورد نیاز برای فرمان دادن و راحتی کاربر تاثیر دارد. اگر فلکه

1- Steyr 8075

فرمان زیاد از دسترس راننده دور نباشد زاویه زانو حدود ۹۰ درجه می باشد، دراین حالت فلکه فرمان باید زاویه ای بین ۳۰ تا ٤٥ درجه با سطح افق داشته باشد (٦).

برای طراحی ارگونومیکی ماشین های کشاورزی از مقادیر کرانه ها یا متوسط داده های تن سنجی۱ و معمولا از صدک های پنجم و نود و پنجم استفاده می شود. دریک طراحی مناسب ۹۰ درصد از جمعیت مطالعه شده در شمارش وارد شده و ده درصد جمعیت از قلم می افتند. خارج از این کرانه ها گستره بزرگی قرار دارد که وارد کردن آن ها در تصمیم گیری اقتصادی نیست. داده های تن سنجی داده ها واطلاعات اندازه بدن انسان می باشند. فیزیک بدنی انسان ها در اندازه، وزن، قدرت، شکل و توانائی دیدن و شنیدن با هم متفاوت می باشند. داده های تن سنجی ممکن است برای کل جمعیت یک کشور یا گروه خاصی اندازه گیری شود. درمقایسه داده های تن سنجی کشاورزان تانزانیا، آمریکا وهند مشخص شد که داده های تن سنجی رانندگان تراکتور یک کشور نمی تواند برای طراحی ماشین های کشاورزی در کشور دیگرمورد استفاده قرار گیرند (۱ و ۳).

در طول سال ها، مدل های مختلف تراکتور و ماشین های کشاورزی از کشورهای خارجی وارد شده یا در کشور مونتاژ شده اند، بنابراین طراحی این تراکتورها و ماشین ها بر اساس ابعاد، اندازه ها، توانائی ها و مقدورات کار بران ایرانی انجام نشده است. سازگاری تولیدات خارجی با ویژگی های بومی و بهبود بخشیدن تراکتورهای ساخت داخل از نظر تناسب ابعاد ، اندازه ها و محل قرار گیری اجزای آن ها، از جمله تجهیزات کنترل، با ابعاد و اندازه ها، توانائی ها و مقدورات کاربران ایرانی، از جمله مسائل مهمی است، که باید مورد بررسی قرار می گرفت. این تناسب در مورد عمومی ترین و کوچک ترین تجهیزات مورد استفاده مانند یک موشواره کامپیوتر، در بدو شروع به طراحی، در حین ساخت و حتی پس از آن در مراحل استفاده مد نظر بوده و دائما مورد ارزیابی قرار می گیرند. لذا لازم بود داده های تن سنجی کاربران تراکتور ها، جهت طراحی و ساخت تراکتورهای جدید و ارزیابی تراکتورهای در حال استفاده اندازه گیری شده و تناسب مشخصات فنی این تراکتورها با داده های تن سنجی کاربران ایرانی بررسی و پیشنهادات اصلاحی ارائه شود. با توجه به این که فعالیت هایی در راستای تولید تراکتور ملی آغاز شده است داده های تن سنجی برای ایجاد تناسب بین تراکتور ملی و توانایی و مقدورات کاربران ایرانی مورد نیازمی باشد.

روش تحقیق:

برای اندازه گیری داده های تن سنجی کاربران تراکتورها و ارزیابی تناسب ارگونومیکی برخی مشخصات تراکتورهای متداول و جدید در ایران سنجش ها یی روی چهار نوع تراکتور و ۲۵۰ فرد به عنوان کاربر، که به صورت تصادفی انتخاب شدند، انجام گردید. افراد یادشده از بین کاربران تراکتورها در ۵ استان کشور در محدوده سنی ٦۰-۲۰ سال (۲) به طور تصادفی انتخاب شدند. سنجش ها در برگیرنده قابلیت دسترسی به تراکتور (تجهیزات تعبیه شده جهت سوار و پیاده شدن از تراکتور)، طرح صندلی، فرمان و فلکه فرمان، فضای کار، اهرم های

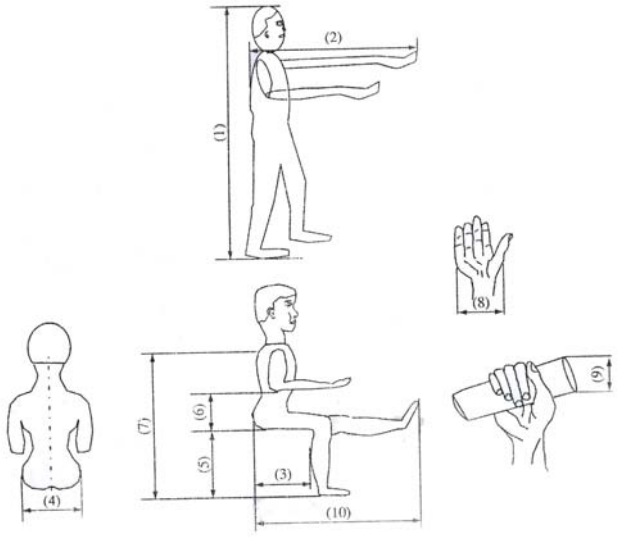
1- Anthropometric Data

کنترل، تجهیزات موجود جهت حفاظت از راننده در برابر باران و درجه حرارت محیط بود. تراکتورهای مطالعه شده مسی فرگوسن ۲۸۵، مسی فرگوسن ۳۹۹، والترا و نیوهلند بودند.

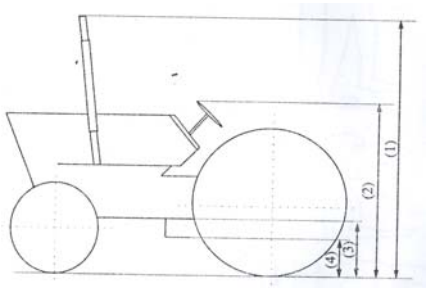
ابتدا داده های تن سنجی ۲۵۰ کاربر تراکتور که در ۵ استان کشور در محدوده سنی ۶۰-۲۰ سال به طور تصادفی انتخاب شدند اندازه گیری گردید. این داده ها شامل طول دست، طول پا، طول ران، ارتفاع ایستاده، عرض نشیمنگاه، ارتفاع نشیمنگاه در حالت نشسته، ارتفاع نشسته، ارتفاع آرنج، عرض دست، قطر حلقه دست و وزن کاربر بود (شکل ۱) (۸).

قابلیت دسترسی به تراکتور:

سوار شدن به تراکتور، اولین برخورد کاربر با تراکتور است. در بررسی تناسب لوازم تدارک دیده شده برای سوار شدن به تراکتور با وضعیت بدنی کاربر پارامترهای، ارتفاع فلکه فرمان از سطح زمین، ارتفاع جا پایی تراکتور از سطح زمین و ارتفاع پلکان، اولین مجموعه سنجش ها هستند (شکل ۲) (۸). برای اندازه گیری پارامترهای یادشده فشار باد لاستیک های تراکتور ها اندازه گیری و براساس پیشنهاد شرکت سازنده یکسان شدند. سپس تراکتور روی یک سطح صاف قرار گرفت. آزمایش هایی با حضورکاربران منتخب که برای سوار شدن به تراکتور از یک خط ترسیم شده مبنا از پلکان تراکتور، تلاش می کردند انجام شد. حالت سوار شدن، پیچ و تاب روی صورت کاربران، واکنشهای عضلانی و عقاید فردی افراد مورد آزمایش درباره مشکلات و راحتی انجام این کار، مورد مشاهده قرار گرفته و ثبت شدند. زاویه زانوی کاربران هنگام گذاشتن پا روی پلکان تراکتور در زمان سوار شدن عامل مهمی در تشخیص شایستگی پلکان تعبیه شده برای تراکتورمی باشد. بنابراین زاویه مذکور برای کاربران مطالعه شده اندازه گیری شد.



شکل ۱: روش اندازه گیری داده های تن سنجی: ۱- ارتفاع ایستاده ۲- طول دست ۳- طول ران ٤- عرض نشیمنگاه ۵- ارتفاع نشیمنگاه در حالت نشسته ٦- ارتفاع آرنج ۷- ارتفاع نشسته ۸- عرض دست ۹- قطر حلقه دست ۱۰- طول پا.



شکل ۲: اندازه گیری ابعاد تراکتور: ۱- ارتفاع ۲- ارتفاع فلکه فرمان ۳- ارتفاع جاپایی ٤- ارتفاع پلکان.

طرح صندلی:

برای بررسی تناسب طرح صندلی با وضعیت بدنی کاربران پارامترهای عرض و عمق تشک، ارتفاع پشتی صندلی و قابلیت تنظیم آن اندازه گیری شدند (شکل ۳). داده های به دست آمده با داده های تن سنجی نظیر، شامل عرض نشیمن گاه، طول ران و ارتفاع پشت کاربر در حالت نشسته مقایسه شدند. مقایسه یاد شده برای مقادیر کرانه صدک های پنجم و نود و پنجم انجام گردید. مقادیر کرانه های یاد شده با فرمول های زیر محاسبه شدند. این کار با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد(۸):

$$C_{\alpha/2} = M - t_{\alpha}\sigma$$
$$C_{(1-\alpha/2)} = M + t_{\alpha}\sigma$$

C = مقادیر صدک M = متوسط داده ها t_{α}= مقدار خوانده شده از جدول توزیع t α = احتمال

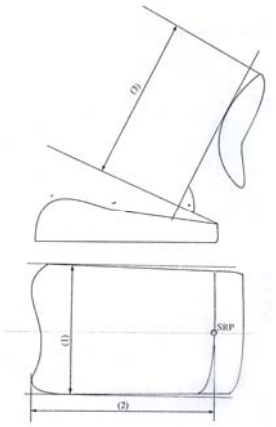
σ= انحراف معیار داده ها

فرمان و فلکه فرمان:

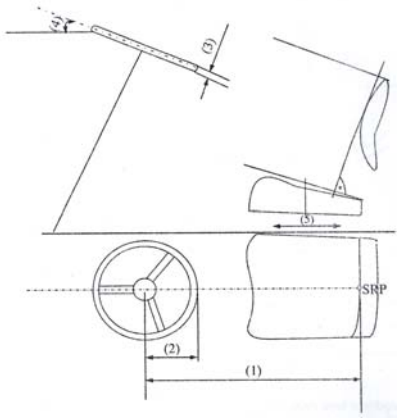
از آنجا که کاربر در تماس دائم با فلکه فرمان می باشد، آزمایشی در مورد تناسب طراحی فلکه فرمان با وضعیت بدنی کاربران انجام شد. بدین منظور فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی[1] (شکل ٤)، محیط فلکه فرمان، ضخامت فلکه فرمان و زاویه آن با سطح افق اندازه گیری شده و سپس آزمایش های عملی انجام شد (۸). برای این کار تراکتورها روشن شده و در وضعیت حرکت تنظیم شدند. هر کاربر به اندازه یک دقیقه تراکتور را هدایت می کرد. آزمایش از نزدیک مشاهده شده و نظر هر کاربر درباره سرعت چرخش فرمان و فشار فرمان روی دست راننده یادداشت می شد. زاویه زانوی کاربران نیز در این وضعیت اندازه گیری می گردید. در انجام آخرین آزمایش میزان قطر حلقه دست در حالت بسته براساس شکل (۱) برای افراد مطالعه شده اندازه گیری شد. مقادیر بهینه فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی و ضخامت فلکه فرمان به ترتیب با طول دست و قطر حلقه دست

1- Seat Reference Point

افراد صدک های پنجم و نود و پنجم مقایسه شده ومطلوبیت پارامترهای یاد شده در تراکتورهای مطالعه شده بررسی شد (۸). تناسب محیط فلکه فرمان براساس نظرات کاربران و مشاهدات بررسی شدند (۷).



شکل ۳: اندازه گیری ابعاد صندلی تراکتور: ۱- عرض تشک صندلی ۲- عمق تشک صندلی ۳- ارتفاع پشتی صندلی.

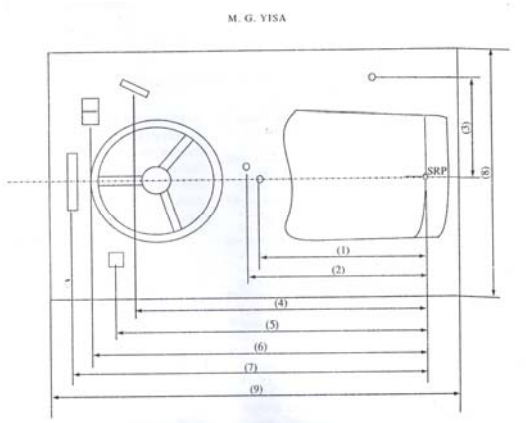


شکل ٤: اندازه گیری ابعاد فرمان: ۱- فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی ۲- شعاع فلکه فرمان ۳- ضخامت فلکه فرمان ٤- زاویه فلکه فرمان با سطح افق ۵- میزان قابلیت تنظیم صندلی.

فضای کار و اهرم های کنترل:

آزمایش هایی برای تعیین محل مناسب اهرم های دستی شامل اهرم های دنده و کنترل هیدرولیک و پدال های کلاچ، گاز و ترمز انجام شد. کاربران منتخب یکی پس از دیگری در تراکتور نشسته و هریک از اهرم های اشاره شده را فعال می کردند. حرکت دست و بدن کاربران در طول کاربرد اهرم های دستی و حرکت پا و بدن در زمان کاربرد پدال ها مورد مشاهده قرار گرفته و ثبت می شدند.

برای بررسی تناسب محل قرار گیری اهرم ها با داده های تن سنجی، فاصله اهرم های دنده وهیدرولیک از نقطه مرجع صندلی اندازه گیری شدند (شکل۵). داده های حاصل با طول دست کاربران صدک های پنجم و نود و پنجم مقایسه شده و مناسب بودن فواصل بررسی گردید.



شکل ۵: اندازه گیری فاصله اهرم ها و پدال ها از نقطه مرجع صندلی: ۱- اهرم دنده ۲- اهرم ترمز دستی ۳- اهرم هیدرولیک ٤- پدال کلاچ ۵- پدال گاز ٦- پدال ترمز ۷- نشانگر جلو ۸- عرض فضای کار ۹- طول فضای کار.

برای بررسی مناسب بودن محل پدال ها حرکت پا و بدن، هنگام کار با پدال ها، بررسی شد. برای بررسی تناسب فضای کار با بدن کاربر طول و عرض فضای کار اندازه گیری شد (۸). به منظور امکان بررسی داده های حاصل از مشاهدات محقق یا نظرات رانندگان، به هر یک از نتایج به دست آمده در هر آزمایش، بر اساس جدول (۱)، نمره داده شد تا بتوان بر اساس متوسط نمره های به دست آمده در هر آزمایش، در خصوص نتایج اظهار نظر نموده و راهکار مناسب را پیشنهاد کرد.

تجهیزات حفاظت از راننده در برابر باران وحرارت محیط:

تماس کاربران با باران، درجه حرارت بالا و پائین و سایر خطرات محیطی بر اساس ساختار تراکتور مورد بررسی قرار گرفت. نظر کاربران نیز گرفته شد. برای این کار متوسط درجه حرارت محیط در مناطق مطالعه شده و متوسط بارش برای ارائه پیشنهاد در خصوص بهینه سازی یا طراحی جایگاه راننده مبنای تصمیم بود.

نتایج و بحث:

داده های تن سنجی کاربران تراکتورهای متداول و جدید در استان های مطالعه شده و متوسط داده های تن سنجی رانندگان صدک پنجم و نود و پنجم شامل طول دست، طول پا، طول ران، ارتفاع ایستاده، عرض نشیمنگاه، ارتفاع نشیمنگاه در حالت نشسته، ارتفاع نشسته، ارتفاع آرنج، عرض دست، قطر حلقه دست و وزن کاربر در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۱- نمره در نظر گرفته شده برای نتایج آزمایش های عملی.

راحت	۲

حالت سوارشدن	متوسط	۱
	مشکل	۰
پیچ وتاب روی صورت	بدون پیچ وتاب	۳
	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
واکنش عضلانی	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
عقیده فردی	راحت	۲
	متوسط	۱
	مشکل	۰
سرعت چرخش فرمان	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
فشارفرمان روی دست	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
حرکت دست وبدن هنگام استفاده از اهرم دنده	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
حرکت دست وبدن هنگام استفاده از اهرم هیدرولیک	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
حرکت پاوبدن هنگام استفاده از پدال کلاچ	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
حرکت پا وبدن هنگام استفاده از پدال گاز	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰
حرکت پا وبدن هنگام استفاده از پدال ترمز	کم	۲
	متوسط	۱
	زیاد	۰

جدول ۲- داده های تن سنجی رانندگان تراکتور به تفکیک مناطق مطالعه شده.

ردیف	استان	اصفهان	خراسان	فارس	کرج	کرمان	متوسط
۱	طول دست	۸۱/۷۱	۷۹/۹۱	۸٦/۳٦	۷٤/۷۷	٦۹/۱۱	۷۸/۳۷
۲	طول پا	۱۰۳/۱	۱۱٥/۸۸	۱۱۰/٦٤	۹۷/۲۹	۹٥/۱٤	۱۰٤/٤۱
۳	طول ران	٤٥/٦۲	٤۷/٦۳	٤٥/۷۲	٤٥/۱۸	٥۰	٤٦/۸۳
٤	ارتفاع ایستاده	۱۷٥	۱۷۱/٦٤	۱۷۱/٥۱	۱۷۱/۸۱	۱٦۸/۷۰	۱۷۱/۷۳
٥	عرض نشیمنگاه	۳٤/۳۱	۳٤/٦٦	۳٥/٦۱	٤۱/۹۲	۳۰/۹٦	۳٥/٤۹
٦	ارتفاع نشیمنگاه	٤۲/٤۳	۳۸/۸٦	٤۷/۸۹	٥۱	٥۰/۲۹	٤٦/۰۹
۷	ارتفاع نشسته	۱۰٥/۷۳	۱۰۳/٥۲	۱۰٤/۱۷	۹۸/۷٤	۹۳/۲۲	۱۰۱/۰۷
۸	ارتفاع آرنج	۲٤/٥٤	۲۹/۱۷	۲۱/۸۸	۲۳/۸٥	۲۱/۰۹	۲٤/۱۳
۹	عرض دست	۱۰/۹۸	۱۰/۷٦	۱۲/۲۳	۱۱/۳۳	۱۰/۳۳	۱۱/۱۲
۱۰	قطر حلقه دست	٤/۰۷	۳/۲۸	۳/۳۸	--	۳/۳	۳/٥
۱۱	وزن کاربر	۷۲/٤۳	٦۹/٥۱	۷٤/۲۳	۷۷/۲۳	٦۹/۱٤	۷۲/٥۱

جدول ۳- متوسط داده های تن سنجی رانندگان صدک پنجم و نود و پنجم در مناطق مطالعه شده.

ردیف	پارامتر	متوسط	انحراف معیار	صدک پنجم	صدک نودو پنجم
۱	طول دست	۷۸/۳۷	۷/۱۱	۷۳/٥۸	۸۳/۱٦
۲	طول پا	۱۰٤/٤۱	۹/۸۹	۹۷/۷٤	۱۱۱/۰۷
۳	طول ران	٤٦/۸۳	٤/٥٥	٤۳/۷٦	٤۹/۹۰
٤	ارتفاع ایستاده	۱۷۱/۷۳	۱۰/۲۲	۱٦٤/۸٤	۱۷۸/٦۲
٥	عرض نشیمنگاه	۳٥/٤۹	٤/٦۳	۳۲/۳۷	۳۸/٦۱
٦	ارتفاع نشیمنگاه	٤٦/۰۹	٥/۹۱	٤۲/۱۱	٥۰/۰۷
۷	ارتفاع نشسته	۱۰۱/۰۷	٦/۷۷	۹٦/٥۱	۱۰٥/٦٤
۸	ارتفاع آرنج	۲٤/۱۳	٤/۱۳	۲۱/۳۲	۲٦/۸۹
۹	عرض دست	۱۱/۱۲	۰/۹۸	۱۰/٤٦	۱۱/۷۸
۱۰	قطر حلقه دست	۳/٥	۰/٥۰	۳/۱۷	۳/۸٤
۱۱	وزن کاربر	۷۲/٥۱	۱۰/٤۹	٦٥/٤۳	۷۹/٥۸

جداول ٤ تا ٧ نتایج داده های قابلیت دسترسی، طرح صندلی، فرمان و فلکه فرمان، اهرم های کنترل و فضای کار چهار نوع تراکتور مطالعه شده را نشان می دهند.

جدول ٤– داده های قابلیت دسترسی چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
ارتفاع فلکه فرمان از زمین	۱۵۵	۱٦۸	۲۰۳	۲۰۹
ارتفاع جا پایی پلکان از زمین	٤۰	۱۵	۵۰	۵۷
ارتفاع پلکان	۳۵	٤۸	۳۵	۲۰

با توجه به نتایج جدول ٤ قابلیت دسترسی به تراکتور یا قابلیت سوار شدن به تراکتور در هر ٤ تراکتور مطالعه شده ضعیف ارزیابی می گردد، زیرا فاصله جاپایی تراکتور از زمین و ارتفاع پلکان های تراکتورها بیش از حد پیشنهادی گوپتا (۱۹۸۳) یعنی ١٤/٥ سانتی متر است بنابراین با افزایش تعداد پلکان های تراکتورها و کاهش ارتفاع آن ها می توان وضعیت مطلوب را ایجاد نمود. این مشکل همچنین با توجه به نتایج جداول ۸، ۱۲، ١٦و ۲۰ که در آن ها حالت سوار شدن راننده تراکتور، پیچ وتاب روی صورت او، واکنش های عضلانی و عقیده او در خصوص سوار شدن بر تراکتور آمده، قابل مشاهده می باشد، زیرا نمرات داده شده به هر چهار پارامتر مطالعه شده بین حالت مشکل و متوسط بوده است. به عبارتی سوار شدن بر هیچ یک از تراکتورهای مطالعه شده از نظر راننده و محققین راحت نبوده است. با توجه به نتایج جداول یاد شده زاویه زانوی رانندگان هنگام سوار شدن بر تراکتور بین ۸۷ تا ١٢٦ درجه گزارش شده که در گستره پیشنهادی اسمیت (١٩٩٤) یعنی زاویه ١٦۰ – ۱۱۰ درجه نیست.

جدول ۵ – داده های طرح صندلی چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
عرض تشک صندلی	٤۰	۵۰	۵۰	۵۰
عمق تشک صندلی	٤۰	۳۵	٤٤	٤۵
ارتفاع پشتی صندلی	٤۰	۳۵	٤۲	۵۰
میزان قابلیت تنظیم صندلی	۱۵	۱۵	۱۵	۲۰

با توجه به نتایج جدول ۵، عرض تشک صندلی تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵، برابر ٤٠ سانتی متر و عرض تشک صندلی سایر تراکتورها ۵۰ سانتی متر است. در مقایسه اندازه های یاد شده با عرض نشیمنگاه رانندگان صدک پنجم و نود و پنجم که به ترتیب ۳۲/۳۷ و ۳۸/٦۱ سانتی مترمی باشد (جدول ۳) در می یابیم که عرض تشک صندلی برای رانندگان مطالعه شده مناسب است، زیرا عرض تشک صندلی هر چهار تراکتور بین ۵ تا ۱۵ سانتی متر بیش از عرض نشیمنگاه رانندگان صدک های یاد شده می باشد.

نتایج جدول ۵ نشان می دهند، عمق تشک صندلی تراکتورها بین ۳۵ تا ٤۵ سانتی متر بوده است که در مقایسه آن ها با طول ران رانندگان صدک های پنجم و نود و پنجم که در جدول ۳ به ترتیب ٤۳/۷٦ و ٤۹/۹ سانتی متر گزارش شده در می یابیم که عمق صندلی تراکتورها ی نیو هلند و والترا برای صدک پنجم زیاد است. زیرا طول ران رانندگان این صدک کمتر از عمق صندلی تراکتور های نیو هلند و والترا می باشد. به همین خاطر رانندگان از یک بالش، به عنوان تکیه گاه، در پشت خود، روی صندلی استفاده می کنند. در نظر گرفتن پشتی مناسب که ضخامت آن قابل تغییر باشد برای رفع مشکل پیشنهاد می گردد. عمق صندلی تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ حدود ۱۵ سانتی متر کوتاه تر از طول ران رانندگان صدک نود و پنجم می باشد. این موضوع از آسایش راننده می کاهد، بنابراین افزایش ۱۰ سانتی متر به عمق صندلی این دو تراکتور، تناسب عمق صندلی با طول ران رانندگان صدک نود و پنجم را بیشتر فراهم می سازد. این پیشنهاد با مد نظر قرار دادن تشک پیشنهاد شده برای صندلی، مطلوبیت را برای رانندگان صدک پنجم نیز در پی خواهد داشت.

با توجه به نتایج جدول ۵، ارتفاع پشتی صندلی تراکتورها ی مسی فرگوسن ۲۸۵، ۳۹۹، والترا و نیو هلند به ترتیب ٤۰، ۳۵، ٤۲ و ۵۰ سانتی متر بوده است. ارتفاع پشت رانندگان صدک پنجم در حالت نشسته ۵۹/۰۲ سانتی متر بوده است (جدول ۳) که در مقایسه با ارتفاع پشتی صندلی تراکتورها مطلوب می باشد. اما این ارتفاع برای رانندگان صدک نود و پنجم که ارتفاع پشت آن ها ٦۵/۸۵ سانتی مترمی باشد کوتاه است.

جدول ٦ – داده های فرمان و فلکه فرمان چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی (سانتی متر)	۷۷–۹۲	۷۰–۸۵	۷۵–۹۰	۷۲–۹۲
محیط فلکه فرمان (سانتی متر)	۱۳٦	۱۲۰	۱۱۰	۱۲۳
ضخامت فلکه فرمان (میلی متر)	۸	۸	۱۰	۸
زاویه فلکه فرمان با سطح افق	۱۵	۱۰	۰–٤۵	۱۰–۳۵
قطر فلکه فرمان (سانتی متر)	٤۳	۳۸	۳۵	۳۹

براساس نتایج جدول ٦ و ٣ فاصله فلکه فرمان در تراکتورهای مسی فرگوسن ۳۹۹ و نیوهلند از نقطه مرجع صندلی به ترتیب ۸۵ – ۷۰ و ۹۲ – ۷۲ سانتی متر بوده است. کمترین فاصله مربوط به حالتی است که صندلی کاملا جلو کشیده شده و بیشترین آن مربوط به زمانی است که صندلی تا آخر به عقب کشیده شده است. طول دست رانندگان صدک پنجم و نود و پنجم به ترتیب ۷۳/۵۸ و ۱٦/ ۸۳ گزارش شده است. مقایسه این داده ها نشان می دهد طول دست کلیه کاربران در گستره فاصله فلکه فرمان این دو تراکتور از نقطه مرجع صندلی می باشد. بنابراین قابلیت تنظیم لازم برای تسلط دست رانندگان روی فرمان وجود دارد. در تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و والترا فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی به ترتیب ۹۲ – ۷۷ و ۹۰ – ۷۵ سانتی متر بوده است. مقایسه طول دست رانندگان صدک پنجم (۷۳/۵۸ سانتی متر) با کمترین فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی دراین دو تراکتورنشان می دهد، فاصله یاد شده بیشتر از طول دست رانندگان در صدک پنجم است. بنابراین دست رانندگان برای تسلط مطلوب بر فرمان کوتاه است. مشاهدات نشان دادند رانندگان برای تسلط بهتر، یک بالش در پشت خود می گذارند و بدین ترتیب خود را اندکی جلو می کشند. در صورت اصلاح گستره جلو و عقب شدن صندلی این تراکتورها، نقص یاد شده برطرف می شود. این کار با افزایش گستره یاد شده به میزان ۵ تا ۱۰ سانتی متر، به طرف جلو، بهبود می یابد. رانندگان صدک نود و پنجم با طول دست ۱٦/ ۸۳ سانتیمتر برای دسترسی به فرمان این دو تراکتور مشکلی ندارند.

نتایج جدول ٦ در باره ضخامت فلکه فرمان، که در گستره ۸ تا ۱۰ میلی متر بوده است، نشان می دهد با توجه به قطر حلقه دست کاربران صدک های پنجم و نود و پنجم که به ترتیب ۳/۱۷ و ۳/۸٤ سانتی متر گزارش شده مشکلی برای گرفتن فلکه فرمان توسط دست رانندگان وجود ندارد.

جدول ۷ – داده های اهرم های کنترل و فضای کار چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
کمترین و بیشترین فاصله اهرم دنده از نقطه مرجع صندلی(سانتی متر)	۷۰–۸۵	۷۸–۹۲	٦۰–۷۲	۵۷–۷۱
کمترین و بیشترین فاصله اهرم هیدرولیک از نقطه مرجع صندلی (سانتی متر)	۷۵–۹۰	٤۲–۵٤	۵۰–٦۲	۵٤–۷۳
عرض فضای کار (سانتی متر)	۸۲	۹۰	۱٤۰	۱۵۰
طول فضای کار (سانتی متر)	۷۰	۱۵۰	۱٦۰	۱۵۵

با توجه به نتایج جداول ۷ و ۳ و مقایسه فاصله اهرم دنده از نقطه مرجع صندلی با طول دست رانندگان صدک پنجم (۷۳/۵۸ سانتی متر) مشاهده می شود که این رانندگان برای دسترسی به اهرم دنده درتراکتورمسی فرگوسن ۳۹۹ دچار مشکل هستند. زیرا کمترین فاصله اهرم دنده از نقطه مرجع صندلی، یعنی هنگامی که صندلی

کاملا جلو کشیده شده است ۷۸ سانتی متر می باشد. با توجه به اینکه طـول دسـت رانـدگان صـدک پـنجم ۷۳/۵۸ سانتی متر است، رانندگان بایدبرای رسیدن به اهرم دنده خم شده یا خود راروی صندلی جلـو بکشـند. ایـن کـار بـا گذاشتن بالش در پشت رانندگان انجام می شود. باید توجه داشت که وقتی رانندگان خـود را روی صـندلی جلـومی کشند، قسمت کوتاه تری از ران آن ها روی صندلی قرار می گیرد، که این خود باعث افزایش فشار وزن روی ران آن ها شده و باعث خستگی راننده می شود. همان گونه که مشاهده شد رانندگان صدک پنجم تراکتـور مسـی فرگوسـن ۳۹۹ برای دسترسی به فرمان نیز این مشکل راداشتند. بنابراین افزایش گسـتره جابجـایی صـندلی بـرای تسـلط بهتـر رانندگان روی اهرم دنده نیز به میزان ۱۰ – ۵ سانتی متر توصیه می گردد. با توجه به نتایج، رانندگان صدک پنجم در سه تراکتور دیگر و رانندگان صدک نود و پنجم در همه تراکتورهای مطالعه شده با تنظیم مناسب محـل قـرار گیـری صندلی، مشکلی برای دسترسی به اهرم دنده ندارند.

براساس نتایج ثبت شده در جداول ۷ و ۳ کمترین فاصله اهرم هیدرولیک تراکتـور مسـی فرگوسـن ۲۸۵ از نقطه مرجع صندلی ۷۵ سانتی متر است. در مقایسه این فاصله با طول دست رانندگان صدک پنجم مشاهده می شـود که این فاصله زیاد می باشد. فاصله یاد شده در تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹، والترا و نیوهلندبه ترتیـب ٤۲، ۵۰ و ٥٤ سانتی متر است. بنابراین رانندگان صدک پنجم با طول دست ۷۳/۵۸ سانتی متر بـه راحتـی بـه آن دسترسـی دارنـد. رانندگان صدک نود وپنجم با طول دست ۸۳/۱٦ سانتی متر به راحتی به اهرم هیدرولیک، در همه تراکتورهای مطالعه شده، دسترسی دارند. زیرا طول دست این رانندگان بیش ازفاصله اهرم هیدرولیک تا نقطه مرجع صندلی است.

زاویه آرنج رانندگان هنگام کار با اهرم هیدرولیک در تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ زیاد بـوده (١٦٥ درجـه) و نشان دهنده فاصله زیاد این اهرم از نقطه مرجع صندلی می باشد. در سه تراکتـور دیگـر زاویـه آرنـج کمتـر، بیـانگر دسترسی مناسب رانندگان به اهرم هیدرولیک می باشد.

باتوجه به نتایج جدول ۷ عرض فضای کار برای تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹(به ترتیب ۸۲ و ۹۰ سانتی متر) و همچنین طول فضای کار برای تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ (۷۰ سانتی متر) کافی نیست اما طول وعرض فضای کار در تراکتورهای نیوهلند و والترا کافی می باشد.

متوسط نتایج آزمایش های عملی پارامترهای مختلف به تفکیک چهار نوع تراکتور مطالعه شده در جداول ۸ تا ۱۱ آمده است.

جدول ۸- متوسط نتایج آزمایش های عملی پارامترهای قابلیت سوار شدن بر تراکتور، به تفکیک چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
حالت سوار شدن	۱/٦	۱/٦۳	۱/۹۲	۱/۷
پیچ و تاب روی صورت	۱/٤٤	۱/۷۸	۲/۱۲	۲/۰۱
واکنش های عضلانی	۱/۱٦	۱/٤۸	۱/۵۱	۱/٤۷

عقید ه فردی	۱/۵	۱/٦۹	۱/۹۵	۱/۹
زاویه زانوی کاربر هنگام سوار شدن بر تراکتور	۹۷/۱۱	۹۰/۰۹	۸٦/۵۳	۸۷/۰۷

جدول ۹- نتایج آزمایش های عملی پارامترهای فرمان تراکتور، به تفکیک چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
سرعت چرخش فرمان	۱/۲۱	۰/۲	۰/۲٤	۰/۲۵
فشار فرمان روی دست	۱/۲٦	۱/۷	۱/۹۳	۱/۹٤

بر اساس نتایج جدول ۹ سرعت چرخش فرمان در تراکتورهای مسی فرگوسن ۳۹۹، والترا و نیوهلند بین حالت زیاد و متوسط بوده که نشان می دهد سرعت چرخش فرمان این تراکتورها مطلوب است. سرعت چرخش فرمان تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ بین حالت متوسط تا کم است. نتایج این جدول همچنین نشان می دهد که فشار فرمان تراکتورها ی مطالعه شده روی دست رانندگان، بین حالت متوسط تا کم است. دراین بین تراکتور مسی فرگوسن با کسب نمره ۱/۲٦، فشارمتوسط را بر دست رانندگان وارد می کند، که این نتیجه با نتیجه به دست آمده برای سرعت چرخش فرمان تراکتورمسی فرگوسن ۲۸۵ هم راستا می باشد. فرمان سایر تراکتورها با کسب نمره بالای ۱/۷ که نزدیک به حالت مطلوب (نمره ۲ برای حالت فشار کم) است فشار کمی بر دست رانندگان وارد نموده و همان گونه که مشاهده شد، سرعت چرخش فرمان این تراکتورها با این نتیجه همراستا می باشد.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش های عملی پارامترهای اهرم های کنترل تراکتور، به تفکیک چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
حرکت دست وبدن هنگام کار با اهرم دنده	۱/۲۲	۱/۰۸	۱/۵۱	۱/۸
حرکت دست وبدن هنگام کار با اهرم هیدرولیک	۱/۳۲	۱/۲۲	۱/۸۷	۱/۸۷
زاویه آرنج هنگام کار با اهرم دنده	۱۵۸/۱۹	۱٦۷/۱٦	۱۱۰/۳۱	۱۲۰/٦٤
زاویه آرنج هنگام کار با اهرم هیدرولیک	۱٦۵/۰۱	۱۳۹/۲٤	۱۰۹/۷٤	۱۱٦/۹۳

جدول ۱۱- نتایج آزمایش های عملی پارامترهای پدال های تراکتور، به تفکیک چهار نوع تراکتور مطالعه شده.

تراکتور	مسی فرگوسن ۲۸۵	مسی فرگوسن ۳۹۹	والترا	نیوهلند
حرکت پا و بدن هنگام کار با پدال کلاچ	۱/۲	۰/۹۲	۱/٤٤	۱/۷۳
حرکت پا و بدن هنگام کار با پدال گاز	۱/۲۸	۰/۹٦	۱/۸	۱/۷
حرکت پا و بدن هنگام کار با پدال ترمز	۱/۰۱	۰/۹۲	۱/٤٥	۱/٦۹
زاویه زانو هنگام کار با پدال کلاچ	۱۱۹/۳۸	۱٤٤/٦	۱۲۷/۹۱	۱۲٥/۳۳
زاویه زانو هنگام کار با پدال گاز	۱۳۷/۳٤	۱۱۲/۸۱	۱۱۷/۱۲	۱۱٤/٦٤
زاویه زانو هنگام کار با پدال ترمز	۱۰۷/۱	۱۲٦/٤۳	۱۳۰/۰٦	۱۱۲/۲۲

نتایج جدول ۱۱ نشان می دهد، حرکت پا و بدن هنگام کار با پدال های کلاچ، گاز و ترمز درتراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ متوسط و در تراکتورهای والترا و نیوهلند کم بوده است. این نتایج نشان می دهند، فاصله پدال ها در تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ زیادتر از حالت مطلوب ودر تراکتورهای والترا و نیوهلند مناسب است. زاویه زانو هنگام کار با پدال های کلاچ، گاز و ترمز در گستره مناسبی از ۱۰۷ تا ۱٤٤ درجه قرار داشته اند.

تجهیزات حفاظت از راننده در برابر باران و حرارت محیط:

تراکتورهای نیوهلند و والترا با دارا بودن اطاقک راننده که دارای تجهیزات گرمایش و سرمایش می باشند فضای مطلوبی برای عملکرد راننده دارند. این اطاقک ها ضمن حفاظت از راننده در برابر گرما، سرما، گرد و خاک، باران، برف، باد و نور آفتاب، صدای تراکتور را نیز کاهش می دهند. این اطاقک ها در هنگام بروز خطر، مانند واژگونی تراکتور، از راننده حفاظت می کنند. تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ فاقد اطاقک راننده و بیشتر آن ها حتی

فاقد تجهیزات جلوگیری از غلتیدن تراکتور هنگام واژگونی می باشند. تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ فاقد اطاقک راننده بوده ولی تجهیزات جلوگیری از غلتیدن تراکتور هنگام واژگونی[1] را دارا می باشد.

خلاصه نتایج و پیشنهادات:

۱- فاصله جاپایی تراکتورهای مطالعه شده از زمین و ارتفاع پلکان های آن ها بیش از حد مطلوب است. به عبارتی سوار شدن بر هیچ یک از تراکتورهای مطالعه شده از نظر راننده و محققین راحت نبوده است. با افزایش تعداد پلکان های تراکتورها و کاهش ارتفاع آن ها می توان وضعیت مطلوب را ایجاد نمود.

۲- عمق صندلی تراکتورها ی نیو هلند و والترا برای رانندگان صدک پنجم زیاد است. در نظر گرفتن پشتی مناسب که ضخامت آن قابل تغییر باشد برای رفع مشکل پیشنهاد می گردد. عمق صندلی تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ کوتاه تر از طول ران رانندگان صدک نود و پنجم می باشد. که موجب کاهش آسایش راننده می شود. بنابراین افزایش ۱۰ سانتی متر به عمق صندلی این دو تراکتور افزوده شود.

۳- در تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و والترا فاصله فلکه فرمان از نقطه مرجع صندلی بیشتر از طول دست رانندگان صدک پنجم است. بنابراین دست رانندگان برای تسلط مطلوب بر فرمان کوتاه است. با افزایش گستره جلو وعقب شدن صندلی تراکتور های یاد شده به میزان ۵ تا ۱۰ سانتی متر، به طرف جلومشکل برطرف می شود.

٤- رانندگان برای دسترسی به اهرم دنده درتراکتورمسی فرگوسن ۳۹۹ دچار مشکل هستند. افزایش گستره جابجایی صندلی برای تسلط بهتر رانندگان روی اهرم دنده نیز به میزان ۱۰ – ۵ سانتی متر توصیه می گردد.

۵- فاصله اهرم هیدرولیک تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ از نقطه مرجع صندلی، برای رانندگان صدک پنجم زیاد می باشد.

٦- فاصله پدال ها در تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ زیادتر از حالت مطلوب ودر تراکتورهای والترا و نیوهلند مناسب است

۷- عرض فضای کار برای تراکتورهای مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ و همچنین طول فضای کار برای تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ کافی نیست.

۸- تراکتورهای نیوهلند و والترا دارای اطاقک راننده و تجهیزات گرمایش و سرمایش و تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ فاقد آن می باشند. برای افزایش آسایش و ایمنی رانندگان افزودن اطاقک به تراکتورهای یاد شده پیشنهاد می شود.

منابع مورد استفاده :

1. Gupta, P. K., Gupta, M. L. and Sharm, A. P. 1983. Anthropometric survey of Indian farm workers. Journal of AMA, Vol. 14, No. 1, pp 27 – 30.

2. Sanders, S. M. and McCormic, E. J. 1987. Human Factors in Engineering and Design. McGraw-hill Book Company.

1- Roll Over Protection Structures (**ROPS**)

3. Mganilwa, Z. M., Mpanduji, S. M., Makungu, P. J. and Dihenga, H. O. 2003. Promoting local production of small multipurpose tractors in Tanzania. International conference on industrial design engineering, UDSM, DAR ES SALAAM, JULY 17 – 18, 2003.

4. Studman, C. 1998. Ergonomic in apple sorting. A pilot study. Journal of agricultural engineering research, 70, 323 – 334.

5. Smith, D. W., Sims, B. G., and Neil., D. H. O. 1994. Testing and evaluation of agricultural machinery and equipment. Principle and practices. FAO Agricultural Services Bulletin 110. Rome, pp 67 – 89.

6. Woodson, W. E. and Berry, T. P. 1992. Human Factors Design Handbook. McGraw – Hill Book Company.

7. Yadav, R. and tewari, V. K. 1998. Tractor operator Workplace design – a review. Jurnal of Terramechanics, 35(1), 41 – 53.

8. Yisa, M. G. 2002. Ergonomic of tractor assembled in Nigeria. Biosystems Engineering, 81(2), 169-177.