تدوین مدل زمان‌بندی عملیات کاشت بر اساس بهینه‌سازی هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات

مهدی خانی[۱*]، علیرضا کیهانی[۲]، هومن شریف‌نسب[۳]، رضا علیمردانی[۲]، غلامرضا پیکانی[۴]

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون، گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران mahdikhani@ut.ac.ir
۲- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران
۳- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
۴- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تهران

چکیده:

با مشخص شدن تعداد ماشین‌های یک مزرعه، هزینه‌های ثابت و متغیر ماشین‌های کشاورزی قابل محاسبه خواهند بود ولی هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، متأثر از زمان‌بندی عملیات‌های زراعی نیز می‌باشد. در صورت انجام کل کاشت در زمان بهینه‌ی کاشت هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که بتوان با استفاده از تمام ظرفیت ماشین‌های کاشت، عملیات کاشت را در کوچک‌ترین بازه‌ی زمانی ممکن انجام داد، هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات حداقل خواهد بود. اما در شرایطی که ظرفیت کاری ماشین‌ها کافی نباشد ممکن است عملیات کاشت و تهیه بستر تلاقی کرده و عملاً نتوان در بازه‌ی زمانی مورد نظر عملیات کاشت را تکمیل کرد. در چنین شرایطی، زمان‌بندی عملیات کاشت با روش‌های عددی ممکن خواهد بود. در این مطالعه با تعریف شاخصی با عنوان شاخص به موقع انجام نشدن عملیات، مدلی بر مبنای حل عددی برای تعیین زمان بهینه برای آغاز عملیات کاشت ارائه شده است. پس از اجرای مدل با استفاده از داده‌های ورودی، زمان بهینه‌ی آغاز کاشت تعیین شد و با مقایسه‌ی شاخص به موقع انجام نشدن حاصل از این زمان و دیگر زمان‌های آغاز کاشت در همسایگی این نقطه، کارایی مدل به اثبات رسید.

واژگان کلیدی: شاخص به موقع انجام نشدن، زمان بهینه‌ی آغاز کاشت، حل عددی.

مقدمه

یک سامانه‌ی ماشینی کشاورزی، دارای سه دسته هزینه شامل هزینه‌های ثابت (مالکیت)، هزینه‌های متغیر (کاربرد) و هزینه‌های به موقع انجام نشدن عملیات می‌باشد. با تغییر تعداد و اندازه‌ی ماشین‌های موجود در مزرعه هر سه دسته‌ی هزینه‌ها تغییر می‌کنند. اما هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، متأثر از زمان‌بندی عملیات‌های زراعی نیز می‌باشد. زمان‌بندی فرآیند تصمیم‌سازی است که با تخصیص منابع به کارها در بازه‌های زمانی سر و کار دارد و هدف آن بهینه‌سازی یک یا چند هدف است (Pinedo, 2008). اورفانو و همکاران (۲۰۱۳) یک روش زمان‌بندی برای کارهای ترتیبی ارائه کردند که با توجه به عواملی مانند مکان و مساحت مزارع، ماشین‌های کشاورزی موجود و برآورد زمان اجرای عملیات، تعیین می‌شود که هر ماشین در چه مزرعه‌ای، در چه ترتیبی و

در چه دوره‌ای از زمان کار کند تا کل زمان کار حداقل شود. باچتیس و سورنسن (۲۰۱۰) که مسئله‌ی زمان‌بندی برای عملیات‌های کشاورزی را مانند مسائل مسیریابی وسیله نقلیه حل کردند. دیگر روش‌های مورد استفاده برای زمان‌بندی عملیات‌های مزرعه عبارتند از: شبکه‌های پتری مرکب[1] (Guan *et al.*, 2008) و فرا ابتکاری[2] (Guan *et al.*, 2009)، روش گرت[3] (Abdi *et al.*, 2010)، روش جستجوی تپه‌نوردی[4] (Wijngaard, 1988).

در این پژوهش، مبنای زمان‌بندی عملیات کشاورزی، هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات می‌باشد. یعنی زمان اجرای کارهای مزرعه به چه صورتی باشد مقدار این هزینه کاهش یابد. در فصل کاشت در میان این چهار عملیات شخم، دیسک، تسطیح و کاشت، عملیاتی که بیش‌ترین حساسیت به زمان کار دارد، عملیات کاشت می‌باشد. بنابراین هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، در رابطه با این عملیات در نظر گرفته می‌شود. برای عملیات کاشت، می‌توان یک روز خاص، به عنوان زمان بهینه‌ی کاشت تعیین کرد که در صورتی که کل عملیات کاشت، در آن زمان انجام گیرد، بیش‌ترین عملکرد محصول را نتیجه داده و هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، برابر با صفر، در نظر گرفته می‌شود. با هر روز تأخیر یا تعجیل در زمان عملیات، هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات افزایش می‌یابد. در مساحت مشخصی از یک زمین، هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات برابر است با افت عملکرد ناشی از عدم انجام عملیات در زمان مناسب، ضرب در ارزش واحد محصول. بنابراین طبق معادله (۱) این هزینه قابل محاسبه است.

(۱)

$$C_{tt} = A \times Y \times L \times V$$

که در آن، C_{tt} نشان دهنده‌ی هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات (ریال)، Y، عملکرد محصول (تن در هکتار)، L، نسبت افت عملکرد (اعشار)، A، مساحت مزرعه (هکتار) و V، ارزش واحد محصول (ریال در تن) می‌باشد.

در منابع، هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات طبق رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود (ASABE Standards. 2006).

(۲)

$$C_{tt} = \frac{K_t \times A^2 \times Y \times V}{Z \times dh \times C_{at} \times plpwd}$$

که plpwd، احتمال روز کاری برای کاشت (اعشار)، dh، تعداد ساعات کاری در یک روز، C_{at}، ظرفیت مجموع ماشین‌های کاشت (هکتار در ساعت) و K_t= ضریب افت عملکرد به موقع انجام نشدن (روز/۱) می‌باشد. در صورتی که زمان بهینه‌ی کاشت در وسط بازه‌ی کار قرار گیرد عدد Z، ، برابر با ۴ و اگر این نقطه در ابتدا و یا انتهای بازه‌ی کار قرار گیرد برابر با ۲ خواهد بود.

این معادله با پیش‌فرض‌های زیر ایجاد شده است:

۱- کاهش عملکرد محصول با فاصله‌ی زمان کاشت تا نقطه‌ی بهینه، رابطه‌ی خطی دارد و تعجیل و تأخیر در عملیات به یک میزان باعث افت عملکرد می‌شود. بنابراین می‌توان افت عملکرد را با معادله‌ی (۳) نمایش داد.

1- hybrid petr
2- metaheuristics
3- Graphical Evaluation and Review Technique
4- hill-clim

(۳)

$$L(t) = K_t \times |t - op|$$

۲- ظرفیت کلی ماشین‌ها ثابت است. یعنی همواره تعداد ماشین‌های کاشت فعال ثابت است. بنابراین عملیات کاشت می‌تواند در دوره‌ی کمینه‌ی کاشت (mplp) که نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت (op) نیز در وسط آن قرار گرفته، تکمیل شود. طول این بازه با معادله‌ی (۴) نشان داده می‌شود،

(۴)

$$mplp = \frac{A}{C_{at} \times dh \times plpwd}$$

۳- زمان‌بندی اجرای عملیات کاشت، تنها در ۳ حالت صورت می‌گیرد.

حالت اول زمانی که عملیات کاشت در دوره‌ی حداقلی کاشت انجام شود. در این حالت عملیات کاشت در ابتدای دوره‌ی حداقلی (smplp= op-0.5×mplp) آغاز شده و در انتهای دوره‌ی حداقلی (emplp= op+0.5×mplp) پایان می‌پذیرد. در صورتی که بتوان عملیات کاشت را در این زمان انجام داد، کمترین هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات حاصل می‌شود و مقدار Z برابر با ۴ خواهد بود. حالت دوم وقتی که عملیات کاشت در نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت (op) آغاز شده و با فاصله‌ی دوره‌ی حداقلی کاشت بعد از این نقطه (op+mplp) به پایان برسد (Z=2). حالت سوم وقتی که عملیات کاشت در نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت (op) تکمیل شده باشد. بنابراین باید در فاصله‌ی دوره‌ی حداقلی کاشت قبل از این نقطه (op-mplp) آغاز شده باشد (Z=2).

در صورتی که بتوان عملیات کاشت در دوره‌ی حداقلی انجام داد، کمترین میزان هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات حاصل خواهد شد و نیازی به روش‌های بهینه‌سازی برای زمان‌بندی عملیات کاشت نمی‌باشد. اما ممکن است در شرایطی، امکان تکمیل عملیات کاشت در این دوره نباشد. به عنوان مثال، زمان مجاز آغاز عملیات کاشت (apls) بعد از ابتدای دوره‌ی حداقلی کاشت (smplp) باشد و یا به علت محدودیت زمانی و یا پایین بودن کاری ماشین‌های تهیه بستر، قبل از تکمیل عملیات تهیه بستر، تمام مساحت آماده شده، کاشته شود و در نتیجه ظرفیت ماشین‌های کاشت توسط ظرفیت ماشین‌های تهیه بستر محدود می‌گردد. در این شرایط، در صورت آغاز عملیات کاشت در ابتدای دوره‌ی حداقلی، زمان پایان آن در انتهای دوره‌ی حداقلی کاشت نخواهد بود و نمی‌توان از معادله‌ی (۲) برای تعیین هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات استفاده کرد و نیاز به روش‌هایی است که بتوان در شرایط عدم ثبات ظرفیت ماشین‌های کاشت، مقدار این هزینه را محاسبه کند.

هدف کلی این مطالعه تعیین زمان بهینه برای آغاز عملیات کاشت با استفاده از مفهوم هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، می‌باشد. که با مراحل زیر، این هدف محقق می‌شود.

۱- تعمیم رابطه‌ی موجود در منابع برای تعیین هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، با هدف ایجاد انعطاف‌پذیری در رابطه با ظرفیت کلی ماشین‌های کاشت و زمان اجرای عملیات. ۲- ارائه‌ی یک روش عددی برای تعیین زمان بهینه‌ی آغاز عملیات کاشت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به جای سطح زمین کار شده، زمان کارکرد یک مجموعه‌ی منفرد تراکتور–ماشین به عنوان مبنای پیشرفت کار کشاورزی در نظر گرفته شده است. عملیات کاشت برای بخش‌های مختلف مزرعه، در زمان‌های متفاوتی صورت می‌گیرد. معادله‌ی ۱، برای هر واحد مساحت، به صورت معادله‌ی ۵ بیان می‌شود.

(۵)

$$dC_t = Y \times V \times L(t) \times dA$$

که dC_t، و dA به ترتیب هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات و مساحت کار کاشت انجام شده در یک واحد زمانی می‌باشند. بر اساس معادله‌ی ۶ مساحت کار انجام شده در یک واحد زمانی تعیین می‌شود و معادله‌ی ۷ نیز برای محاسبه‌ی هزینه‌ی کل به موقع انجام نشدن عملیات در یک بازه‌ی زمانی (از t1 تا t2) به کار می‌رود.

(۶)

$$dA = C_{at} \times dh \times plpwd \times dt$$

(۷)

$$C_{tt} = dh \times plpwd \times Y \times V \times \int_{t1}^{t2} C_{at}(t) \times L(t) \times dt$$

با فرض ثابت بودن ظرفیت ماشین‌های کاشت و قرار دادن smplp و emplp به عنوان ابتدا و انتهای بازه‌ی کار (حالت اول مورد استفاده در منابع)، حل معادله‌ی ۷ همان معادله‌ی ۲ را نتیجه خواهد داد که به جای z عدد ۴ در مخرج قرار گرفته شده است. با حل معادله‌ی ۷ در حالت‌های ۲و ۳ نیز دوباره معادله‌ی ۲ (z= ۲) به دست می‌آید. بنابراین معادله‌ی ۲ حالت خاصی از معادله‌ی ۷ می‌باشد و می‌توان روش مورد استفاده در این مطالعه را تعمیمی از روش مورد استفاده در منابع ، به حساب آورد.

در این مطالعه نیز افت عملکرد با معادله‌ی ۳ تعیین می‌شود اما ظرفیت مزرعه‌ای مجموعه‌ی ماشین‌های کاشت و زمان آغاز و پایان عملیات کاشت دارای انعطاف بیش‌تری هستند.

ظرفیت مزرعه‌ای هر ماشین منفرد ثابت است و طبق معادله‌ی ۸، عاملی که باعث تغییر ظرفیت کلی ماشین‌های کاشت می‌شود، تعداد ماشین‌های کاشت فعال می‌باشد.

(۸)

$$C_{at}(t) = pln(t) \times C_a$$

C_a، ظرفیت مؤثر ماشین کاشت منفرد و pln، تعداد کل ماشین‌های کاشت می‌باشد که در صورتی که به صورت تابعی از زمان نوشته شود نمایانگر تعداد ماشین‌های کاشت فعال می‌باشد. هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات با استفاده از رابطه‌ی ۹ که از روابط ۳، ۷ و ۸ مشتق شده است، محاسبه می‌شود.

(۹)

$$C_{tt} = C_a \times dh \times plpwd \times Y \times V \times K_t \times \int_{t1}^{t2} pln(t) \times |t - op| \times dt$$

پارامتری با نام شاخص به موقع انجام نشدن عملیات (TI) تعریف شد (معادله، ۱۰) که نشان دهنده‌ی توزیع عملیات کاشت در اطراف نقطه‌ی بهینه است و با استفاده از این مفهوم، هزینه‌ی کل به موقع انجام نشدن عملیات با رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود.

(۱۰)

$$TI = \int_{t1}^{t2} pln(t) \times |t - op| \times dt$$

(۱۱)

$$C_{tt} = TI \times C_a \times dh \times plpwd \times K_t \times Y \times V$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص به موقع انجام نشدن، تنها پارامتری است که متأثر از زمان آغاز و پایان عملیات کاشت است و بقیه‌ی پارامترها ثابت می‌باشند. بنابراین با کاهش مقدار این شاخص، عملیات کاشت بیش‌تر در نزدیکی نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت انجام شده و هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات کاهش می‌یابد. بنابراین باید زمان‌بندی عملیات کاشت طوری انجام شود که مقدار این شاخص کمینه شود. بدیهی است، زمانی شاخص به موقع انجام نشدن کمینه خواهد شد که تمام ماشین‌های کاشت موجود، مشغول به کار باشند و زمان آغاز کاشت طوری تعیین شود که نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت در وسط دوره‌ی کاشت قرار گیرد یعنی حالت اول مورد بررسی در منابع محقق شود. البته نمی‌توان زمان آغاز کاشت قبل از زمان مجاز آغاز کاشت (apls) باشد. بنابراین زمان آغاز و پایان کاشت اولیه با روابط ۱۲ و ۱۳ تعیین می‌شوند.

(۱۲)

$$pls = max\left(op - \frac{mplp}{2}, apls\right)$$

(۱۳)

$$ple = pls + mplp$$

با توجه به این که تعداد ماشین‌های کاشت فعال ثابت هستند، شاخص به موقع انجام نشدن نیز با رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود و با حل انتگرال معادله‌ی ۱۵ حاصل می‌شود.

(۱۴)

$$TI = pln \times \int_{pls}^{op} (op - t) \times dt + pln \times \int_{op}^{ple} (t - op) \times dt$$

(۱۵)

$$TI = \frac{pln}{2} \times ((op - pls)^2 + (ple - op)^2)$$

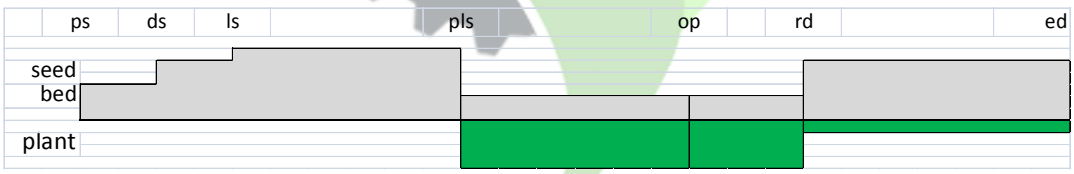
در شرایطی که قبل از پایان عملیات تهیه بستر، کل مساحتی که عملیات تهیه بستر در آن انجام شده بود، کاشته شود، مجموعه‌ی ماشین‌های کاشت نمی‌توانند با همان ظرفیت مزرعه‌ای قبلی به کار خود ادامه دهند و سرعت این عملیات، توسط عملیات تهیه

بستر محدود می‌شود. بنابراین می‌توان دو حالت کلی برای زمان‌بندی عملیات کاشت در نظر گرفت. در حالت اول، بعد از تعیین زمان آغاز کاشت، تمام ماشین‌های کاشت، مشغول به کار شده و تا اتمام مساحت زمین، به کار خود ادامه می‌دهند. در این حالت، شاخص به موقع انجام نشدن عملیات با معادله‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود. در حالت دوم، عملیات کاشت و تهیه بستر با هم تلاقی می‌کنند و روش محاسبه‌ی این شاخص متفاوت خواهد بود.

برای این که مشخص شود که آیا عملیات کاشت و تهیه بستر تلاقی می‌کنند یا نه، باید ابتدا کل کار تهیه بستر قبل از آغاز کاشت محاسبه گردد. بعد از آغاز کاشت، تراکتورها دوباره میان ماشین‌های کاشت و تهیه بستر توزیع می‌گردد و در نتیجه ظرفیت کلی ماشین‌های تهیه بستر تغییر می‌یابد. با استفاده از ظرفیت کاری و کار باقی‌مانده برای هر دو عملیات، زمان پایان این دو عملیات به صورت جداگانه تعیین می‌شود. در صورتی که زمان پایان کاشت بعد از زمان پایان عملیات تهیه بستر باشد، حالت اول روی خواهد داد در غیر این صورت، قبل از پایان عملیات تهیه بستر، عملیات کاشت به آن می‌رسد و حالت دوم روی می‌دهد.

در این مطالعه فرض می‌شود ابتدا هر کدام از عملیات‌های شخم، دیسک و تسطیح در اولین زمان مجاز آغاز خود، شروع می‌شوند و تا آن‌جا که تعداد تراکتورها اجازه می‌دهد، تمامی ماشین‌های تهیه بستر مشغول به کار می‌شوند. با آغاز کاشت، تمام ماشین‌های کاشت، مشغول به کار شده و باقی‌مانده‌ی تراکتورها در عملیات تهیه بستر باقی می‌مانند. بعد از تلاقی دو عملیات، تراکتورها به گونه‌ای میان ماشین‌های کاشت و تهیه بستر توزیع می‌شوند که هر دو عملیات همزمان پیش روند. این فرض‌ها با هدف کاهش شاخص به موقع انجام نشدن صورت گرفته است.

بسته به چگونگی تعیین زمان آغاز کاشت، نقطه‌ی تلاقی ممکن است قبل یا بعد از نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت قرار گیرد. شکل ۱ نمونه‌ای از چگونگی توزیع تراکتور بین ماشین‌های تهیه بستر و کاشت در طول فصل کشت، در حالتی که نقطه‌ی تلاقی بعد از نقطه‌ی بهینه باشد را نشان می‌دهد.



شکل ۱: چگونگی توزیع تراکتورها میان دو عملیات کاشت و تهیه بستر (هر نوار نشان دهنده‌ی یک تراکتور است).

در این مدل در اولین مرحله، ظرفیت مؤثر منفرد هر کدام از ماشین‌ها تعیین می‌شود. ظرفیت مؤثر یک گاوآهن منفرد و کل کار ماشینی مورد نیاز برای عملیات شخم، با استفاده از معادلات ۱۶ و ۱۷ تعیین می‌شود.

(۱۶)

$$spc = \frac{pwidth \times psp \times pef}{10}$$

(۱۷)

$$pw = \frac{A}{spc \times dh \times ppwd}$$

که spc، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر گاوآهن، pwidth، عرض کار گاوآهن (متر)، psp، سرعت کار گاوآهن (کیلومتر در ساعت)، pef، بازده‌ی مزرعه‌ای گاوآهن (اعشار)، pw، کل کار ماشینی شخم (ماشین–روز) و ppwd، احتمال روز کاری برای شخم (اعشار) می‌باشد.

مشابه معادلات ۱۶ و ۱۷ برای دیگر عملیات‌ها نیز به کار می‌رود. همچنین مشابه همین نام‌ها برای پارامترهای مربوط به دیگر ماشین‌ها استفاده می‌شود. با این تفاوت که در ابتدای نام پارامتر، به جای p در گاوآهن، d، l و pl به ترتیب نمایانگر دیسک، لولر و کارنده می‌باشند. همچنین t و s نشان دهنده‌ی تراکتور و تهیه بستر می‌باشند. کل کار تهیه بستر (sw) از جمع کار شخم (pw)، دیسک (dw) و تسطیح (lw) به دست می‌آید و کل کار تراکتوری (tw) نیز از جمع کل کار تهیه بستر و کار کاشت (plw) حاصل می‌گردد. نسبت کار ماشینی تهیه بستر به کاشت (splwr)، و کاشت به تراکتور (pltwr) به ترتیب از تقسیم کل کار تهیه بستر به کل کار کاشت و از تقسیم کل کار کاشت به کل کار تراکتوری به دست می‌آیند.

در ابتدا فرض می‌شود که عملیات کاشت در ابتدای دوره‌ی حداقلی آغاز می‌شود (pls=smplp) و طبق آن محاسبات پیشرفت کار برای کاشت و تهیه بستر انجام می‌شود. طبق معادلات ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲، با محاسبه‌ی کار تهیه بستر انجام شده از آغاز شخم تا آغاز دیسک (sw_ps_ds)، از آغاز دیسک تا آغاز تسطیح (sw_ds_ls) و از آغاز تسطیح تا آغاز کاشت انتخابی (sw_ls_pls)، کل کار تهیه بستر انجام شده از ابتدای کشت تا آغاز کاشت انتخابی (sw_ps_pls) و کار تهیه بستر از آغاز کاشت تا زمان پایان تهیه بستر (sw_pls_se) تعیین می‌شود. بر این اساس، زمان پایان عملیات تهیه بستر (se) تعیین می‌شود.

(۱۸)

$$sw_ps_ds = \min\left(pw\ , pn \times (ds - ps)\right)$$

(۱۹)

$$sw_ds_ls = \min\left((dw + pw - sw_ps_ds), (min(tn, pn + dn) \times (ls - ds))\right)$$

(۲۰)

$$sw_ls_pls = min(tn, sn) \times (pls - ls)$$

(۲۱)

$$sw_ps_pls = min(sw, sw_ps_ds + sw_ds_ls + sw_ls_pls)$$

(۲۲)

$$sw_pls_se = sw - sw_ps_pls$$

از آغاز کاشت تا پایان تهیه بستر، تنها تراکتورهایی که مشغول به کاشت نیستند می‌توانند در کار تهیه بستر باقی بمانند بنابراین:

(۲۳)

$$sw_pls_se = (se - pls) \times (tn - pln)$$

برای محاسبه‌ی زمان پایان عملیات تهیه بستر، رابطه‌ی ۲۳ به شکل رابطه‌ی ۲۴ در می‌آید.

(۲۴)

$$se = pls + \frac{sw_pls_se}{tn - pln}$$

در این معادلات، ps، ds، ls و pls به ترتیب زمان آغاز عملیات‌های شخم، دیسک، تسطیح و کاشت هستند و pn، dn، ln، pln و tn به ترتیب تعداد گاوآهن، دیسک، لولر، خطی‌کار و تراکتورهای موجود می‌باشد.

در صورتی که زمان محاسبه شده برای پایان عملیات تهیه بستر قبل از زمان اولیه پایان کاشت باشد (se<ple)، نشان می‌دهد که قبل از رسیدن عملیات کاشت به عملیات تهیه بستر، این عملیات به پایان می‌رسد و طبق معادله‌ی ۱۷ شاخص به موقع انجام نشدن تعیین می‌شود. در غیر این صورت، این دو عملیات با هم تلاقی می‌کنند و برای تعیین شاخص به موقع انجام نشدن عملیات نیاز است که ابتدا زمان‌های تلاقی و پایان مشترک دو عملیات کاشت و تهیه بستر محاسبه شود.

نسبت‌های معرفی شده میان کل کار ماشین‌های مختلف در هر واحد مساحت که تمام عملیات‌ها تکمیل شده است نیز صادق است. در نقطه‌ی تلاقی، تمام عملیات‌ها به یک اندازه پیش رفته‌اند بنابراین نسبت کار تهیه بستر انجام شده از آغاز شخم تا نقطه‌ی تلاقی (sw_ps_rd) به کار کاشت انجام شده از آغاز کاشت تا نقطه‌ی تلاقی (plw_pls_rd) برابر با splwr است. بنابراین می‌توان معادله‌ی ۲۵ و به تبع آن، معادلات ۲۶ و ۲۷ را برای تعیین نقطه‌ی تلاقی نوشت.

(۲۵)

$$\frac{sw_ps_rd}{plw_pls_rd} = \frac{sw}{plw}$$

(۲۶)

$$\frac{sw_ps_pls + (rd - pls) \times (tn - pln)}{(rd - pls) \times pln} = \frac{sw}{plw}$$

(۲۷)

$$rd = pls + \frac{sw_ps_pls}{pln \times \frac{sw}{plw} - tn + pln}$$

طبق معادله‌ی ۲۸ کل کار تراکتوری از آغاز شخم تا پایان کشت (ed) از جمع کل کار تراکتوری انجام گرفته تا آغاز کاشت – که فقط شامل کار تهیه بستر می‌شود– و کار تراکتوری از آغاز کاشت تا پایان کشت به دست می‌آید و با تغییر شکل معادله‌ی ۲۸، معادله‌ی ۲۹ برای تعیین نقطه‌ی پایان کشت به دست می‌آید.

(۲۸)

$$tw = sw_ps_pls + (ed - pls) \times tn$$

(۲۹)

$$ed = pls + \frac{tw - sw_ps_pls}{tn}$$

در حالت اول که نقطه‌ی تلاقی کاشت و تهیه بستر بعد از نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت روی می‌دهد (op<rd)، کل بازه‌ی کاشت را می‌توان به ۳ بخش تقسیم کرد. بخش اول از نقطه‌ی آغاز کاشت تا نقطه‌ی بهنیه‌ی کاشت، بخش دوم از نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت تا نقطه‌ی تلاقی و بخش سوم از نقطه‌ی تلاقی تا پایان مشترک کاشت و تهیه بستر می‌باشد.

در دو دوره‌ی اول و دوم تعداد ماشین‌های کاشت مشغول به کار برابر با کل ماشین‌های کاشت موجود می‌باشد ولی در دوره‌ی سوم، تنها تراکتورها با تمام تعداد کار می‌کنند و نسبت تعداد ماشین‌های کاشت و ماشین‌های تهیه بستر فعال به صورتی است که ظرفیت مزرعه‌ای مجتمع این دو دسته از ماشین‌ها برابر باشند. بنابراین تعداد ماشین‌های کاشت فعال در این دوره برابر است با تعداد تراکتورها ضرب در نسبت کار خطی‌کار به تراکتور برای تکمیل کشت در یک واحد مساحت (pltwr). در نتیجه معادله‌ی ۹ به صورت معادله‌ی ۳۰ نوشته می‌شود.

(۳۰)

$$TI = \int_{pls}^{op} pln \times (op - t) \times dt + \int_{op}^{rd} pln \times (t - op) \times dt + \int_{rd}^{ed} \mathrm{tn} \times pltwr \times (t - op) \times dt$$

با حل این انتگرال، شاخص به موقع انجام نشدن با استفاده از معادله‌ی ۳۱ تعیین می‌گردد.

(۳۱)

$$TI = \frac{pln}{2} \times ((op - pls)^2 + (rd - op)^2) + tn \times \frac{plw}{tw} \times (\frac{ed^2 - rd^2}{2} + op \times (rd - ed))$$

تنها متغیر مستقل معادله زمان آغاز کاشت می‌باشد و نقطه‌ی تلاقی و زمان پایان کشت، تابع زمان آغاز کاشت می‌باشند که با استفاده از معادلات ۲۷ و ۲۹ تعیین می‌شوند. بقیه‌ی پارامترها، جزء ورودی‌های مدل هستند و ثابت می‌باشند. بنابراین با تعیین زمان آغاز کاشت، شاخص به موقع انجام نشدن طبق زمان آغاز کاشت انتخابی محاسبه می‌شود.

در حالت دوم، نقطه‌ی تلاقی کاشت و تهیه بستر قبل از نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت روی می‌دهد (rd<op)، کل بازه‌ی کاشت به ۳ بخش تقسیم می‌شود. بخش اول از نقطه‌ی آغاز کاشت تا نقطه‌ی تلاقی، بخش دوم از نقطه‌ی تلاقی تا نقطه‌ی بهنیه‌ی کاشت و بخش سوم از نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت تا پایان مشترک کاشت و تهیه بستر می‌باشد. معادله‌ی ۳۲ بسط یافته‌ی معادله‌ی ۹ در این حالت است.

(۳۲)

$$TI = \int_{pls}^{rd} pn \times (op - t) \times dt + \int_{rd}^{op} tn \times pltwr \times (op - t) \times dt + \int_{op}^{ed} tn \times pltwr \times (t - op) \times dt$$

با حل انتگرال، معادله‌ی ۳۳ برای تعیین شاخص به موقع انجام نشدن عملیات بر اساس زمان آغاز کاشت انتخابی به دست می‌آید.

(۳۳)

$$TI = pln \times \left(\frac{pls^2 - rd^2}{2} + op \times (rd - pls)\right) + \frac{tn}{2} \times \frac{plw}{tw} \times ((op - rd)^2 + (ed - op)^2)$$

وقتی که با انتخاب زمان اولیه‌ی آغاز کاشت (ابتدای دوره‌ی حداقلی کاشت یا زمان مجاز آغاز کاشت)، عملیات کاشت و تهیه بستر تلاقی کنند، این زمان، لزوماً بهترین زمان برای آغاز کاشت نخواهد بود. با تغییر زمان آغاز کاشت، مقدار شاخص به موقع انجام نشدن تغییر می‌کند. در این میان می‌توان زمانی را پیدا کرد که مقدار این شاخص کمترین باشد. برای تعیین زمان بهینه‌ی آغاز کاشت، می‌توان از روش عددی استفاده کرد.

در این روش ابتدا یک بازه‌ی اولیه تعیین می‌شود که اطمینان حاصل شود که نقطه‌ی بهینه‌ی آغاز کاشت در داخل آن قرار داد. ابتدای این بازه، نقطه‌ی ابتدای دوره‌ی حداقلی کاشت (smplp) و انتهای آن زمان نقطه‌ی بهینه‌ی کاشت (op) تعیین می‌باشد. سپس دو نقطه دیگر در بین این دو نقطه با فاصله‌ی مساوی تعیین می‌شود. بنابراین چهار نقطه با فاصله‌ی مساوی به عنوان زمان آغاز کاشت، تعیین می‌شود. برای هر چهار نقطه، تمام محاسبات مربوط به تعیین شاخص به موقع انجام نشدن عملیات، انجام می‌شود. در بین این چهار نقطه، دو نقطه‌ای که دارای کمترین مقدار این شاخص هستند به عنوان نقاط ابتدا و انتهای بازه‌ی مورد بررسی در مرحله‌ی بعد تعیین می‌شود. دوباره دو نقطه‌ی دیگر، میان بازه‌ی جدید تعیین می‌شود و مقدار شاخص به موقع انجام نشدن عملیات، برای این دو نقطه نیز محاسبه می‌شود. همانند مرحله‌ی قبلی، دو نقطه به مرحله‌ی بعدی انتقال می‌یابند و دو سر بازه‌ی جدید را تشکیل می‌دهند. این مراحل بارها تکرار می‌شوند تا این که اندازه‌ی بازه‌ی مورد بررسی از مقداری از پیش تعیین شده (q) کمتر شود. در این حالت نقاط مورد بررسی به اندازه‌ی کافی به زمان بهینه‌ی آغاز کاشت نزدیک شده‌اند. در نهایت یکی از نقاط (نقطه‌ی دوم بازه) به عنوان زمان بهینه‌ی آغاز کاشت تعیین می‌شود. هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات نیز بر مبنای شاخص به موقع انجام نشدن حاصل از اعمال این نقطه به عنوان نقطه‌ی آغاز کاشت، محاسبه می‌شود.

برای اجرا، در ابتدا پارامتر pls که نشان دهنده‌ی زمان آغاز کاشت می‌باشد، به صورت یک ماتریس چهار عضوی بیان می‌شود که هر عضو آن نشان دهنده‌ی یک نقطه‌ی آغاز کاشت در بازه‌ی مورد بررسی است. عدد j شماره‌ی نقطه‌ای در داخل بازه است که شاخص به موقع انجام نشدن حاصل از آن، کمترین باشد و عدد k شماره‌ی نقطه‌ای است که بعد از j، کمترین شاخص به موقع انجام نشدن را دارد. در ابتدا j برابر ۱ و k برابر با ۴ در نظر گرفته می‌شود. بعد از محاسبه‌ی مقدار شاخص برای هر چهار نقطه، دوباره مقدار j و k تعیین می‌شود. این دو عدد شماره‌ی نقاطی خواهند بود که دو سر بازه‌ی مرحله‌ی بعد را تشکیل می‌دهند.

البته طبق معادلات ۳۴ و ۳۵، در هر مرحله، نقاط شماره‌ی ۱ و ۴ که دو سر بازه‌ی مرحله‌ی بعد را تشکیل می‌دهند به صورتی تعیین می‌شود که زمان نقطه‌ی اول جلوتر از نقطه‌ی چهارم قرار گیرد.

(۳۴)

$$pls(1) = pls(min(j,k))$$

(۳۵)

$$pls(4) = pls(max(j,k))$$

در هر مرحله، نقاط دوم و سوم با استفاده از معادلات ۳۶ و ۳۷ تعیین می‌شوند.

(۳۶)

$$pls(2) = \frac{2 \times pls(1) + pls(4)}{3}$$

(۳۷)

$$pls(3) = \frac{pls(1) + 2 \times pls(4)}{3}$$

در هر مرحله بایستی مقدار j و k تعیین شود. مقدار j برابر با شماره‌ی نقطه‌ای (زمان آغاز کاشت) خواهد بود که کمترین مقدار شاخص به موقع انجام نشدن را دارد. اما مقدار k با کمی ملاحظات تعیین می‌شود. در صورتی که مقدار j برابر با ۱ باشد، یعنی اولین نقطه‌ی بازه‌ی قبلی، کمترین مقدار شاخص را دارد. بنابراین دومین نقطه‌ای که کمترین شاخص را دارد تنها همسایه‌ی این نقطه است. در نتیجه، مقدار k برابر با ۲ خواهد بود. در صورتی که مقدار j برابر با ۴ باشد، مقدار k برابر با ۳ می‌باشد. در صورتی که مقدار j برابر با ۲ یا ۳ باشد، نقطه‌ی بهینه‌ی موقتی (نقطه‌ای که در بین این چهار نقطه، کمترین مقدار شاخص را دارد) دارای دو همسایه است و باید میان این دو همسایه نقطه‌ای انتخاب شود که مقدار شاخص آن کمتر از دیگر همسایه باشد. بنابراین شرط زیر بدین صورت بیان شد.

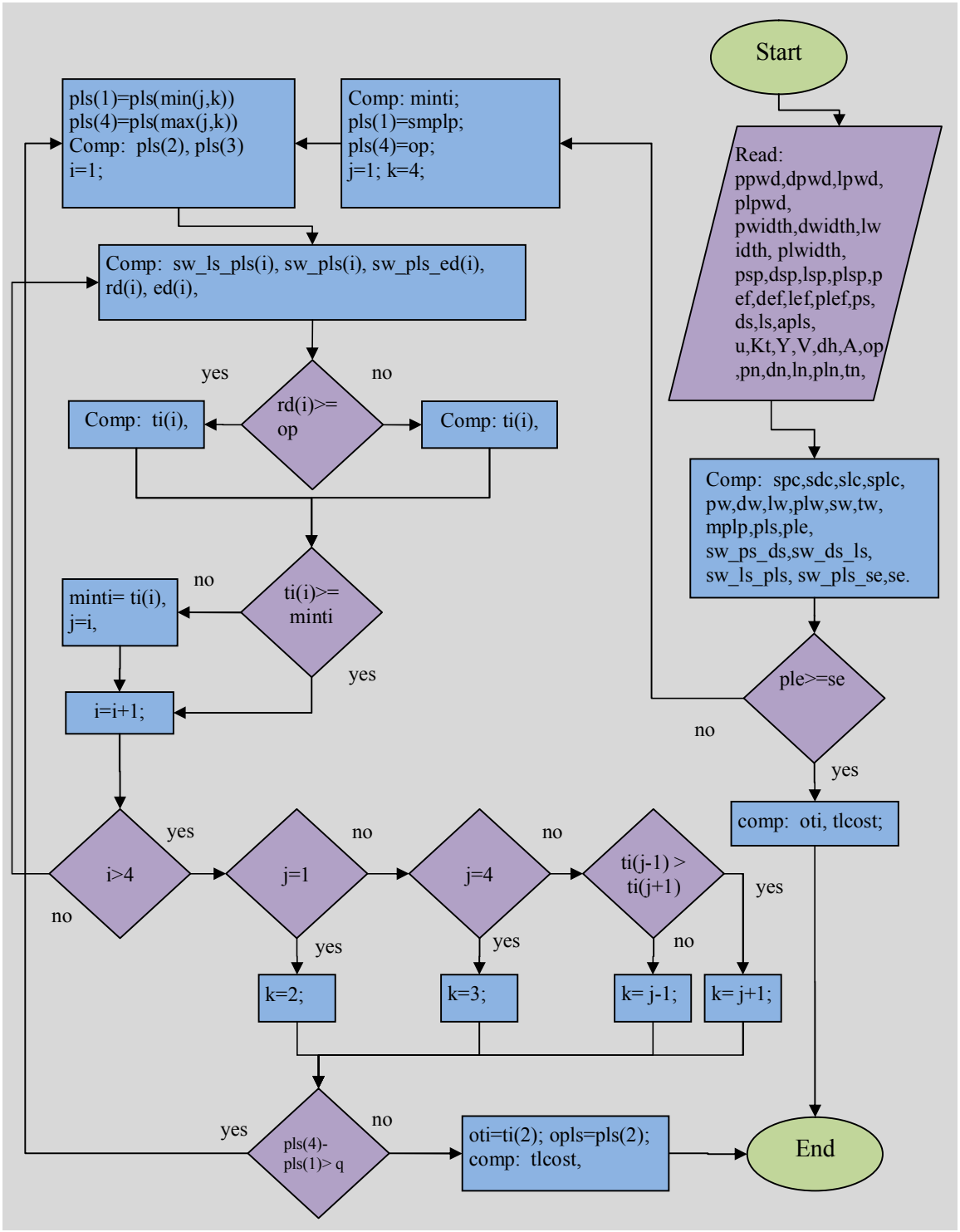
$$if\ ti(j-1) > ti(j+1)$$
$$k = j + 1$$
$$else$$
$$k = j - 1$$

مقدار j با استفاده از پارامتری با عنوان minti تعیین می‌شود که نشان دهنده‌ی شاخص به موقع انجام نشدن کمینه در هر مرحله از محاسبات است.

ابتدا مقداری انتخابی به عنوان شاخص به موقع انجام نشدن عملیات کمینه (minti) تعیین می‌شود که مقادیر جدید شاخص به موقع انجام نشدن با این مقدار مقایسه شود. برای شروع عددی بزرگ ($pln \times mplp^2 \times 10$) برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در همان ابتدا با مقدار شاخص به موقع انجام نشدن حاصل از اولین زمان آغاز کاشت انتخابی، جایگزین گردد. در صورتی که مقدار شاخص نقطه‌ی مورد بررسی از مقدار شاخص کمینه کمتر باشد، مقدار شاخص کمینه تغییر می‌کند و برابر با مقدار شاخص در این نقطه می‌گردد و عدد j برابر با شماره‌ی نقطه‌ی مورد بررسی، می‌شود. در غیر این صورت، مقدار شاخص کمینه و j تغییری نمی‌کند و بدین ترتیب، مقدار j در بین این چهار نقطه تعیین می‌شود.

در هر مرحله از محاسبات، فاصله‌ی نقاط ۱ و ۴ که نشان دهنده‌ی طول بازه است، با مقدار q مقایسه می‌شود. در صورتی که طول بازه بیش از این مقدار باشد، محاسبات ادامه می‌یابد در غیر این صورت محاسبات از حلقه خارج شده و عضو دوم ماتریس pls به عنوان نقطه‌ی بهینه‌ی آغاز کاشت (opls) شناخته می‌شود.

این مدل در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده شد و شکل ۲ فلوچارت این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲: فلوچارت مدل تعیین زمان بهینه‌ی آغاز کاشت بر اساس حل عددی.

برای بررسی عملکرد روش عددی ابتدا با استفاده از داده‌های زیر مدل اجرا شد.

pn= 3; dn= 2; ln= 2; pln= 3; tn= 5; A= 500; dh= 10;
ppwd= 0.7; dpwd= 0.7; lpwd= 0.7; plpwd= 0.7; pwidth= 0.9; dwidth = 2.4; lwidth = 1.8; plwidth = 2;
psp= 7; dsp= 10; lsp= 10; plsp= 8; pef= 0.7; def= 0.7; lef= 0.7; plef= 0.56;
ps= 270; ds= 280; ls= 287; apls= 292; op= 315;

در این داده‌ها، زمان آغاز هر عملیات بر اساس شماره روز از ابتدای سال (میلادی) می‌باشد.

پس از اجرای مدل و تعیین زمان بهینه‌ی آغاز کاشت و محاسبه‌ی شاخص به موقع انجام نشدن مربوط به آن، شاخص به موقع انجام نشدن عملیات با استفاده از نقاط دیگری به عنوان زمان آغاز کاشت محاسبه شد. در صورتی که بتوان نقطه‌ی دیگری یافت که شاخص به موقع انجام نشدن آن، کمتر از نقطه‌ی بهینه‌ی محاسبه شده باشد، نشان دهنده‌ی عدم کارایی مدل خواهد بود و در صورتی که نقطه‌ای که به عنوان زمان بهینه‌ی آغاز کاشت معرفی شده است، نسبت به نقاط در همسایگی خود، شاخص به موقع انجام نشدن کمتری داشته باشد، نشان دهنده‌ی عمکرد صحیح مدل می‌باشد. با اضافه و کم کردن اعداد ۰/۱، ۱، ۲ و ۱۰ به زمان بهینه‌ی آغاز کاشت محاسبه شده، نقاط مورد بررسی تعیین شدند.

نتایج و بحث

پس از اجرای مدل با استفاده از داده‌های ورودی، زمان بهینه‌ی آغاز کاشت (opls) و شاخص به موقع انجام نشدن کمینه (mti)، به ترتیب ۳۰۵/۰۷۶ و ۶۶۹/۷۴۴۶ محاسبه شدند. نتایج اجرای برنامه با مقادیر مختلف آغاز کاشت در جدول ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، زمان بهینه‌ی محاسبه شده برای آغاز کاشت، دارای کمترین میزان شاخص به موقع انجام نشدن عملیات در بین دیگر نقاط است. بنابراین در بهینه‌سازی زمان آغاز کاشت با هدف کاهش هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات، روش حل عددی مورد استفاده، کارایی لازم را دارد.

جدول ۱: شاخص به موقع انجام نشدن در اثر زمان‌های مختلف آغاز کاشت

pls	rd	ed	ti	pls-opls	ti-mti
295.076	308.5369	342.1791	989.0815	-10	319.3369
303.076	321.6464	342.1791	685.5779	-2	15.8333
304.076	323.2851	342.1791	673.7032	-1	3.9586
304.976	324.7599	342.1791	669.7842	-0.1	0.0396
305.076	324.9238	342.1791	669.7446	0	0
305.176	325.0877	342.1791	669.7841	0.1	0.0395
306.076	326.5625	342.1791	673.7021	1	3.9575
307.076	328.2012	342.1791	685.5756	2	15.831
315.076	341.3107	342.1791	1065.5	10	395.7554

در تمام نقاط مورد بررسی، زمان پایان کشت، یکسان می‌باشد. علت این است که تعداد تراکتورها بیش از تعداد کل ماشین‌های تهیه بستر نمی‌باشد و با آغاز تسطیح، تمام تراکتورها مشغول به کار می‌شوند. با توجه به این که باید مقدار مشخصی کار ماشینی بر

حسب ماشین–روز انجام شود تا عملیات‌های مزرعه تکمیل شود، تعیین زمان آغاز کاشت تأثیری در نرخ پیشروی مجموع کار نداشته و در نتیجه، زمان پایان مجموع کاشت و تهیه بستر ثابت خواهد بود.

اختلاف شاخص به موقع انجام نشدن عملیات در زمان آغاز کاشت مورد بررسی با کمینه‌ی این شاخص (ti-mti)، با فاصله‌ی زمان آغاز کاشت مورد بررسی با زمان بهینه‌ی آغاز کاشت (pls-opls)، رابطه‌ی غیرخطی (درجه دو) داشته است. بنابراین انتخاب زمان مناسب برای آغاز کاشت می‌تواند تأثیر زیادی در هزینه‌ی به موقع انجام نشدن و به تبع آن در کل سود مزرعه داشته باشد.

نتیجه‌گیری

معادله‌ی ۷ که در این مطالعه توسعه یافته است، تعمیم یافته‌ی معادله‌ی کلی موجود در منابع (معادله‌ی ۲) می‌باشد و می‌توان این معادله را به شرایطی که رابطه‌ی افت عملکرد غیرخطی یا حتی نامتقارن باشد نیز بسط داد. همچنین روش حل عددی ارائه شده نیز به خوبی تعیین کننده‌ی بهترین زمان برای آغاز عملیات کاشت می‌باشد. مدل ارائه شده، خود می‌تواند به عنوان یک زیرمدل در مدل‌های جامع‌تری که هزینه‌های ترکیب‌های مختلف ماشینی را محاسبه می‌کنند استفاده شود. بنابراین با تعمیم بیش‌تر خط مشی ارائه شده در این مطالعه، می‌توان در شرایط واقعی‌تر، اقدام به تعیین دقیق هزینه‌ی به موقع انجام نشدن عملیات کرد که نقشی اساسی در تعیین سامانه‌ی مناسب ماشینی در یک مزرعه دارد.

منابع

1- Abdi, R., Ghasemzadeh, H. R., Abdollahpour, S., Sabzeparvar, Majid and Dabbag Mohamadi Nasab, Adel. 2010. Modeling and Analysis of Mechanization Projects of Wheat Production by GERT Networks. Agricultural Sciences in China. 9(7): 1078-1083.
2- ASABE Standards. 2006. American Society of Agricultural Engineers, EP496.3.
3- Bochtis, D.D., and C. G., Sørensen. 2010. The vehicle routing problem in field logistics: Part II. Biosystems Engineering 105 (2): 180–188.
4- Guan, S., M. Nakamura., T. Shikanai., and T. Okazaki., 2008. Hybrid Petri nets modeling for farm work flow. Computers and Electronics in Agriculture 62 (2), 149–158.
5- Guan, S., M. Nakamura., T. Shikanai., and T. Okazaki., 2009. Resource assignment and scheduling based on a two-phase metaheuristic for cropping system. Computers and Electronics in Agriculture 66 (2), 181–190.
6- Orfanou, A., P. Busato., , D.D. Bochtis., G. Edwards., D. Pavlou., C.G. Sørensen., and R. Berruto. 2013. Scheduling for machinery fleets in biomass multiple-field operations. Computers and Electronics in Agriculture 94: 12–19.
7- Pinedo, M.L., 2008. Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems, third ed. Springer Science+Business Media, LLC, NY, USA.
8- Wijngaard, P.J.M., 1988. A heuristic for scheduling problems, especially for scheduling farm operations. European Journal of Operational Research. 37(1): 127–135.

Development a planting operation scheduling model based on timeliness cost optimization

Mahdi Khani[1*], Alireza Keyhani[2], Hooman Sharifnasab[3], Reza Alimardani[2], Gholamreza Peykani[4]

1-PhD student of Agricultural Mechnization, Department of Agricultural Machinery, University of Tehran, mahdikhani@ut.ac.ir 2- Professor of Department of Agricultural Machinery, University of Tehran 3- Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Institute 4- Associate Professor of Department of Agricultural Economics, University of Tehran

Abstract

By determining the number of machines in a farm, ownership and variable costs of agricultural machines can be computable. However, timeliness cost is also affected by agricultural operations scheduling. By performing whole planting operation in the optimum planting time, timeliness cost is considered equal to zero. If planting operation can be performed in the smallest possible period, by use of all planters' capacity, timeliness cost will be minimum. But in conditions that, the machines capacity is not sufficient, planting operation may reaches to seed bed preparation operation and practically, planting operation could not be completed in the considered period. In such circumstances, planting operation scheduling can be possible by numerical methods. In this study, by definition of a parameter namely timeliness index, a model based on numerical method was developed to determine optimum time for planting start. After running the model by use of input data, optimum time of planting start was determined. By comparison of the timeliness index resulted from optimum time of planting start with timeliness index values resulted from other planting starts in the vicinity of the optimum time of planting start, the efficiency of the model was proven.

Keywords: timeliness index, optimum time of planting start, numerical solution.