

بررسی ارگونومیکی ارتعاش یک نوع روتوتیلر با تیغه‌های جدید

حسین غلامی^۱ - داود کلاتری^{۲*} - مجید رجیبی وندچالی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷

چکیده

یکی از مهم‌ترین بحث‌ها در مکانیزاسیون کشاورزی مسئله سلامتی انسان هنگام کار با ماشین است که امروزه به یک موضوع برجسته در علم ارگونومی تبدیل شده است. ارتعاش منتقل شده از دسته‌ی روتوتیلر به دست، بازو و بدن راننده ممکن است در طولانی مدت منجر به بروز صدمات زیادی از جمله ناراحتی‌های عصبی، درد و اختلالات اسکلتی و عضلانی شود. از این رو در پژوهش حاضر پارامترهای ارتعاشی یک نوع روتوتیلر جدید مجهز به تیغه‌های لبه مضرسی به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری در سه سطح سرعت دورانی تیغه‌ها (۱۷۰-۱۴۰، ۲۰۰-۱۷۰ و ۲۳۰-۲۰۰ دور بر دقیقه) و دو وضعیت کاری (درجا و در حال خاک‌ورزی) انجام شد. نتایج نشان داد که اثر وضعیت کاری و سرعت دورانی تیغه‌ها بر جذر میانگین مربعات شتاب کل (RMS) و مؤلفه‌های شتاب در جهت‌های x ، y و z معنی‌دار بود ($P < 0/01$). با افزایش سرعت دورانی تیغه‌ها از سرعت کم (۱۵۵ rpm) به سرعت زیاد (۲۱۵ rpm)، RMS شتاب کل به مقدار $12/9 \text{ ms}^{-2}$ افزایش یافت. حداقل سهم موتور مورد استفاده در ایجاد ارتعاش دستگاه در دور ۱۵۵ rpm محور دوار، $65/53\%$ و حداکثر آن در دور ۲۱۵ rpm برابر با $73/92\%$ به دست آمد. بالا بودن سهم موتور در ارتعاش نشان‌دهنده اهمیت انتخاب دور مناسب و موتور احتراقی با کیفیت بالاتر جهت کاهش ارتعاش کل دستگاه می‌باشد. بیش‌ترین زمان مجاز مواجهه با ارتعاش در حالت خاک‌ورزی مداوم که کم‌تر از ۲ ساعت است، در سرعت دورانی ۱۴۰-۱۷۰ rpm به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، ارگونومی، دست و بازو، روتوتیلر، زمان مجاز مواجهه

مقدمه

داشته و کار طولانی مدت با آن‌ها باعث بروز اختلالات حرکتی و آسیب رسیدن به اعضای مختلف بدن می‌شود (Marsili et al., 2002). روتوتیلر از جمله ادواتی است که از طریق مواجهه‌ی کشاورز با ارتعاش دست و بازو منجر به بروز آسیب‌های فراوانی به این قشر از افراد می‌شود. اپراتور این دستگاه‌ها در حین کار مداوم و طولانی مدت با آن‌ها ممکن است در معرض مواجهه با ارتعاشات بیش از حد قرار بگیرند. احساس ارتعاش شدید در دست به هنگام چنگش دستگیره، یکی از نقاط ضعف قابل توجه در هنگام کار با این دستگاه‌ها می‌باشد (Tewari and Dewangan, 2009). کار سخت مزرعه، تنظیم ادوات و درگیری با منابع مختلف ارتعاش باعث شده که کشاورزان به‌عنوان جمعیت در معرض مواجهه با اختلالات اسکلتی-عضلانی شناخته شوند (Boshuizen et al., 1990). در حال حاضر برآورد می‌شود که تنها در قاره اروپا، از هر چهار کارگر یک نفر با یکی از دو نوع ارتعاش تمام بدن و یا ارتعاش دست و بازو مواجه است (Donati, 2008). ارتعاشات دست و بازو می‌توانند باعث بروز اختلالات در گردش خون شوند که در مجموع به آنها سندرم^۴ ارتعاش دست و بازو گفته می‌شود

امروزه استفاده از روتوتیلرها در مزارع کوچک و یا متوسط که به‌کارگیری تراکتورهای چهار چرخ مشکل است، کاربرد فراوانی دارند (Dewangan and Tewari, 2009). استفاده از این دستگاه به‌دلیل ویژگی‌های خاص و کاربردهای گسترده از جمله توانایی کار در باغ‌های کوچک و زیر درختان، گلخانه‌ها و فضای سبز مورد توجه قرار گرفته است (Tabatabae Kolor and kiani, 2011). ماشین‌های کشاورزی به‌ویژه ماشین‌هایی که به‌طور کامل با دست هدایت می‌شوند، ارتعاش زیادی به بدن انسان منتقل می‌کنند. کاربران این‌گونه وسایل در معرض سطوح بالایی از سرو صدا و ارتعاش قرار

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*- نویسنده مسئول: (Email: d.kalantari@sanru.ac.ir)

۳- مربی، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار، مازندران

بیواتانول و دیزل در شش ترکیب دیزل خالص (D100)، E2 (مخلوط ۲ درصد بیواتانول و ۹۸ درصد دیزل)، E1، E5، E10، E1 و E20 بر روی ارتعاش موتور تراکتور دوچرخ میتسوبیشی مورد بررسی قرار گرفت. موتور در سرعت‌های ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه برای تمامی مخلوط‌های سوخت ارزیابی شد. همچنین برای دو سوخت D100 و E10 اثر بار موتور بر مقدار ارتعاش بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد مخلوط‌های سوخت اثر معنی‌داری بر مقدار ارتعاش دارد. کمترین مقدار ارتعاش مربوط به E10 و بیشترین ارتعاش مربوط به سوخت E20 بود. همچنین ثابت شد که با افزایش دور موتور برای تمامی مخلوط‌های سوخت، مقدار شتاب نیز افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده نشان داد تأثیر افزایش بار موتور بر مقدار شتاب عمودی در ابتدا روند افزایشی و پس از آن روند کاهش‌ی دارد (Hashemifard Dehkordi *et al.*, 2013).

همان‌طور که در مرور منابع اشاره شد، یکی از مهم‌ترین مشکلات روتوتیلرهای مرسوم موجود، ارتعاش شدید دستگاه در حین کار می‌باشد که نارضایتی کاربران و در نهایت بیماری‌های مختلف حرکتی و عصبی را به دنبال داشته است. از این رو در تحقیق حاضر، میزان ارتعاش دسته‌ی یک نوع روتوتیلر با تیغه‌های لبه مضرسی جدید در دو حالت کار درجا و حالت خاک‌ورزی در سه سطح مختلف دور محور دوار بررسی شد. سپس بیش‌ترین زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش روتوتیلر در حالت خاک‌ورزی مداوم برای شرایط مختلف کارکرد دستگاه به‌دست آمد. در نهایت، راهکارها و تدابیر لازم برای کاهش بیش‌تر ارتعاش این نوع روتوتیلر ارائه شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در یک زمین زراعی با بافت خاک رسی-سیلیتی در روستای میارکلا به عرض جغرافیایی ۳۶/۵۹۹ شمالی و طول جغرافیایی ۵۲/۹۳۷ غربی از توابع شهرستان ساری استان مازندران و در سال ۱۳۹۴ انجام شد. در هر آزمون، سرعت دورانی محور تیغه‌ها با تغییر دور موتور به کمک اهرم کنترل در پیچه گاز تنظیم شد. مشخصات روتوتیلر مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است. روتوتیلر مورد آزمون دارای تیغه‌های جدیدی است که بحث بیش‌تر و آزمون عملکردی مربوط به آن در مقاله غلامی و همکاران (۲۰۱۶) قابل دسترسی است (شکل ۱) (Gholami *et al.*, 2016). اندازه‌گیری ارتعاش براساس استاندارد ایزو ۵۳۴۹-۱ و ایزو ۵۳۴۹-۲ (۲۰۰۱) برای دست و بازو در دو حالت مختلف شامل: ۱- حالتی که روتوتیلر درجا کار می‌کند (به‌طوری‌که موتور روشن بوده، روتوتیلر ساکن است و عملیات خاک‌ورزی انجام نمی‌شود) و ۲- حالتی که روتوتیلر در حال شخم زدن زمین بود صورت گرفت.

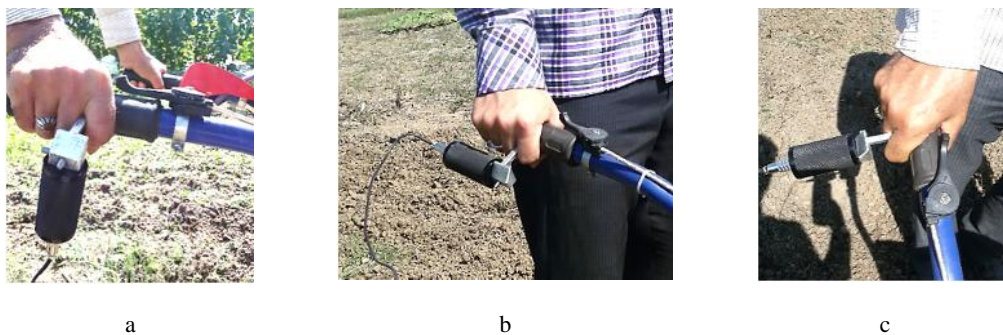
که در بین آن‌ها رایج‌ترین اختلال، بیماری سپید انگشتی (رینود) می‌باشد (Issever *et al.*, 2003). به تازگی نیز عوارض عصبی توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است که از جمله این عوارض می‌توان به پاراستزی^۲، سوزن سوزن شدن انگشتان دست، کاهش حس لامسه و اختلال خواب اشاره کرد (Nassiri *et al.*, 2013). ارتعاش عموماً وقتی به دست و بازو وارد می‌شود که منبع مرتعش به‌طور مستقیم با دست کاربر در تماس باشد (Griffin, 2004). بررسی‌های مختلفی بر کارکرد تیلرها و روتوتیلرها در راستای استفاده بهینه و مطلوب از این دستگاه جهت کاهش ارتعاش صورت گرفته است. در یک تحقیق، ارتعاش تراکتور دوچرخ (تیلر) در شرایط ایستگاهی در شش دور موتور (۱۳۰۰، ۱۶۰۰، ۱۸۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۰۰، ۲۴۰۰ دور بر دقیقه)، با نصب سنسور ارتعاش سنچ در موقعیت‌های شاسی، دسته تیلر، بازو و قفسه سینه راننده اندازه‌گیری شد (Taghizadeh Ali *et al.*, 2010). نتایج تحقیق فوق نشان داد که بیش‌ترین ارتعاش از دسته تیلر به دست راننده منتقل شده و مچ دست بیش‌ترین فشار را تحمل می‌کند. در نهایت این نتیجه به‌دست آمد که دامنه ارتعاش در حین انتقال از شاسی تا دسته افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری میزان مواجهه کاربران روتوتیلر با ارتعاش در سه حالت درجا، انتقال به زمین و شخم زدن زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیش‌ترین میزان مواجهه با ارتعاش در حالت شخم زدن تیلر بود. مقادیر کلی ارتعاش در سه حالت شخم زدن، انتقال و درجا به‌ترتیب برابر با ۱۶/۹۵، ۱۴/۱۶ و ۸/۶۵ متر بر مجذور ثانیه گزارش شد (Nassiri *et al.*, 2013). همچنین در پژوهشی خواص ارتعاشی تیلر در دوره‌های مختلف موتور در شرایط ایستگاهی و مزرعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده نشان داد که اتصال صلب دسته تیلر به شاسی باعث افزایش ارتعاش انتقالی به دست کاربر می‌شود (salokhe *et al.*, 1995). در پژوهش دیگر ارتعاش در دسته‌های اژه موتوری بدون انجام برش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این مطالعه مقادیر شتاب ارتعاش طی آزمایشی بر روی دسته‌های جلو و عقب اژه موتوری stil-MS230 در سه جهت عمودی، جانبی و محوری و در سه حالت دور موتور آرام، نامی و تند در شرایط بدون برش درخت اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که تأثیر دور موتور و حالت کارکرد بر میزان جذر میانگین مربعات شتاب ارتعاش در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. میزان کلی ارتعاش با دور شدن از دور نامی موتور افزایش یافت و این افزایش در دسته عقب بیشتر از دسته جلو بود، بنابراین خطر ابتلا به بیماری انگشت سفیدی در دست راست بیشتر از دست چپ خواهد بود (Feyzi *et al.*, 2014). در یک کار پژوهشی دیگر تأثیر مخلوط‌های

1- Raynauds phenomenon

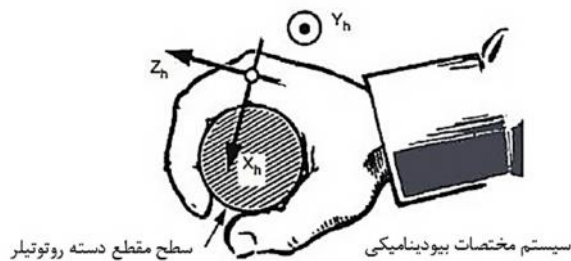
2- Paracentesis



شکل ۱- (a) روتوتیلر مورد استفاده در آزمایش و (b) تیغه‌های مورد استفاده در روتوتیلر
Fig. 1. (a) Rototiller used in the experiments, and (b) Blades of the rototiller



شکل ۲- اندازه‌گیری ارتعاش (a) در جهت x (b) در جهت y (c) در جهت z
Fig. 2. Vibration measurement: (a) in x direction (b) in y direction, and (c) in z direction



شکل ۳- محورهای متعامد مؤلفه‌های شتاب ارتعاش (ISO 5349-2001)
Fig. 3. Orthogonal axes of vibration acceleration components (ISO 5349-2001)

جدول ۱- مشخصات فنی روتوتیلر مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Technical specifications of the rototiller used in the experiments

شرح Description	توان مورد نیاز Power requirement	حداکثر سرعت دورانی محور Maximum rotational speed	تعداد تیغه در هر ردیف Number of blades in each row	تعداد ردیف تیغه‌ها Blades row number	وزن Weight	عرض کار Working width	طول Length	نوع موتور Engine type
مشخصات فنی Technical specifications	5.5 hp	230 rpm	4 عدد	10 ردیف	50 kg	60 cm	125 cm	تک سیلندر بنزینی Gasoline single cylinder

پارامترهای ارتعاشی در محل مواجهه کاربر با دستگاه در سه سرعت دورانی محور تیغه‌ها شامل: ۱- دور کم (۱۷۰-۱۴۰) rpm، ۲- دور متوسط (۲۰۰-۱۷۰ rpm) و ۳- دور زیاد (۲۳۰-۲۰۰ rpm)، اندازه‌گیری شد. در هر دو حالت دور درجا و حین خاک‌ورزی، جذر میانگین مربعات (RMS) مؤلفه‌های شتاب ارتعاش در سه جهت x ، y و z به صورت جداگانه ثبت شد (شکل ۲). طبق استاندارد ایزو (ISO 5349-2001) سه جهت متعامد سیستم مختصاتی که در آن میزان شتاب ارتعاش باید اندازه‌گیری شود عبارتند از: جهت z در امتداد استخوان‌های متاکارپ^۲ دست، جهت x عمود بر جهت z و y به موزات محور طولی چنگش (شکل ۳). اندازه‌گیری ارتعاش در سه جهت به صورت متوالی و به گونه‌ای که شرایط کار در هر سه اندازه‌گیری یکنواخت بود، به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد.

ارتعاش روتوتیلر در حالت کار درجا

پارامترهای ارتعاشی (فرکانس و دامنه ارتعاش) روتوتیلر در حالت درجا بستگی به خصوصیات ارتعاشی موتور احتراقی مورد استفاده دارد. از آنجایی که موتور مورد استفاده در روتوتیلرهای باغی معمولاً تک سیلندر و ارزان قیمت می‌باشد، لذا کارکرد آن به نرمی و یکنواختی موتورهای چند سیلندر نیست (Taghizadeh Ali sarai et al., 2010). در واقع، نیروهایی که در مرحله تراکم و انفجار توسط پیستون به میل لنگ وارد می‌شوند، بالانس نشده و ضربه‌های زیادی به بدنه موتور، شاسی و دسته‌ها وارد می‌کند. مؤلفه عمودی شتاب (مؤلفه شتاب در راستای حرکت پیستون) حاصل از کارکرد یک موتور تک سیلندر به صورت روابط (۳) تا (۵) بیان شده است (Rao, 2011).

$$a_x \cong r e^2 [\cos(\omega_e t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega_e t)] \quad (3)$$

در نتیجه، حداکثر مقدار شتاب محوری a_x برابر خواهد بود با:

$$a_{x \max} \cong \sqrt{1+r^2} e^2 \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، r/l برابر است با:

$$r/l = \max [\cos(\omega_e t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega_e t)] \quad (5)$$

در روابط (۳) تا (۵)، r شعاع لنگ، l طول شاتون، ω_e سرعت زاویه‌ای لنگ و t زمان می‌باشد.

ارتعاش روتوتیلر در حین عملیات خاک‌ورزی

در حین عملیات خاک‌ورزی، شتاب وارد بر دستگاه در راستای عمودی به صورت حاصل تقسیم نیروی عمودی وارد بر تیغه (k_x) بر جرم کل دستگاه (M) قابل بیان است (رابطه ۶).

$$a_x = \frac{k_x}{M} \quad (6)$$

با توجه به شکل ۶، مقدار نیروی وارد بر تیغه به دو مؤلفه افقی و عمودی تجزیه می‌شود. طبق تحقیقات برناکی و همکاران (۱۹۷۲)، مؤلفه‌های k_x و k_y به صورت رابطه (۷) و (۸) بیان می‌شود (Bernaki et al., 1972).

$$k_x = C_x k_0 \quad (7)$$

$$k_y = C_y k_0 \quad (8)$$

به طوری که در این روابط مقدار C_x و C_y به ترتیب در محدوده $0.45 - 0.64$ و $0.75 - 0.97$ تغییر می‌کنند. برای مقدار $C_x = 0.45$ مؤلفه شتاب در راستای عمودی به صورت رابطه (۹) بیان شد.

$$a_x = \frac{1}{M} (0.45 k_0) \quad (9)$$

برای ثبت شتاب‌های مورد نظر از ارتعاش سنج مدل VB- 8202 ساخت شرکت لوترون تایوان^۳ با دامنه فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز، دامنه اندازه‌گیری شتاب ۰/۵ تا ۱۹۹/۹ متر بر مجذور ثانیه شکل ۴ a و یک مبدل انگشتی سه محوره (برای ارتعاش دست - بازو) استفاده شد (شکل ۴ b). ثبت شتاب ارتعاش توسط این ارتعاش سنج به صورت تک‌جهته انجام می‌شود. ارتعاش مطابق با استاندارد ایزو ۱-۵۳۴۹ باید روی دست یا نزدیک دست‌ها، جایی که ارتعاش به بدن وارد می‌شود اندازه‌گیری شود (شکل ۵).

بر اساس توصیه‌های استاندارد ایزو ۵۳۴۹ (۲۰۰۱)، مهم‌ترین کمیت جهت توصیف مقدار انرژی منتقل شده به دست و بازو، جذر میانگین مربع شتاب (RMS) برحسب متر بر مجذور ثانیه است که بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد (Sam and Kathirvel, 2006).

بر اساس توصیه‌های استاندارد ایزو ۵۳۴۹ (۲۰۰۱)، مهم‌ترین کمیت جهت توصیف مقدار انرژی منتقل شده به دست و بازو، جذر میانگین مربع شتاب (RMS) برحسب متر بر مجذور ثانیه است که بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد (Sam and Kathirvel, 2006).

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، a_{rms} مقدار جذر میانگین مربع شتاب، T کل مدت زمان اندازه‌گیری شتاب و a مقدار شتاب لحظه‌ای در زمان t است. ارزیابی مواجهه کاربر با ارتعاش دستگاه، مطابق با استاندارد ایزو ۱-۵۳۴۹ (۲۰۰۱) به صورت برآیند RMS سه مؤلفه شتاب در جهت‌های عمود بر هم و از طریق رابطه (۲) بیان شد (Chaturvedi et al., 2012).

$$a_{hv} = \sqrt{(a_{hwx})^2 + (a_{hwy})^2 + (a_{hwz})^2} \quad (2)$$

که در این رابطه، a_{hv} شتاب RMS کل در دسته برحسب $m s^{-2}$

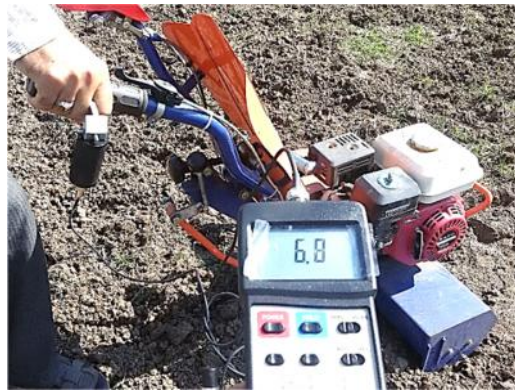
1- Root mean square

2- Metacarpal

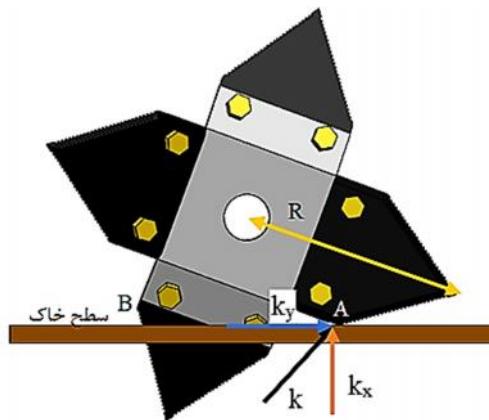
3- Lutron co., Taiwan



شکل ۴- (a) ارتعاش‌سنج (VB- 8202) (b) انگشتی سه محوره
Fig. 4. (a) Vibration meter (model: VB- 8202) (b) Tri-axial fingered



شکل ۵- محل قرارگیری انگشتی سه محوره جهت اندازه‌گیری و ثبت شتاب
Fig. 5. Placement of the tri-axial fingered for acceleration measurement and record

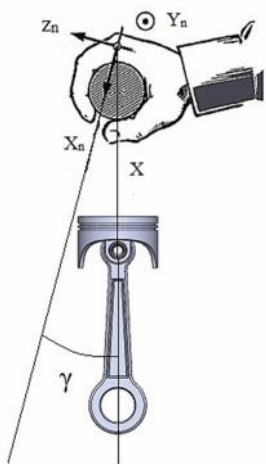


شکل ۶- نیروهای وارد بر تیغه در لحظه ورود به خاک
Fig. 6. Forces acting on the blade at the time of entering the soil

شکل و عمق کار ۱۳ سانتی‌متر به صورت $k_0=30+0.65u^2$ ارائه شده است. بنابراین، در این تحقیق نیز رابطه عمومی مشابهی به صورت

طبق تحقیقات برناکی و همکاران (۱۹۷۲)، مقدار نیروی وارد بر تیغه‌های رایج L برای خاک زراعی نیمه سنگین در کار با تیغه‌های رایج L

RMS شتاب به‌دست آمده با جدول توصیه مجمع دولتی بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH, 2002) که مورد تأیید کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای ایران نیز است، مقایسه شد. این مجمع جدولی به‌عنوان حدود مجاز مواجهه شغلی با ارتعاش دست و بازو ارائه داده است (جدول ۳). بر این اساس مقادیر شتاب به‌دست آمده در جهتی که بیش‌ترین مقدار را داشت با داده‌های جدول نامبرده مقایسه شد.



شکل ۷- زاویه بین راستای حرکت پیستون (محور عمودی) و محور اندازه‌گیری شتاب وارد بر دست کاربر طبق استاندارد ISO 5349-2001

Fig. 7. The angle between direction of piston movement (vertical axis) and the acceleration measurement axis exerted to the user's hand based on ISO 5349-2001

صورت طبق رابطه (۹) مقدار شتاب عمودی به‌صورت رابطه (۱۰) خواهد بود.

$$a_x = \frac{0.45}{M} (k_s + \lambda R^2 \frac{2}{S}) \quad (10)$$

که در این رابطه s سرعت دورانی تیغه و R شعاع روتور می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که حداکثر شتاب حاصل از کارکرد تیغه خاک‌ورزی در راستای عمودی (x) با مجذور سرعت دورانی روتور (محور حامل تیغه‌ها) افزایش می‌یابد.

باید توجه داشت که در حین خاک‌ورزی هر دو منبع ارتعاش یعنی ارتعاش حاصل از موتور احتراقی و ارتعاش حاصل از تیغه‌های خاک‌ورز باید به‌صورت همزمان در نظر گرفته شود. لذا برای مؤلفه شتاب در راستای عمودی خواهیم داشت:

$$a_{x \text{ خاک‌ورزی}} = a_{x \text{ موتور}} + a_{x \text{ روتور}} \quad (11)$$

$$a_{x \text{ خاک‌ورزی}} = 1r_e^2 + (k_1 + 2R^2 \frac{2}{S}) \quad (12)$$

با تعریف "نسبت سرعت دورانی محور دوار به سرعت دورانی موتور" به‌صورت $E = s / s_e$ خواهیم داشت:

$$a_x = k_1 + (1 \frac{r}{E^2} + 2R^2) \frac{2}{S} \quad (13)$$

مؤلفه‌ای از a_x که در جهت x_n به‌دست کاربر وارد می‌شود (شکل ۷) براساس رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید.

$$a_{x_n} = a_x \cos \quad (14)$$

به‌طوری‌که زاویه بین محور عمودی (راستای حرکت پیستون) و محور اندازه‌گیری شتاب وارد بر دست کاربر می‌باشد (شکل ۷). از روابط به‌دست آمده (۵، ۱۰، ۱۳ و ۱۴) در تحلیل نتایج آزمایشگاهی و مزرعه‌ای به‌دست آمده استفاده خواهد شد. برای تعیین حدود مجاز مواجهه با ارتعاش دست و بازو، مقادیر

جدول ۲- حدود مجاز مواجهه با ارتعاش دست و بازو طبق توصیه ACGIH

Table 2- Hand-arm vibration exposure limits as recommended by ACGIH

ساعات مواجهه Exposure times	مقادیر شتاب مجاز مواجهه روزانه Daily exposure limits (RMS)	
	ms^{-2}	g
کمتر از ۸ ساعت Less than 8 hours	4	0.4
کمتر از ۴ ساعت Less than 4 hours	6	0.61
کمتر از ۲ ساعت Less than 2 hours	8	0.81
کمتر از ۱ ساعت Less than 1 hours	12	1.22

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به RMS شتاب کل و مؤلفه‌های

تجزیه و تحلیل داده‌ها به روش تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 انجام گرفت.

شتاب کل معنی‌دار بود. اثر برهم‌کنش عوامل آزمایش بر هیچ یک از پارامترهای اندازه‌گیری معنی‌دار نبود (جدول ۳). مقایسه‌ی مقادیر میانگین پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر سرعت دورانی تیغه‌ها و وضعیت کاری دستگاه به‌ترتیب در جداول ۴ و ۵ آمده است.

شتاب در سه جهت x، y و z تحت تأثیر وضعیت کاری (درجا و حالت خاک‌ورزی)، سرعت دورانی تیغه‌ها و برهم‌کنش آن‌ها در جدول ۳ آمده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اثر وضعیت کاری و سرعت دورانی تیغه‌ها بر روی شتاب در هر سه راستای x، y و z و

جدول ۳- تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر موقعیت، سرعت دورانی و برهم‌کنش آن‌ها

Table 3- ANOVA Results of the measured parameters affected by the position and rotational speed and their interaction

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square			
		a_{hwx}	a_{hwy}	a_{hwz}	a_{hw}
موقعیت (A) Position (A)	1	76.056**	105.948**	93.389**	282.190**
سرعت دورانی (B) Rotational speed (B)	2	384.081**	351.297**	265.389**	996.297**
(A×B)	2	2.871 ^{ns}	19.299 ^{ns}	0.668 ^{ns}	13.252 ^{ns}
خطا Error	12	5.070	5.554	4.889	14.314

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیر معنی‌دار بودن را نشان می‌دهد.
*، ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns: non-Significant

جدول ۴- مقایسه‌ی مقادیر میانگین پارامترهای اندازه‌گیری تحت تأثیر سرعت دورانی تیغه‌ها

Table 4- Mean comparison of the measured parameters affected by the blade rotational speeds

سرعت دورانی تیغه (دور بر دقیقه) Blade rotational speed (rpm)	جذر میانگین مربعات شتاب (متر بر مجذور ثانیه) RMS acceleration (m s ⁻²)			
	جهت x x-direction	جهت y y-direction	جهت z z-direction	شتاب کل total acceleration
155	6.88 ^c	7.47 ^c	7.58 ^c	12.70 ^c
185	11.16 ^b	12.11 ^b	10.35 ^b	18.94 ^b
215	22.37 ^a	23.31 ^a	20.52 ^a	37.58 ^a

حروف مشابه در هر ستون بیان‌گر عدم معنی‌دار بودن تفاوت بین داده‌های آن ستون است.
same letters in each column indicates no significant differences between the data column.

جدول ۵- مقایسات میانگین جفت شده پارامترهای اندازه‌گیری در وضعیت‌های درجا و در حین شخم

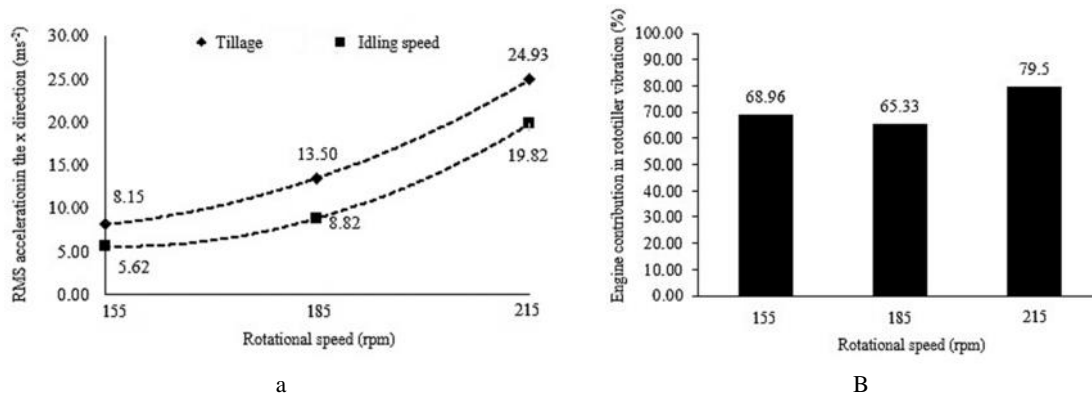
Table 5- Paired mean comparisons of the measured parameters in situ and tillage modes

وضعیت کاری Working mode	جذر میانگین مربعات شتاب (متر بر مجذور ثانیه) RMS acceleration (m s ⁻²)			
	جهت x x-direction	جهت y y-direction	جهت z z-direction	شتاب کل total acceleration
وضعیت درجا Idling speed	11.41 ^b	12.71 ^b	10.36 ^b	19.16 ^b
در حین شخم During tillage	15.53 ^a	15.89 ^a	15.25 ^a	26.98 ^a

حروف مشابه در هر ستون بیان‌گر عدم معنی‌دار بودن تفاوت بین داده‌های آن ستون است.
same letters in each column indicates no significant differences between the data column.

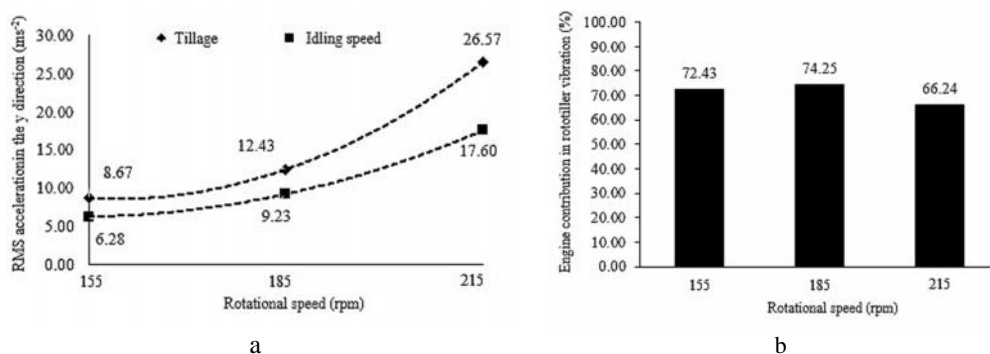
با توجه به جدول ۵، بیش‌ترین مقدار RMS شتاب کل و مؤلفه‌های شتاب در هر سه جهت در حالت خاک‌ورزی به‌دست آمد. علت این امر این است که با افزایش بیشتر سرعت دورانی تیغه‌ها، تعداد برش در واحد زمان و در نتیجه فرکانس تغییر در نیروهای دینامیکی وارد بر تیغه‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و این امر به نوبه خود باعث افزایش بیش‌تر ارتعاش در ساختمان روتوتیلر می‌شود. متعاقب آن ارتعاش دسته روتوتیلر نیز افزایش خواهد یافت. نتایج مشابهی در برخی از تحقیقات گزارش شده است (Goglia *et al.*, 2006; Tewari *et al.*, 2004). نکته قابل توجه در شکل‌های ۸ تا ۱۱ این است که در اکثر موارد مقدار شتاب در حالت خاک‌ورزی با روندی مشابه با حالت دور درجا افزایش یافته است که نشان‌دهنده سهم قابل توجه موتور احتراقی در ارتعاش روتوتیلر می‌باشد.

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۴، بیش‌ترین کم‌ترین مقدار RMS شتاب کل و مؤلفه‌های شتاب در هر سه جهت به ترتیب در سرعت‌های دورانی ۲۱۵ rpm و ۱۵۵ rpm به‌دست آمد. همچنین با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۸ تا ۱۱، با افزایش سرعت دورانی محور تیغه‌ها، RMS شتاب کل و مؤلفه‌های شتاب در سه جهت، در هر دو حالت کار درجا و خاک‌ورزی به‌صورت سهمی افزایش یافت. در همین راستا رابطه (۵) نیز نشان می‌دهد که مؤلفه‌های عمودی شتاب حاصل از کارکرد یک موتور تک سیلندر متناسب با مجذور سرعت دورانی موتور افزایش می‌یابد. افزایش سهمی وار مؤلفه‌های شتاب ارائه شده در شکل ۸ نیز گواه همین موضوع است. در تحقیق دیگری که بر روی تیلر انجام شد، نتیجه مشابهی برای RMS شتاب گزارش شده است (Taghizadeh Ali *et al.*, 2010).



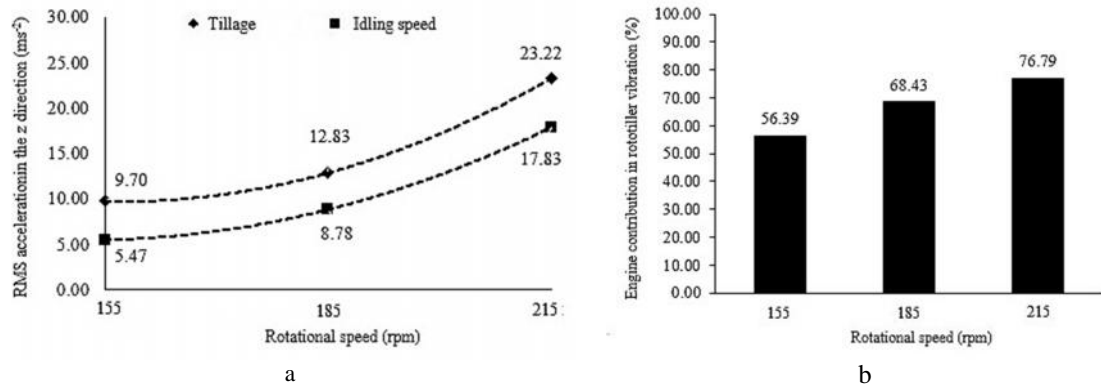
شکل ۸- (a) تأثیر سرعت دورانی بر RMS شتاب در جهت x در دو وضعیت کاری (b) سهم موتور در ارتعاش دستگاه در سرعت‌های مختلف در جهت x

Fig. 8. (a) The influence of blades rotational speed on the RMS of acceleration in the x direction in two working conditions (b) Contribution of engine in the total vibration for different rotational speeds in x-direction.



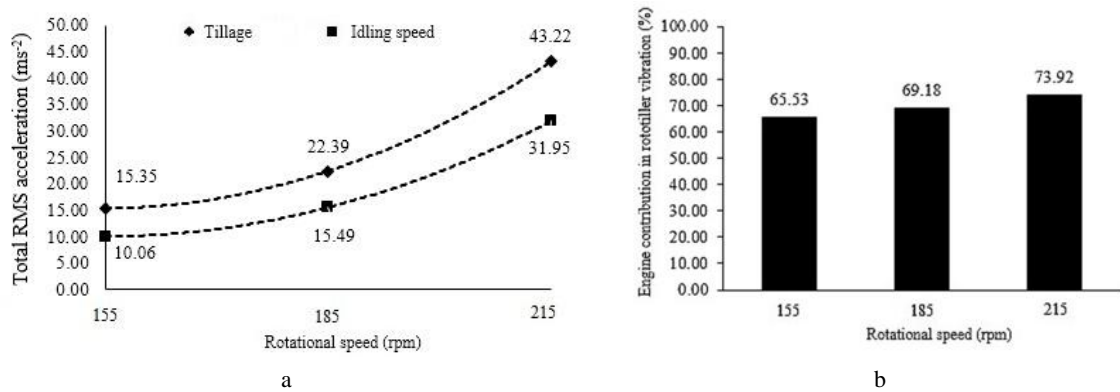
شکل ۹- (a) تأثیر سرعت دورانی بر RMS شتاب در جهت y در دو وضعیت کاری (b) سهم موتور در ارتعاش دستگاه در سرعت‌های مختلف در جهت y

Fig. 9. The influence of blades rotational speed on the RMS of acceleration in the y direction in two working conditions (b) Contribution of engine in the total vibration for different rotational speeds in y-direction



شکل ۱۰- تأثیر سرعت دورانی بر RMS شتاب در جهت z در دو وضعیت کاری (b) سهم موتور در ارتعاش دستگاه در سرعت‌های مختلف در جهت z

Fig. 10. The influence of blades rotational speed on the RMS of acceleration in the z direction in two working conditions (b) Contribution of engine in the total vibration for different rotational speeds in z-direction



شکل ۱۱- (a) تأثیر سرعت دورانی و RMS شتاب کل در دو وضعیت کاری (b) سهم موتور در ارتعاش دستگاه در سرعت‌های مختلف (b) Contribution of engine in the total vibration for different rotational speeds

متفاوتی نسبت به دیگر جهت‌ها از خود نشان داد و بیشترین مقدار آن برابر ۷۴/۲۵ درصد بود که در سرعت ۱۸۵ rpm به‌دست آمد (شکل ۹ b). با افزایش سرعت دورانی تیغه‌ها از ۱۵۵ rpm به ۲۱۵ rpm، سهم موتور در ارتعاش دستگاه در جهت z و شتاب کل به‌طور پیوسته افزایش یافت (شکل ۱۰ و ۱۱ b). بالا بودن سهم موتور در ایجاد ارتعاش دستگاه نشان داد که با انتخاب موتور با کیفیت بالاتر یا تغییر در نحوه نصب بهتر موتور بر روی شاسی یا استفاده از میراگرها می‌توان ارتعاش کل سیستم را کاهش داد.

نتایج مقایسه شتاب به‌دست آمده در حالت خاک‌ورزی با جدول ۲ نشان داد که بیشترین زمان مجاز کار مداوم با روتوتیلر ساخته شده کمتر از ۲ ساعت است که در سرعت دورانی ۱۴۰ تا ۱۷۰ دور بر دقیقه به‌دست می‌آید. در پژوهش مشابهی که تأثیر ارتعاش منتقل شده از دسته‌های یک تراکتور تک محوره بر دست‌های کاربر مورد بررسی قرار گرفت، آسیب انگشت سفیدی (پدیده‌ی Raynaud) از میان

همچنین نتایج ارائه شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی محور دوار، ارتعاش روتوتیلر مورد آزمون با تیغه‌های مثلی لبه مضرسی جدید بیش از آن که به تغییرات نیروی وارد بر تیغه‌ها وابسته باشد، بیشتر به کارکرد موتور احتراقی مورد استفاده مربوط است (شکل ۸ تا ۱۱ b). به‌عنوان مثال در دور حداکثر ۲۱۵ rpm محور دوار، ۷۹/۵٪ از ارتعاش کل دستگاه مربوط به موتور احتراقی مورد استفاده بوده است (شکل ۸ b).

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۸ b، در سرعت دورانی ۱۸۵ rpm تیغه (۲۵۰۰ rpm دور موتور)، سهم موتور در ارتعاش عمودی دستگاه به حداقل مقدار رسید. در این دور گشتاور تولیدی موتور مورد استفاده نیز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این نتیجه بیان‌گر این است که استفاده از موتور احتراقی در دور بهینه آن باعث کاهش ارتعاش کل دستگاه در جهت عمودی می‌شود. در جهت y با افزایش سرعت دورانی تیغه، سهم موتور در ارتعاش دستگاه روند

۱. انتخاب موتور با کیفیت بالاتر و ارتعاش کمتر
 ۲. ایزوله کردن منبع اصلی ارتعاش (موتور) به وسیله میراکننده‌هایی مانند لاستیک‌های فشرده از شاسی (Marsili *et al.*, 2002). از مشکلات این کار می‌توان به نبودن تکیه‌گاه مناسب برای میراکننده‌ها به دلیل محدودیت ساختاری ماشین و همچنین مشکل‌تر شدن انتقال توان از موتور به محور دوار توسط تسمه و پولی اشاره کرد.
 ۳. عایق‌بندی دسته‌ی روتوتیلر با نصب و جاگذاری ایزولاتورهای ارتعاش، که می‌تواند بخش قابل توجهی از ارتعاش انتقالی به دست و بازو را کاهش دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان از جناب مهندس علی یوسف زاده به‌خاطر همکاری در ساخت دستگاه و مهندس مجید خسروی به دلیل کمک در انجام آزمایش‌ها بی‌نهایت سپاس‌گزارند.

آسیب‌های ناشی از ارتعاش به‌عنوان رایج‌ترین آسیب معرفی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین ارتعاش در حالت خاک‌ورزی با مقدار شتاب کل ۹/۶۲ متر بر مجذور ثانیه نسبت به دو حالت دیگر (درجا و حمل و نقل) بوده و طبق نتایج به‌دست آمده، چنان‌چه تراکتور نامبرده به مدت ۸ ساعت در روز مشغول خاک‌ورزی و حمل و نقل با بار کامل باشد، بعد از طی دوره‌ی ۳ یا ۴ سال حدود ۱۰ درصد از کاربران در خطر مواجهه با آسیب انگشت سفیدی قرار خواهند گرفت (Goglia *et al.*, 2006).

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که ارتعاش روتوتیلر مورد آزمایش بیش از آن که به تغییر موقعیت تیغه در داخل خاک مربوط باشد، بیشتر به کارکرد موتور احتراقی نصب شده بر روی آن وابسته است. لذا برای کاهش ارتعاش انتقالی به دست و بازو سه راهکار پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

References

1. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2002.
2. Bernaki H., J. Haman, and C. Z. Kanafojski. 1972. Agricultural machines, theory and construction. US department of Agriculture and national science foundation, Washington, D.C.
3. Boshuizen, H. C., P. M. Bongers, and C. T. J. Hulshof. 1990. Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 62: 109-115.
4. Chaturvedi, V., A. Kumar, and J. K. Singh. 2012. Power tiller: Vibration magnitudes and intervention development for vibration reduction. *Applied Ergonomics* 43: 891-901.
5. Dewangan, K. N., and V. K. Tewari. 2009. Characteristics of hand-transmitted vibration of a hand tractor used in three operational modes. *International Journal of Industrial Ergonomics* 39: 239-245.
6. Donati, P. 2008. Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review Vol. 7.
7. Fayzi, M., A. Jafari, and H. Ahmadi. 2014. Investigation and analysis the vibration of handles of chainsaw without cutting. *Journal of Agricultural Machinery* 6 (1): 90-101. (In Farsi).
8. Gholami, H., D. Kalantari, and M. Rajabi vandechali. 2016. Testing and evaluation of a rototiller with new ridged blades. *Journal of Agricultural Machinery* 7 (1). (In Farsi).
9. Goglia, V., Z. Gospodaric, D. Filipovic, and I. Djukic. 2006. Influence on operator's health of hand-transmitted vibrations from handles of a single-axle tractor. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 13: 33-38.
10. Griffin, M. 2004. Minimum health and safety requirements for workers exposed to hand-transmitted vibration and whole-body vibration in the European Union; a review. *Occupational and Environmental Medicine* 61 (5): 387-397.
11. Hashemifard Dehkordi, S. H., M. Almassi, A. M. Borgheei, and B. Beheshti. 2013. Effect of bio ethanol and diesel blend on small diesel engine vibration. *Journal of Agricultural Machinery* 4 (2): 236-243. (In Farsi).
12. ISO 5349-1. 2001. Mechanical Vibration Measurement and Evaluation of Human Exposure to Hand-transmitted Vibration. Part I: General Requirements. Geneva: International Standard Organization.
13. ISO 5349-2. 2001. Mechanical Vibration-Measurement and Evaluation of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration-Part 2: Practical Guidance for Measurement at the Workplace.
14. Issever, H., C. Aksoy, H. Sabuncu, and A. Karan. 2003. Vibration and its effects on the body. *Medical Principles and Practice* 12: 34-38.

15. Marsili, A., L. Ragni, G. Santoro, P. Servadio, and G. Vassalini. 2002. Innovative systems to reduce vibrations on agricultural tractors: Comparative analysis of acceleration transmitted through the driving seat. *Biosystem Engineering* 81: 35-47
16. Nassiri, P., I. Ali Mohammadi, M. H. Beheshti, and K. Azam. 2013. Hand-Arm vibration assessment among tiller operator. *Journal of health and safety at work*. 3 (2): 35-46. (In Farsi).
17. Rao, S. S. 2011. *Mechanical Vibrations*. Prentice Hall. P 1084.
18. Salokhe, V. M., B. Majumder, and M. S. Islam. 1995. Vibration characteristics of a power tiller. *Journal of Terramechanics* 32: 181-197.
19. Sam B., and K. Kathirvel. 2006. Vibration Characteristics of Walking and Riding Type Power Tillers. *Biosystem Engineering* 95: 517-528.
20. Tabatabae Kolor, R., and Gh. Kiani. 2011. Investigation of the rototiller blades operational factors on the orchards and paddy fields tillage. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 1 (1): 34-40. (In Farsi).
21. Taghizadeh Ali sarai, A., T. Tavakoli Hashjin, and B. Ghobadian. 2010. Tiller vibration analysis at station position. *Iran Biosystems Engineering* 41: 27-35. (In Farsi).
22. Tewari, V. K., K. N. Dewangan, and S. Karmakar. 2004. Operator's fatigue in field operation of hand tractors. *Biosystems Engineering* 89: 1-11.
23. Tewari, V. K., and K. N. Dewangan. 2009. Effect of vibration isolators in reduction of work stress during field operation of hand tractor. *Biosystems Engineering* 103 (2): 146-158.

Ergonomic Evaluation of Vibrations of a Rototiller with New Blade

H. Gholami¹ - D. Kalantari^{2*} - M. Rajabi Vandechli³

Received: 18-05-2016

Accepted: 17-08-2016

Introduction

One of the most important problems arising with operation of the conventional rototillers is severe vibration of the machine handle which is transmitted to the user's hands, arms and shoulders. Long period exposure of the hand-transmitted vibration may cause various diseases such as white finger syndrome. Therefore in this study, vibrations of a new type of rototiller with ridged blades were investigated at the position of handle/hand interface in different working conditions. Finally, the maximum allowable exposure time to the rototiller users in continuous tillage operation was obtained according to ISO 5349-1.

Materials and Methods

Experiments were carried out in one of the farms with silty clay soil texture, located in Sari city, Mazandaran province, Iran. Vibration measurements were performed according to ISO 5349-1 and ISO 5349-2 standards in two different modes, including in situ mode and tillage mode. Vibrational parameters were obtained in three blade rotational speeds, i.e., low speed (140-170 rpm), medium speed (170-200), and high speed (200-230). Blade rotational speed varied by changing engine speed using the throttle control lever. In each experiment, different vibrational values were individually recorded in three directions (x, y, and z). Experimental design and data analysis were performed in a Randomized Complete Block Design with three replications using the SPSS16 software.

Results and Discussion

Based on the obtained results in this study, the RMS of acceleration increased by increasing in rotational speed for all of the conducted experiments. The reason is that number of cutting per unit of time and consequently the frequency of changing in the dynamic forces exerting on the blades dramatically increases with increasing the rotational speed of the blades. Noteworthy is that in most cases the variation of acceleration in the tillage mode showed similar trend with vibrational values in the idling mode. This represents a significant contribution of the combustion engine in vibration of the examined rototiller. Meanwhile, contribution of the engine in the total measured vibration was more than 50% at different rotational speeds and different directions. The minimum engine contribution was measured equal to 56.39% in z-direction at 155 rpm, whereas the maximum engine contribution was observed equal to 79.5%, in x-direction and rotational speed of 215 rpm. These results indicate the importance of selecting a proper combustion engine for reducing the rototiller vibration. It should be noted that the contribution of the engine in total vibration reached its minimum value at the speed related to the maximum generated torque, i.e., 185 rpm of the rotor speed.

This result indicates that using the combustion engine in its optimum speed reduces the entire device vibration in the vertical direction. By increasing the rotational speed of the blades in the y-direction, engine contribution in device vibration showed different trends in compare to the other directions. The most value was equal to 74.25% which was obtained at the rotation speed of 185 rpm. By increasing blade rotational speed from 155 rpm to 215 rpm, the engine contribution in device vibration in the z direction and the total acceleration steadily increased.

Conclusions

With growing mechanization and entering various types of machines to the farm, importance of considerations to human health is also increased, especially in working with rotational machines. Therefore, the current study was undertaken with the specific attention to the rototillers operational vibration at the handle/hand interface. Results of the conducted experiments showed that vibration of the examined rototiller depends more on the operation of the mounted combustion engine, rather than the soil working blades. Therefore, it is suggested to select a higher quality engine with less vibration or isolate the engine from chassis by a damper (such as a compressed rubber) to reduce the vibration transmitted to the operator's hands and arms.

Keywords: Allowable exposure time, Ergonomy, Hand and arm, Rototiller, Vibration

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

2- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

3- Instructor, Department of Mechanic, Islamic Azad University of Jouybar, Jouybar, Mazandaran, Iran

(*- Corresponding Author Email: d.kalantari@sanru.ac.ir)