تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۱/ شماره ۷۴/ بهار و تابستان ۱۳۹۹/ص ۲۳۶-۲۱۹

مقاله پژوهشی

مقایسهٔ فنی سه روش برداشت نیمه مکانیزه، مکانیزهٔ چند مرحله‌ای و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای (کمباین) چغندرقند در مزارع شهرستان جوین استان خراسان رضوی

اصغر زورآبادی[۱]، مجتبی نادری بلداجی[۲*]، اصغر عابدی[۳]، امین لطفعلیان دهکردی[۴] و احسان شهبازی[۵]

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و استادیاران گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۵- استادیار گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۵

چکیده

در این پژوهش، سه روش برداشت چغندرقند شامل نیمه مکانیزه، مکانیزهٔ چند مرحله‌ای و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای (کمباین) در استان خراسان رضوی (شهرستان جوین) از نظر برخی عوامل فنی مقایسه شدند. میزان مجموع ضایعات محصول شامل طوقه، غده‌های آسیب دیده و غده‌های سالم برداشت نشده با ۱۹۴۴، ۵۴۲، و ۴۵۴ کیلوگرم در هکتار به ترتیب مربوط به روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای، مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه به دست آمد. بیشترین اثر تراکم بر خاک بر حسب افزایش در شاخص مخروط، در روش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و بعد از آن در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای به دست آمد. مصرف سوخت در روش برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و روش نیمه مکانیزه به ترتیب برابر با ۲۵ و ۳۳ درصد مصرف سوخت در روش برداشت مکانیزه چند مرحله‌ای حاصل شد. درصد انرژی مصرف شده در روش برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه به ترتیب ۲۴ و ۳۴ درصد انرژی مصرف شده در روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای به دست آمد. روش برداشت با کمباین مزیت‌های نسبی بیشتری در مقایسه با دو روش دیگر دارد و تنها محدودیت این روش، ایجاد تراکم بیشتر خاک است که به تمهیدات فنی برای جلوگیری از آن نیاز خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی

تراکم خاک، مصرف سوخت، ضایعات چغندرقند

مقدمه

چغندرقند بومی سواحل مدیترانه است و به عنوان منبع تهیهٔ شکر، تا اواسط قرن هجدهم میلادی ناشناخته بود. اصلاح چغندرقند را اولین بار در سال ۱۷۴۷ «آندرس مارگراف» شیمیدان آلمانی آغاز کرد. او با گرفتن عصارهٔ الکلی از چغندرقند توانست شکر به دست آورد (Cullivand, 1987). چغندرقند از محصولات صنعتی کشاورزی است که برای تولید شکر و نیز برای تهیهٔ خوراک دام از آن استفاده می‌شود و از این رو محصولی دو جانبه به شمار می‌آید، از ریشهٔ آن برای تولید شکر و از برگ‌های آن برای تولید علوفه و یا کود آلی در خاک استفاده می‌شود (Morad *et al.*, 2007). از این محصول علاوه بر تولید شکر، فرآورده‌هایی مانند تفاله و ملاس نیز به دست می‌آید که به ترتیب در تغذیهٔ دام و در صنعت الکل‌سازی به کار برده

*نگارنده مسئول: Email: m.naderi@ut.ac.ir
Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir

http://doi: 10.22092/erams.2019.126410.1316

می‌شود. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز روز افزون به شکر به عنوان مادۀ اصلی غذایی، تولید چغندرقند اهمیت زیادی برای کشورها دارد.

چغندرقند با تولید بالغ بر ۵/۵ میلیون تن در سال یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی در ایران است و وجود شرایط آب و هوایی مناسب سبب گردیده تا در اغلب استان‌های ایران، سطح وسیعی از اراضی قابل کشت به این محصول اختصاص یابد (Solhjoo & Niromand-Jahromi, 1999). در ایران، چغندرقند به طور رایج به صورت سنتی (دستی)، نیمه مکانیزه، مکانیزۀ چند مرحله‌ای و مکانیزۀ تک مرحله‌ای (کمباین) برداشت می‌شود و شامل مراحل برگ‌زنی، سرزنی، کندن غده و بارگیری است که در هر یک، با توجه به روش برداشت (مکانیزه یا دستی)، ماشین یا وسایل خاص خود به کار گرفته می‌شود (Sakenian-Dehkordi *et al.*, 2016). بررسی‌های در مورد روش‌های برداشت چغندرقند در ایران نشان می‌دهد به غیر از استان‌های خوزستان و اردبیل (دشت مغان) و کشت و صنعت جوین که بخش قابل توجهی از عملیات برداشت در آنها کاملا مکانیزه است، در سایر استان‌ها سطح برداشت مکانیزه بسیار پایین است. در روش دستی (سنتی)، کلیۀ عملیات برداشت شامل کندن، سرزنی و بارگیری را کارگر به عهده دارد. در روش برداشت نیمه مکانیزه، قسمتی از عملیات برداشت با ماشین و قسمتی با دست است. در این روش، برای بیرون آوردن چغندر از خاک از چغندرکَن پشت تراکتوری استفاده می‌شودکه به صورت سوار (اتصال سه نقطه) به پشت تراکتور متصل است. بعد از آن مراحل برگ‌زنی، طوقه زنی و بارگیری را کارگر به عهده دارد. روش برداشت مکانیزه به صورت چند مرحله‌ای و تک مرحله‌ای است؛ در روش چند مرحله ای، ابتدا برگ‌های چغندرقند با برگ‌زن[1] قطع و در مخزنی جمع‌آوری یا بر زمین پخش می‌شود. برگ‌زن به صورت کششی به تراکتور متصل است و از محور PTO تراکتور توان مورد نیاز خود را تامین می‌کند. مرحله‌های بعد سرزنی، کندن غدۀ چغندر و ردیف کردن است. برای این عملیات از ماشین‌های سرزنی[2]، چغندرکن و ردیف ساز[3] به شکل توام استفاده می‌شود. این ماشین، محصول چند ردیف چغندر را هم‌زمان از زمین خارج و در یک طرف مسیر حرکت ردیف می‌کند. مرحلۀ بعد بارگیری است که در آن ماشین از بارکن[4] کششی استفاده می‌شود. روش برداشت مکانیزۀ تک مرحله‌ای (کمباین)، با کمباین‌های برداشت است که به صورت کششی یا خودگردان هستند. در این روش، کلیۀ کارها، از برگ‌زنی تا بارکردن، با یک بار عبور ماشین به انجام می‌رسد.

در خصوص مقایسۀ فنی و اقتصادی روش‌های برداشت چغندرقند در داخل و خارج از کشور مطالعات متعددی شده است. تلفات، ضایعات و هزینه‌های برداشت به ازای هر هکتار چغندرقند در سه روش برداشت سنتی (دستی)، نیمه مکانیزه (نیمه ماشینی) و مکانیزه (مکانیزۀ چند مرحله‌ای) در منطقۀ ارومیه بررسی و در آن مقدار چغندرهای باقیمانده در زمین، چغندرهای شکسته و زخمی شده، مقدار سبزینه و مقدار خاک همراه چغندر به عنوان شاخص‌های فنی، و هزینه‌های برداشت به عنوان شاخص اقتصادی اندازه‌گیری و مقایسه شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضایعات محصول در روش مکانیزۀ چند مرحله‌ای نسبت به دو روش دیگر، به دلیل غده‌های برداشت نشده و یا آسیب دیده، بیشتر است، ولی از نظر به موقع انجام گرفتن برداشت محصول و هزینه‌های روش برداشت

1- Pretopper
2- Topper
3- Reaper
4- Pickup Loader

مکانیزه، که یک سوم هزینه‌های روش نیمه مکانیزه و یک پنجم هزینه‌های روش سنتی است، روش برداشت چند مرحله‌ای مناسب‌ترین روش برداشت چغندرقند گزارش شده است (Azad, 1999).

در پژوهشی دیگر، با مقایسهٔ روش‌های مختلف برداشت چغندرقند (نیمه مکانیزه، مکانیزهٔ چند مرحله‌ای، و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای (کمباین) از نظر میزان مصرف انرژی در هکتار در سطح مزارع استان‌های خراسان رضوی، آذربایجان غربی و قزوین نشان داده شده است که انرژی مورد نیاز برای برداشت نیمه مکانیزهٔ چغندرقند از دیگر روش‌های مورد مطالعه کمتر است. دلیل این نتیجه‌گیری، بالاتر بودن راندمان انرژی انسان نسبت به راندمان انرژی ماشین گزارش شده است. برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای دارای بیشترین میزان مصرف انرژی در بین سه روش مورد مطالعه است. با این حال کشاورزان از این روش به علت داشتن ادوات دنباله‌بند، بیش از سایر روش‌ها استقبال می‌کنند زیرا این ادوات با تراکتورهای متعارف کار می‌کنند و به کارگیری آنها آسان، هزینهٔ اولیه‌شان کم، و تعمیر و نگهداری‌شان نیز آسان است. میزان مصرف انرژی در برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای چغندرقند (برداشت مستقیم با کمباین)، کمتر است تا در برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای. در این روش برداشت، نسبت به روش مکانیزه چند مرحله‌ای، راندمان انرژی بیشتر و مدت زمان برداشت حداقل است (Mohammadi-Mazrae & Nazarzadeh-Oughaz, 2008).

پژوهشی با هدف بررسی تاثیر وزن غده‌های چغندرقند بر میزان ضایعات در هنگام برداشت با یک بارکن پشت تراکتوری در منطقهٔ دشت قهیز دامنه در فریدن اصفهان اجرا شد. تغییر در وزن غده‌ها با تیمار فاصلهٔ کاشت روی ردیف ایجاد شد. با ثابت بودن فاصله بین ردیف‌ها، با تغییر فاصله کاشت روی ردیف‌ها در آزمایش اول ۲ تا ۳ و در آزمایش دوم ۷ تا ۸ عدد چغندرقند در هر متر مربع کاشته شد. بیشترین عملکرد ریشه و وزن کل بوتهٔ چغندرقند پس از سرزنی، در آزمایش اول ۸ تا ۱۰/۵ کیلوگرم و در آزمایش دوم ۲ تا ۳ کیلوگرم به دست آمد. نتایج پژوهش همچنین نشان داد در هنگام انتقال غده‌ها از طریق بالابرهای ماشین بارکن، در آزمایش اول به دلیل وزن و حجم بالای غده‌های چغندرقند، میزان آسیب مکانیکی بر اثر پرتاپ شدن چغندرقند معنی‌دار بود که باعث ضایعات بیشتر شد، ولی در آزمایش دوم به دلیل متناسب بودن اندازهٔ غده‌ها با شیارهای نقاله، محصول به سلامت به مخزن انتقال یافته است. بنابراین استفاده از تراکم بیشتر در هنگام کاشت علاوه بر صرفه‌جویی در زمان برداشت، ۷۵ درصد تلفات مکانیکی را کاهش می‌دهد و سودآوری و بازاریابی محصول را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد (Ghazavi & Moradi, 2011).

در تحقیقی، برداشت چغندرقند با کمباین اونزین (Unsin) آلمان، کمباین اشتول (Ashtv) آلمان و کمباین فورد (Ford) انگلستان و برداشت به صورت دستی (شاهد) مقایسه شدند. فاکتورهای آزمایش از نظر درصد چغندر برداشت نشده، درصد شکستگی، درصد گل و لای و درصد سبزینهٔ همراه با چغندرقند در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه و تحلیل آماری شدند و با استفاده از روش بودجه‌بندی جزیی، آثار اقتصادی کاربرد ماشین‌های برداشت چغندرقند با روش برداشت سنتی بررسی و مقایسه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که از نظر فاکتورهای اندازه‌گیری شده (درصد چغندرقند برداشت نشده، درصد شکستگی، میزان گل ولای و

درصد سبزینه همراه چغندر)، روش دستی بهتر از استفاده از ماشین‌های برداشت چغندرقند است. با در نظر گرفتن پرداخت یارانه از طرف کارخانه‌های قند برای برداشت مکانیزهٔ چغندرقند، برداشت با ماشین اونزین مقرون به صرفه‌تر از برداشت به روش سنتی است. ولی اگر از طرف کارخانهٔ قند یارانه‌ای پرداخت نشود، برداشت چغندرقند با استفاده از کمباین در عملکردهای کمتر از ۲۷ تن در هکتار با صرفه نخواهد بود (Solhjoo & Niromand-Jahromi, 1999). در تحقیق دیگری در مصر، روش‌های برداشت نیمه مکانیزه و مکانیزه (کمباین) تحت تاثیر سرعت ماشین در حین برداشت، مقدار رطوبت خاک و روش کاشت چغندرقند (مکانیکی و سنتی) مقایسه شدند. نتایج نشان داد، زمانی تلفات محصول و هزینه‌های برداشت به حداقل می‌رسد و بازده برداشت محصول افزایش می‌یابد که چغندرقند به صورت مکانیزه کشت و با استفاده از کمباین برداشت شود. در این تحقیق، سرعت پیشروی کمباین در حین برداشت بین ۱/۶ تا ۲/۴ کیلومتر بر ساعت و مقدار رطوبت خاک بین ۲۱ تا ۲۴٪ به عنوان مقادیر بهینه توصیه شده است (Morad *et al.*, 2007).

هدف از این مطالعه، بررسی و مقایسهٔ فنی سه روش برداشت چغندرقند (نیمه مکانیزه، مکانیزهٔ چند مرحله‌ای و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای با کمباین) در شهرستان جوین استان خراسان رضوی و به دست آوردن روشی مناسب‌تر در برداشت این محصول است. در این مطالعه، اثر روش‌های برداشت بر افزایش تراکم خاک نیز بررسی شده که تا کنون در مطالعات مشابه به آن توجه نشده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی محل پژوهش

این مطالعه در سال زراعی ۹۶-۹۵ در مزارع کارخانهٔ قند جوین در ۵ کیلومتری شهر نقاب، شهرستان جوین در استان خراسان رضوی، اجرا شد که در ارتفاع متوسط ۱۱۰۰ متر از سطح دریا، در دامنهٔ شمالی رشته کوه جغتای و دامنهٔ جنوبی کوه‌های آلاداغ و در محدودهٔ تقریبی ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد. در مزارع این کارخانه هر سال ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ هکتار زیر کشت محصول چغندرقند قرار می‌گیرد. میانگین عملکرد چغندرقند در مزارع این کشت و صنعت ۶۵ تن در هکتار با میانگین عیار قند ۱۷ است. حدود ۷۰ درصد از سطح زیر کشت چغندرقند با کمباین و بقیه با روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای یا نیمه مکانیزه برداشت می‌شود.

مزرعهٔ کمایستان ۱ به دلیل به کارگیری هر سه روش برداشت محصول چغندرقند و داشتن شرایط یکسان از لحاظ بافت خاک، به عنوان مزرعهٔ هدف برای اجرای این مطالعه انتخاب شد. بافت خاک این مزرعه لومی- سیلتی است و ترکیبات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. مواد آلی خاک ۵ و میزان رطوبت خاک هنگام برداشت در محدودهٔ ۱۷-۱۶ درصد بر پایهٔ وزن خشک اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- ترکیب بافت خاک مزرعهٔ آزمایشی

Table 1- Texture composition of the experimental field soil

اجزای بافت Texture components	درصد %
شن	27
سیلت	66
رس	7

نوع و مشخصات ماشین‌ها و وسایل مورد استفاده

در این مطالعه در روش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای از کمباین هولمر (Holmer, Teraa Dos, Germany) استفاده شد. این کمباین دارای دو محور هر یک با دو چرخ است که وزن آن در زمان پر بودن مخزن تقریبا به ۵۰ تن می‌رسد (شکل ۱). در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای، برای برگ‌زنی و طوقه‌زنی از ماشین برگ‌زن- طوقه‌زن SN-T-3000 ساخت شرکت سازه‌نگار، ایران، نوع سه ردیفه کششی و تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ (MF285) تک دیفرانسیل استفاده شد (شکل ۲).

شکل ۱- کمباین برداشت چغندرقند هولمر ساخت آلمان

Fig. 1. Sugar beet compbine harvester, Holmer made in Germany

شکل ۲- برگ‌زنی و طوقه‌زنی در روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای

Fig. 2. Sugar beet topping in multi-stage harvesting method

برای کندن و ردیف کردن چغندر، از ماشین ردیف کُن مدل SN-DR-6600 سوار شش ردیفه شرکت سازه نگار ایران و تراکتور ITM399 جفت دیفرانسیل استفاده شد. آرایش مناسب کاشت برای این روش برداشت ۵۰ ×۴۰ سانتی‌متر است (شکل ۳). برای بارگیری از ماشین بارکن نوع کششی اونزین (Unsinn, Germany) و تراکتور ITM 399 تک دیفرانسیل استفاده شد. (شکل ۴).

شکل ۳- کندن و ردیف کردن چغندرقند در روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای

Fig. 3. Sugar beet lifting and aligning in multi-stage harvesting method

شکل ٤- بارگیری در روش برداشت مکانیزهٔ چندمرحله‌ای

Fig. 4. Sugar beet loading in multi-stage harvesting method

در روش نیمه مکانیزه، ابتدا برای درآوردن غده‌ها از زمین از ماشین چغندرکَن سه ردیفه سوار ساخت قطعات آهنگری خراسان ایران و تراکتور جاندیر ۳۱۴۰ (JD 3140) استفاده شد (شکل ۵). کارهای دیگر شامل برگ زنی و بارگیری به شکل دستی و به‌عهدهٔ کارگر بود. در جدول ۲ بعضی از مشخصات ماشین‌های استفاده شده در سه روش برداشت چغندرقند آورده شده است.

شکل ۵- کندن چغندرقند در روش برداشت نیمه مکانیزه

Fig. 5. Sugar beet lifting in semi-mechanized harvesting method

جدول ۲- مشخصات ماشین‌های استفاده شده در روش‌های مختلف برداشت

Table 2. Machines specifications used for different harvesting methods

نام ماشین Machine name	روش برداشت Hrvesting method	عرض کار (متر) Working width (m)	نوع Type	توان کششی مورد نیاز (اسب بخار) Required drawbar power (hp)
برگ‌زن- طوقه‌زن	روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای	2.2	سوار	75
چغندرکَن و ردیف‌کُن	روش مکانیزهٔ چند مرحله ای	3	کششی	> 90
بارکن اونزین	روش مکانیزهٔ چند مرحله ای	1	کششی	> 75
چغندرکَن	روش نیمه مکانیزه	1.5	سوار	> 75

اندازه‌گیری شاخص‌ها

فاکتورهای مورد بررسی در این مطالعه شامل شاخص‌های فنی از جمله: ۱- میزان ضایعات محصول در حین برداشت، ۲- تغییر در میزان تراکم خاک (بر حسب شاخص مخروط[1]) و ۳- میزان مصرف سوخت و انرژی بود.

میزان ضایعات محصولات

ضایعات محصول شامل شکستگی کل محصول، طوقهٔ شکسته شده، محصول برداشت نشدهٔ سالم و خاک همراه محصول است.

میزان گل چسبیده به غده‌ها در حین برداشت فاکتوری تحت تاثیر روش برداشت است که جزء ضایعات مستقیم محصول نیست اما به طور غیر مستقیم و پس از ورود به کارخانهٔ قند می‌تواند عامل ایجاد هزینه و ضایعات قندی در مراحل شستشو و استخراج قند باشد.

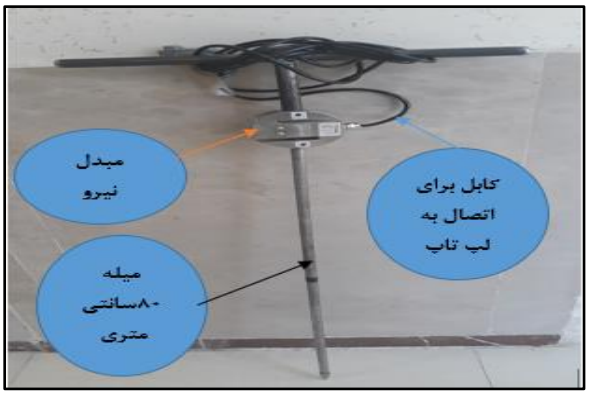
پس از جمع‌آوری داده‌های هر یک از موارد بالا درکرت‌های آزمایشی و توزین آنها، مولفه‌های ضایعات بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

اندازه گیری شاخص مخروط

برای مقایسهٔ تاثیر تردد ماشین بر افزایش تراکم خاک در روش‌های مختلف برداشت، شاخص مخروط تا عمق ۴۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بدین منظور، از یک نفوذسنج دستی (غیر تجاری) با قطر مخروط ۱۲/۸۳ میلی‌متر مطابق استاندارد ASAE S313.3 (Anon, 2003) استفاده شد (شکل ۶). برای اندازه‌گیری نیروی نفوذ، از یک مبدل نیروی S شکل (Korea Sewha) با حساسیت نامی ۲mV/V و

1- Cone Index

برای اندازه‌گیری عمق از شاخص‌های ماشین‌کاری شده روی میلهٔ مخروط با فاصله‌های یک اینچی استفاده شد. برای ثبت داده‌های مبدل نیرو در حین اندازه‌گیری نیز از یک دیتالاکر (آترون، مدل AL4، ایران) استفاده شد. با ثابت نگه‌داشتن تقریبی سرعت نفوذ در هر نقطه، تعداد قرائت‌های ثبت شده با حداکثر عمق ۴۰ سامتی‌متر متناظر شد و تغییرات شاخص مخروط تابعی از عمق به دست آمد. اندازه‌گیری‌ها، با ۵ تکرار، در هر روش برداشت در محل‌های بدون تردد و در محل تردد ماشین‌ها یادداشت شد.



شکل ٦- نفوذسنج دستی (غیرتجاری)

Fig. 6. Hand-pushed penetrometer (non-commercial)

میزان مصرف سوخت و میزان انرژی

برای اندازه‌گیری میزان مصرف سوخت در هر روش برداشت، از روش اندازه‌گیری باک‌پر (پر کردن مخزن سوخت پیش و پس از عملیات برای مسافت معین) استفاده شد. علاوه بر میزان سوخت مصرفی، میزان انرژی مصرفی از منابع انرژی متفاوت (ماشینی و انسانی) در هر یک از روش‌های برداشت نیز بر حسب مگاژول بر هکتار محاسبه شد. برای تبدیل میزان انرژی سوخت مصرفی (گازوییل)، از ضریب تبدیل ۵۶/۳۱ مگاژول بر لیتر (Kazemi & Zare, 2014) و برای محاسبهٔ میزان انرژی نیروی انسانی در یک روز کاری (۸ ساعت) از ضریب تبدیل ۴/۳۲ مگاژول (Mohammadi-Mazraeh & Nazarzadeh-Oughaz, 2008) استفاده شد.

طرح آزمایشی

در اجرای این پژوهش، از طرح آزمایشی کاملا تصادفی استفاده شد که دارای سه تیمار و ۵ تکرار بود. تیمارهای طرح شامل روش‌های برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای (کمباین)، مکانیزهٔ چند مرحله‌ای و نیمه مکانیزه هستند. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 24 تحلیل شدند. پس از تجزیهٔ واریانس بین تیمارها، آزمون LSD معنی‌داری تفاوت بین میانگین‌ها دنبال شد.

نتایج و بحث

میزان ضایعات در هر یک از روش‌های برداشت

جدول ۳، نتایج تجزیهٔ واریانس ضایعات چغندرقند شامل آسیب به طوقه، آسیب به کل

محصـــول، و غـــدهٔ برداشـــت نشـــده در هکتـــار را در روش‌های مختلف برداشت نشان می‌دهد.

جدول۳- جدول تجزیهٔ واریانس میزان ضایعات در هر یک از روش‌های برداشت

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) of sugar beet loss for each of harvesting methods

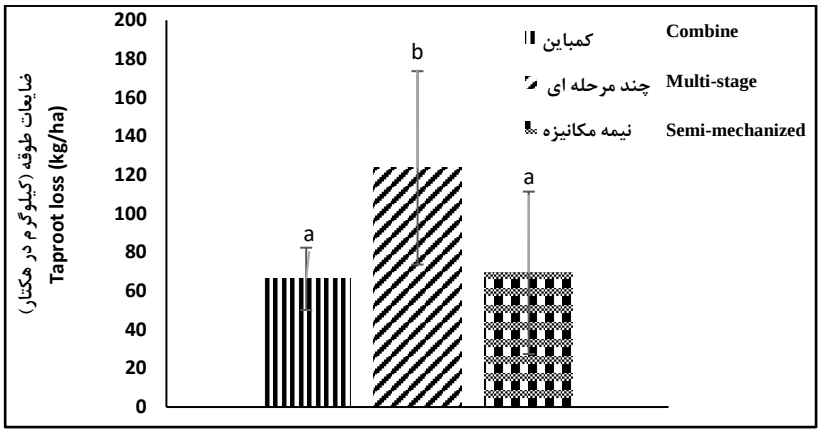
		مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares	F
طوقه شکسته	بین گروها	10376.710	2	5188.355	5.471*
	داخل گروه	11380.689	12	948.391	
	کل	21757.399	14		
آسیب به کل محصول	بین گروه	2259707.013	2	1129853.506	48.270*
	داخل گروه	280881.434	12	23406.786	
	کل	2540588.447	14		
غده برداشت نشده سالم	بین گروه	1163793.733	2	581896.867	7.820*
	داخل گروه	892903.600	12	74408.633	
	کل	2056697.333	14		

ns معنی‌دار نبودن؛ * معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد؛ و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

ns non-significant; * significant at 5%; **significant at 1%

جـدول ۳ نشـان مـی‌دهـد کـه اخـتلاف معنـی‌داری بـین تیمارهـا از لحـاظ میـزان ضـایعات محصـول در سـطح P< ۰/۰۵ وجـود دارد ولـی داخـل گـروه (بـین تکـرارهـای هـر تیمـار) تفـاوت معنـی‌داری وجـود نـدارد. شـکل ۷ نشـان‌دهندهٔ میـزان ضـایعات طوقـه در روش‌های مختلـف برداشـت اسـت. میلـه‌هـای نشـان داده شـده در ایـن شـکل بیـانگر میـزان انحـراف اسـتاندارد تکرارهاسـت. همـان‌طـور کـه نشـان داده شـده اسـت، بیشـترین ضـایعات طوقـه در روش برداشـت مکـانیزهٔ چنـد مرحلـه ای بـا ۱۲۳/۶۶ کیلـوگرم در هکتـار و پـس از آن در روش‌هـای نیمـه مکـانیزه (۶۹/۴ کیلـوگرم در هکتـار) و کمبـاین (۶۶/۳ کیلـوگرم در هکتـار) اسـت. علت بـالا بـودن میـزان ضـایعات طوقـه در روش برداشـت مکـانیزه چنـد مرحلـه‌ای آن اسـت کـه کنتـرل دقیـق ارتفـاع بـرش بـا ماشـین طوقـه‌زن ممکـن نیسـت در حـالی کـه در کمبـاین هـد برداشـت دارای حسـگری اسـت بـرای کنتـرل ارتفـاع بـرش طوقـه. نکتـهٔ شـایان توجـه ایـن اسـت کـه غلظـت قنـد در قسـمت طوقـهٔ چغندرقنـد کمتـر اسـت و از ایـن رو بـا جـدا کـردن ایـن قسـمت از غـده قبـل از برداشـت از ورود جـرم بـدون بهـره بـه فراینـد استحصـال قنـد در کارخانـه جلـوگیری می‌شود. بـا ایـن حـال، در روش‌هـای مختلـف برداشـت و در صورتی‌که طوقه بـا طـول بـزرگ‌تـر از غـده جـدا شـود می‌تواند موجب ضـایعات قنـدی بخـش اصـلی غـده شـود. مقایسـهٔ وزن طوقـه‌هـای جمـع‌آوری شـده مـی‌توانـد مبنـایی بـرای مقایسـه و تحلیـل ضـایعات حاصـل از اجـرای هـر روش برداشـت باشـد. شـکل ۷ همچنـین نشـان مـی‌دهـد تفـاوت معنـی‌داری در سـطح احتمـال P< ۰/۰۵ بـین میـزان ضـایعات طوقـه در روش برداشـت مکـانیزهٔ چندمرحلـه‌ای بـا دو روش برداشـت مکـانیزهٔ تـک مرحلـه‌ای و نیمـه مکـانیزه وجـود دارد، امـا تفـاوت بـین دو روش برداشـت مکـانیزهٔ تـک مرحلـه‌ای و نیمه مکانیزه معنـی‌دار نیسـت. در واقـع مـی تـوان میـزان وزن طوقـه جمـع‌آوری شـده در هـر دو روش نیمـه مکـانیزه و مکـانیزهٔ تـک مرحلـه‌ای را مبنـایی بـرای ارتفـاع صـحیح بـرش طوقـه در نظـر گرفـت، زیـرا در

روش نیمه مکانیزه این برش به شکل دستی و با نظارت چشمی اتفاق می‌افتد و در روش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای نیز، همان‌طور که گفته شد، از حسگر برای تنظیم ارتفاع برش طوقه استفاده می‌شود. به منظور نتیجه‌گیری دقیق‌تر، پیشنهاد می‌شود که با اندازه‌گیری غلظت قند در طوقه‌های جمع‌آوری شده از هر روش برداشت، شاخصی برای محاسبهٔ مستقیم ضایعات قندی طوقه در نظر گرفته شود.



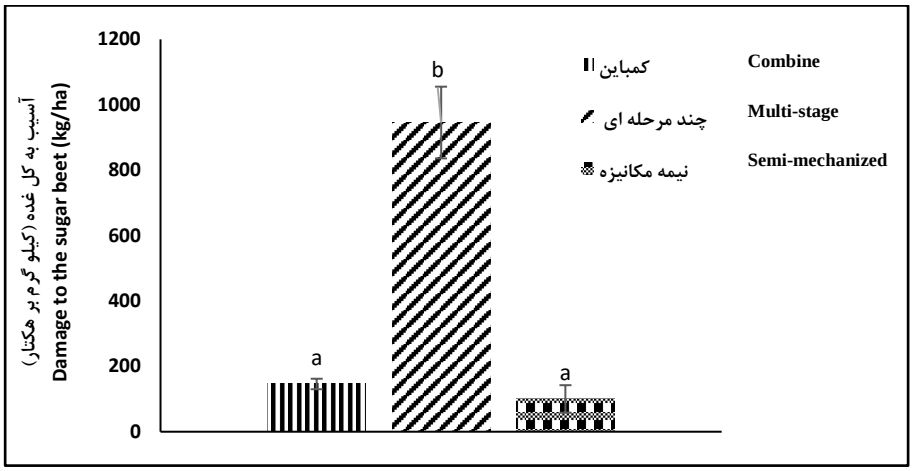
شکل ۷- میزان ضایعات طوقه در روش‌های مختلف برداشت

(حروف متفاوت روی میله‌ها، تفاوت معنی‌دار بین مقادیر را نشان می‌دهد)

Figure 7. Sugar beet taproot loss for different harvesting methods

(The letters on the bars show significant difference between the values)

شکل ۸، مقایسهٔ میزان ضایعات آسیب به کل غده را در بین روش‌های برداشت نشان می‌دهد. در این شکل، میزان آسیب در روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای (۹۴۵/۶ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از دو روش برداشت مکانیزهٔ تک مرحله ای (۱۴۶ کیلوگرم در هکتار) و نیمه مکانیزه (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) است؛ دلیل آن، چند مرحله‌ای بودن روش برداشت است که در هر مرحله از برداشت (برگ‌زنی و طوقه‌زنی، کندن و ردیف‌کردن و بارگیری) به شکلی به غده‌ها آسیب وارد می‌شود. در مرحلهٔ کندن و ردیف کردن، اگر ماشین تنظیم نباشد تیغه‌ها به محصول آسیب وارد می‌کنند و در مرحلهٔ بارگیری، افتادن غده از روی بالابر ماشین بارکن یا افتادن محصول از روی کامیون به زمین (به علت ناهماهنگی بین رانندهٔ تراکتور و کامیون حین بارگیری) می‌تواند باعث آسیب‌دیدگی غده شود. آسیب‌دیدگی‌های مکانیکی غده ها فساد و ضایعات قندی را در حین انبارداری در سیلوهای چغندرقند در کارخانه تسریع می‌کنند و از این رو به‌هنگام خرید محصول افت لحاظ می‌شوند. آنالیز معنی‌داری میزان ضایعات ناشی از آسیب‌های وارد شده به کل غده‌ها نشان می‌دهد تفاوتی معنی‌دار (در سطح ۰/۰۵) بین روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای با دو روش برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه وجود دارد، ولی این تفاوت بین روش‌های برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه معنی‌دار نیست (شکل ۸).



شکل ۸- میزان آسیب به کل غده در روش‌های مختلف برداشت

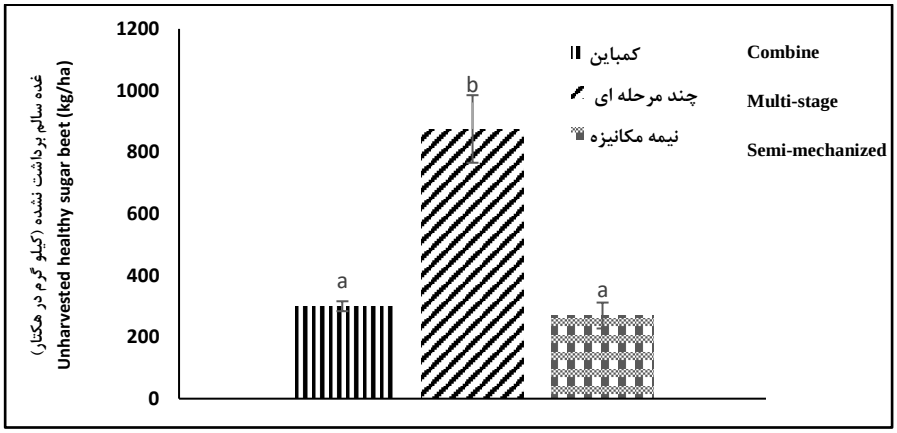
(حروف متفاوت روی میله‌ها، تفاوت معنی‌دار بین مقادیر را نشان می‌دهد)

Fig. 8. Damage to the sugar beet for different harvesting methods.

(The letters on the bars show significant difference between the values)

شکل ۹، میزان غده‌های برداشت نشده را در روش‌های برداشت نشان می‌دهد. دیده می‌شود که میزان غدهٔ برداشت نشده در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای (۸۷۵ کیلوگرم در هکتار) به طور معنی‌دار بیشتر از دو روش دیگر است که دلیل آن، افتادن چغندر در هنگام بارگیری از روی بالابرنده بارکن و از روی کامیون است.

بین روش برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه، از نظر میزان ضایعات غده برداشت نشدهٔ سالم، تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. این بخش از ضایعات محصول باعث ضایعات قندی قابل توجهی خواهد بود زیرا غلظت قند در بخش اصلی غده، نسبت به طوقه، به مراتب بالاتر است و از این رو در روش مکانیزه چند مرحله‌ای نیاز به بهینه‌سازی عملیات بارکردن (هم از نظر مکانیزم‌های ماشین بارکن و هم از نظر تنظیم حرکت ماشین نسبت به کامیون) ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۹- میزان غدهٔ سالم برداشت نشده در روش های مختلف

(حروف متفاوت روی میله‌ها، تفاوت معنی‌دار بین مقادیر را نشان می‌دهد)

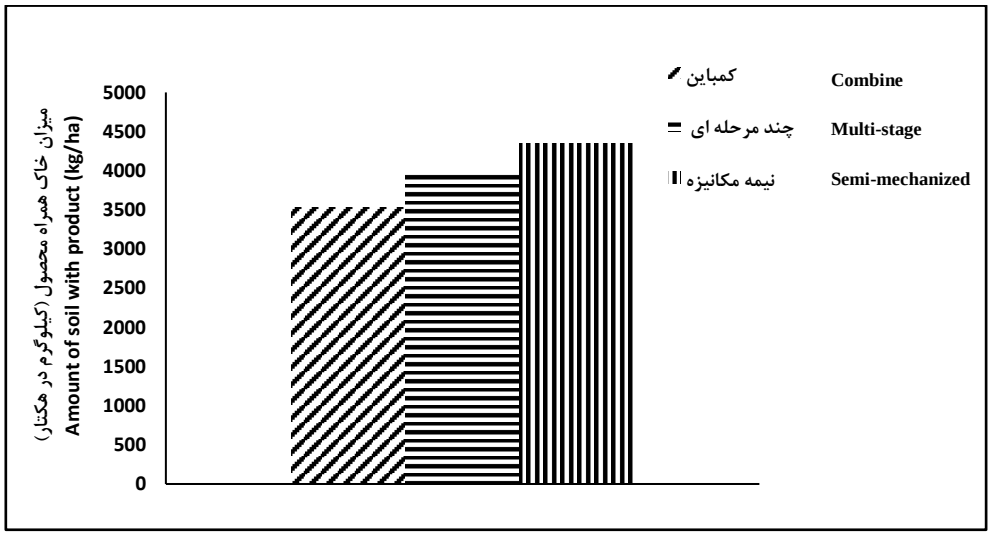
Figure 9. Unharvested healthy sugar beets for different harvesting methods.

(The letters on the bars show significant difference between the values)

میزان خاک همراه محصول در روش‌های برداشت

تجزیهٔ واریانس میزان خاک همراه محصول در روش‌های مختلف برداشت نشان می‌دهد اختلاف معنی‌دار بین سه روش برداشت وجود ندارد. میزان خاک خروجی در هکتار در هر یک از روش‌های برداشت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میزان خاک همراه محصول در روش نیمه مکانیزه (۴۳۴۴ کیلوگرم بر هکتار) کمی بیشتر از میزان خاک همراه محصول در روش‌های مکانیزه چند مرحله‌ای (۳۹۸۴ کیلوگرم بر هکتار) و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای (۳۵۲۸ کیلوگرم بر هکتار) است.

در روش‌های برداشت مکانیزه (چند مرحله‌ای یا کمباینی)، غده چغندرقند بعد از خارج شدن از خاک و ردیف شدن، روی بالا برنده‌های ماشین بارکن تحت ارتعاش قرار می‌گیرد و خاک چسبیده به آن تا حدی جدا می‌شود. به همین علت میزان خاک در روش‌های مکانیزه کمتر است تا در روش برداشت نیمه مکانیزه. رطوبت خاک در حین برداشت می‌تواند عامل موثری در میزان خاک چسبیده به غده باشد. در این خصوص، بسته به نوع بافت خاک و میزان چسبندگی آن، اثر رطوبت می‌تواند متفاوت باشد که نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد.



شکل ۱۰- میزان خاک همراه چغندرقند در روش‌های مختلف برداشت

Fig. 10. Amounts of soil sticked to the sugar beet for different harvesting methods

میزان مصرف سوخت در روش‌های برداشت

تجزیهٔ واریانس میزان سوخت مصرفی تفاوت‌های معنی‌دار را در سطح P<۰/۰۱ بین روش مکانیزه چند مرحله‌ای با روش‌های نیمه مکانیزه و مکانیزهٔ تک مرحله ای نشان می‌دهد (جدول ۴). شکل ۱۱ نیز میانگین سوخت مصرفی را در روش‌های برداشت چغندر بر حسب لیتر در هکتار نشان می‌دهد. میزان سوخت مصرفی (گازوییل) در روش‌های برداشت مکانیزهٔ تک مرحله‌ای و نیمه مکانیزه به ترتیب ۱۵ و ۱۹/۵ لیتر بر هکتار معادل ۲۵ و ۳۳ درصد میزان سوخت مصرفی درروش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای (۶۰ لیتر در هکتار) است که در آن از چند ماشین و تراکتور برای تکمیل عملیات برداشت محصول استفاده می‌شود.

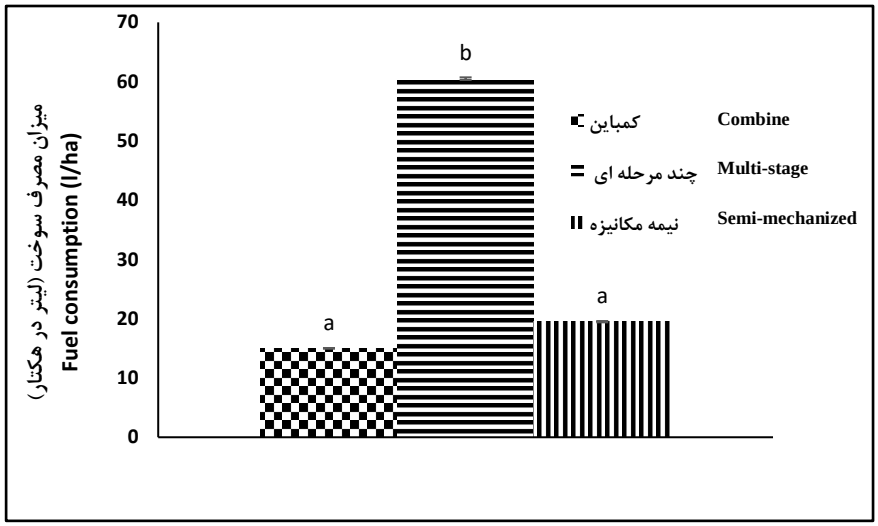
جدول ٤- جدول تجزیهٔ واریانس میزان سوخت مصرفی در هریک از روش‌های برداشت

Table 4. Analysis of variance of fuel consumption for each of harvesting methods.

	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares	F
بین گروه	6247.957	2	3123.972	13125.961**
داخل گروه	2.856	12	0.328	
کل	6250.813	14		

ns معنی‌دار نبودن؛ * معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد؛ و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

ns non-significant; * significant at 5%; **significant at 1%

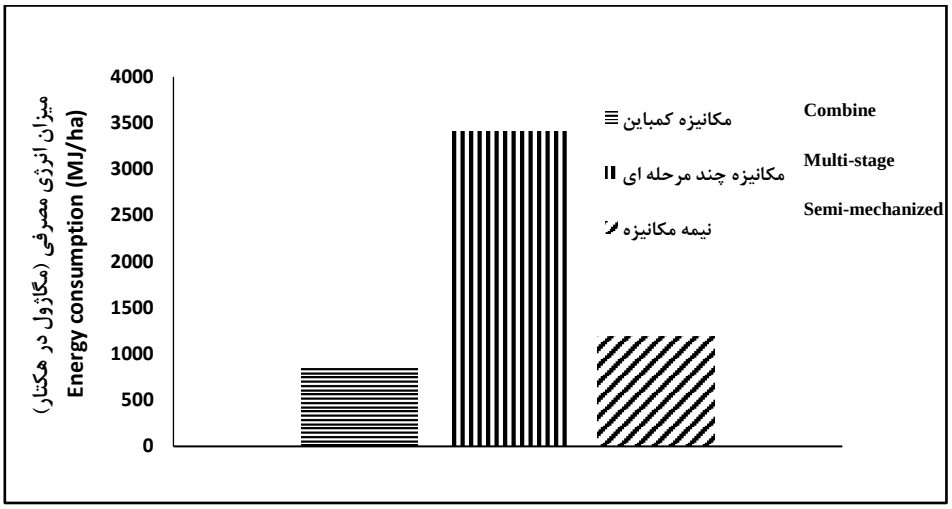


شکل ۱۱- میزان سوخت مصرفی در روش‌های مختلف برداشت

Fig. 11. Fuel consumption for different harvesting methods

میزان انرژی مصرفی در روش‌های برداشت

شکل ۱۲، میزان انرژی مصرفی را در روش‌های مختلف برداشت نشان می‌دهد. بیشترین میزان انرژی مصرفی (۳۴۰۹ مگاژول در هکتار) در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای و کمترین آن (۸۴۵ مگاژول بر هکتار) درروش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای به دست آمده است. علت بالا بودن میزان انرژی مصرفی در روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای، بالا بودن میزان سوخت مصرفی است. نتیجهٔ حاصل در این مطالعه با نتایج بررسی‌های محمدی مزرعه و همکاران (Mohammadi-Mazrae *et al.*, 2012) در سه استان خراسان، آذربایجان غربی و قزوین هم‌خوانی نسبتا نزدیکی دارد؛ تحقیقات آنها نشان می‌دهد در روش چند مرحله‌ای بیشترین مقدار مصرف انرژی اتفاق می‌افتد ولی روش نیمه مکانیزه، با اختلاف کمی نسبت به روش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای، کمترین میزان مصرف انرژی را دارد.



شکل ۱۲- میزان انرژی مصرفی در هریک از روش‌های برداشت

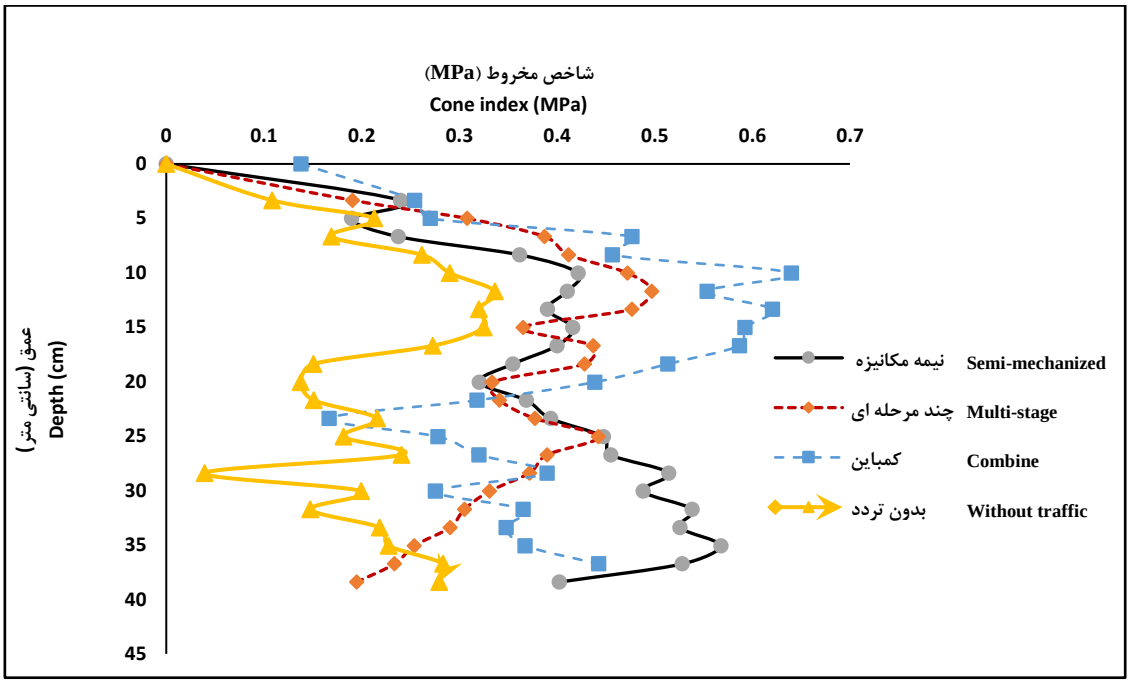
Fig. 12. Energy consumption for each of harvesting methods

مقایسهٔ شاخص مخروط خاک

شکل ۱۳، پروفیل ۴۰ سانتی‌متری از شاخص مخروط را پس از اجرای روش‌های مختلف برداشت چغندرقند، نسبت به پروفیل شاهد (بدون تردد)، نشان می‌دهد. پروفیل شاهد در محل‌های بدون تردد ماشین بعد از برداشت اندازه گیری شده است. در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر، روش برداشت با کمباین باعث بیشترین افزایش در شاخص مخروط شده است که دلیل آن بالا بودن وزن کمباین برداشت، نسبت به وزن ماشین های دیگر در دو روش برداشت مکانیزه چند مرحله‌ای و نیمه مکانیزه است. وزن کمباین زمانی که مخزن آن پر می‌شود تقریبا به ۵۰ تن می‌رسد که این وزن پس از توزیع شدن روی سطح تماس تایرها با خاک، باعث اعمال تنش بزرگ بر خاک و پیرو آن افزایش تراکم خاک می‌شود. بعد از روش مکانیزهٔ تک مرحله‌ای، بیشترین افزایش در شاخص مخروط در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای مشاهده می‌شود که دلیل آن تکرار تردد تراکتورها در عملیات متوالی و همچنین عبور کامیون حمل چغندر است. نکتهٔ قابل تامل این است که عبور تراکتور با وزن کمتر حتی با تکرار تردد اثر تراکمی کمتری نسبت به کمباین با وزن بیشتر ولی با یک بار تردد داشته است. اصلاح فنی کمباین‌ها با استفاده از تعداد چرخ‌های بیشتر در هر محور، استفاده از تایرهایی با فشار باد کمتر (تا جای ممکن)، یا نصب چرخ تسمه[1] (به‌جای چرخ) می‌توانند عواملی فنی باشند تا اثر تراکمی کمباین را کاهش دهند (Arvidsson *et al.*, 2011; Mehrdadian *et al.*, 2011). برخی از این موارد نیاز به تغییرات فنی قابل توجهی روی کمباین دارد که ممکن است چندان آسان نباشد.

راه دیگر، کنترل وضعیت رطوبت خاک و مطالعهٔ ظرفیت باربری خاک تحت تاثیر رطوبت برای تحمل تنش اعمال شده از تایرهای کمباین بدون افزایش تراکم است (Keller *et al.*, 2012; Gut *et al.*, 2015). از آنجا که کندن غده‌ها از خاک در قسمت هد کمباین تحت تاثیر رطوبت خاک است، هر گونه تصمیم‌گیری به منظور کنترل رطوبت خاک برای کاهش اثر تردد بر تراکم خاک باید متناسب با راندمان و کیفیت کندن غده از خاک در قسمت هد کمباین باشد (Khayamim, 2010).

1- Track



شکل۱۳- تغییرات شاخص مخروط بر حسب عمق خاک بعد از اجرای هر یک از روش‌های برداشت در مقایسه با شاهد (بدون تردد)

Fig. 13. Variations in cone index vrsus depth after performing the harvesting methods as compared to control (without traffic)

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ضایعات محصول (مجموع ضایعات طوقه، شکستگی غده و غده‌های برداشت نشده) در حین برداشت در روش مکانیزهٔ چند مرحله‌ای معادل ۳ درصد عملکرد چغندر و کمترین آن در روش نیمه مکانیزه با ۰/۶۷ درصد عملکرد دیده می‌شود. بیشترین میزان مصرف سوخت در روش‌های برداشت متعلق به روش برداشت مکانیزهٔ چند مرحله‌ای است. با در نظر گرفتن خسارت‌های اقتصادی ناشی از ضایعات در حین برداشت محصول که به شکل ضایعات قندی از دست رفته لحاظ می‌شود و همچنین میزان سوخت مصرفی، روش چند مرحله‌ای از نظر اقتصادی مقرون به صرفه به نظر نمی‌رسد. بیشترین افزایش در تراکم خاک در روش برداشت با کمباین دیده می‌شود. با توجه به این امر می‌توان انتظار داشت که بعد از برداشت چغندرقند با کمباین، میزان انرژی مصرفی در عملیات خاک ورزی بیشتر باشد. در این خصوص به راهکارهای فنی برای کاهش اثر تراکم خاک با استفاده از کمباین نیاز خواهد بود. برای مثال، می‌توان با استفاده از تایرهای با سطح تماس بزرگ‌تر و یا با فشار باد کمتر از میزان افزایش تراکم خاک کاست. کمترین میزان سوخت مصرفی در روش کمباین دیده می‌شود. علاوه بر این، اجرای به موقع برداشت با کمباین از مزایای دیگر است. به رغم اینکه از نظر فاکتورهای ضایعات محصول، مصرف سوخت و میزان انرژی تفاوت زیادی بین روش‌های نیمه مکانیزه و مکانیزهٔ تک مرحله‌ای مشاهده نمی‌شود، از نظر هزینهٔ کارگری و ظرفیت مزرعه‌ای، در شرایطی که به خصوص از نظر اجرای به موقع برداشت محدودیت وجود داشته باشد، روش نیمه مکانیزه توصیه نمی‌شود. در کل، اگر ارائهٔ راهکارهایی به منظور کاهش اثر تراکم خاک و تامین

تعداد مورد نیاز کمباین ممکن باشد، این روش برداشت به عنوان مناسب‌ترین روش توصیه می‌شود. اما با توجه به اثر شدیدتر در تراکم خاک و پیرو آن افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های خاک‌ورزی در استفاده از کمباین، نیاز به مطالعه تکمیلی در خصوص مقایسه انرژی و هزینه روش های مختلف برداشت با لحاظ عملیات خاک‌ورزی بعد از برداشت چغندرقند احساس می‌گردد. همچنین مطالعات تکمیلی با مقایسه اقتصادی روش‌های برداشت جهت انتخاب روش بهینه برداشت توصیه می‌گردد.

قدردانی

از همکاری و پشتیبانی فنی پرسنل کشت و صنعت جوین در اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Arvidsson, J., Westlin, H., Keller, T., & Gilbertsson, M. (2011). Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research, 117*, 103-109.

Anon. (2003). *ASAE Standards S313.3*. Soil cone penetrometer, Revised Feb 04, St. Joseph, MI: ASAE.

Azad, K. (1999). Technical and economical evaluation of three harvesting methods of sugar beet in Azarbaijan-gharbi province (Urmia) (Master Thesis) Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)

Cullivand, M. (1987). *Sugar Beet Farming*. Sugar Beet Seed Institute Press, Tehran, Iran (in Persian)

Ghazavi, M. A., & Moradi, M. (2011). *Effects of plant density and planting arrangement on mechanical losses of sugar beet harvest. First National Strategic Conference on Achieving Sustainable Agriculture.* May 26. Payame Noor University of Khuzestan Province. (in Persian)

Gut, S., Chervet, A., Stettler, M., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Lamandé, M., Schjønning, P., & Keller, T. (2015). Seasonal dynamics in wheel load-carrying capacity of a loam soil in the Swiss Plateau. *Soil Use* and *Management, 31*, 132-141.

Kazemi, H., Zare, S. (2014). Investigation and comparison of energy flow in wheat fields of Gorgan and Marvdasht townships. *Cereal Research, 4*(3), 211-227. (in Persian)

Keller, T., Arvidsson, J., Schjonning, P., Lamande, M., Stettler, M., & Weisskopf, P. (2012). In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. *Soil Science, 177*, 490-497.

Khayamim, S. (2010). Estimation of root pulling force and measurement of root losses and soil transfer along with different root shapes of sugar beet. *Journal of Sugar Beet, 25*(2), 125-140.

Mehrdadian, A., Asoodar, M. A., & Abbasi, F. (2011). Effect of sugarcane harvest machinery traffic on soil compaction in south west of Khuzestan. *Journal of Agricultural Engineering Research, 34*(2), 1-14. (in Persian)

Mohammadi-Mazrae, H., & Nazarzadeh-Oughaz, S. (2008). *Energy required for different methods of sugar beet harvesting. Proceedings of the 5th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization.* Aug. 27. Mashhad, Iran. (in Persian)

Mohammadi-Mazrae, H., Nazarzadeh, S., Sherafati, K., & Amirshaghaghi, F. (2012). Energy required for different methods of sugar beet harvesting. *Research Report*. Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Karaj, Iran. (in Persian)

Morad, M., Elsaid, G. H., & El-Sharabasy, M. M. A. (2007). Comparative study between manual and mechanical methods of harvesting sugar beet crop. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, *24*(4), 793-813.

Sakenian-Dehkordi, N., Lotfalian-Dehkordi, A. A., & Ostad-Hadi, J. (2016). *Harvesting Machines*. Iranian Ministry of Training and Education. (in Persian)

Solhjoo, A. A., & Niromand-Jahromi, M. (1999). Comparison of performance of sugar beet harvesting machines. *Research Report*. No. 18756423. Ministry of Agriculture. (in Persian)

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.21/No.74/Spring & Summer 2020/P:219-236

Research Paper

Technical Comparison of Semi-Mechanized, Multi-Stage Mechanized and Combine Harvesting Methods of Sugar Beet in Jovein Town of Khorasan Razavi Province

A. Zourabadi, M. Naderi-Boldaji*, A. Abedi, A. Lotfalian-Dehkordi and E. Shahbazi

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: m.naderi@ut.ac.ir
Received: 7 June 2018, Accepted: 26 November 2018

Abstract

In this study, three harvesting methods of sugar beet, including semi-mechanized, multi-stage mechanized and single-stage mechanized (by combine) in Khorasan Razavi province (Jovein town) were compared from the view of some technical factors. The total losses of sugar beet, including the weight of cut crown beets, damaged beets and unharvested healthy beets were 1944 kg ha^{-1} (i.e. 3% of yield), for for multi-stage method; for single-stage and semi-mechanized methods this figure reduced to 542 and 454 kg ha^{-1} respectively. The highest increase in soil compaction in terms of cone index was measured for the single-stage method followed by the multi-stage method. The fuel consumption in the single-stage and semi-mechanized methods were 25% and 33% of the fuel consumption in multi-stage mechanized method. Energy consumption in single-stage and semi-mechanized methods was less than what had been consumed in multi-stage method, 24% and 34% respectively. Results also showed that single-stage mechanized (combine) harvesting method, compareing with two other methods, had relative advantages, except in soil compaction, for which some technical optimizations would be needed.

Keywords: Fuel Consumption, Soil Compaction, Sugar Beet Losses