Quarterly Journal of
Applied Theories of Economics

Profit Optimization in Corn Weed Control using Atrazine under Interval Uncertainty

Tahereh Shokouhi[1]✉, Majid Pazand[2]

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Saravan Higher Education Complex, University of Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran. t.shokouhi@saravan.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Economics, Saravan Higher Education Complex, University of Saravan, Sistan and Baluchestan, Iran. m.pazand@ saravan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: September 2025
Accepted: Febuary 2026

JEL: Q16, C61, D81.

Keywords:
Dynamic programming,
Interval uncertainty,
Weeds,
Optimal control.

ABSTRACT

This study focuses on profit optimization in maize weed control under interval uncertainty, aiming to enhance maize yield. The objective is to identify an optimal balance between crops and weed dynamics to maximize producers' economic benefits. To achieve this goal, a dose–response function for herbicides and the population dynamics of weeds (such as the invasive Amaranthus retroflexus) were first modeled. Then, considering factors such as planting method, climatic conditions, and pest pressure, the final crop yield was computed. This problem is formulated as an optimal control problem with an interval-valued profit function, using dynamic programming. Dynamic systems are a technique that applies principles of feedback engineering and control theory to simulation, enabling the understanding of complex patterns in causal relationships within systems. Simulation results with the atrazine herbicide show that optimal application rates lead to a stable reduction in the weed seed bank and a significant increase in long-term profitability. Optimal solutions are presented based on the LU (Lower-Upper) ordering relation, which introduces a novel concept of partial ordering in interval spaces via convex, bounded functions associated with intervals. The results suggest that dynamic programming for intelligent weed management significantly improves productivity and long-term economic returns. Therefore, it can serve as an effective tool for decision-making under economic uncertainty in sustainable agriculture.

Cite this article Shokouhi, T., & Pazand, M. (2026). Profit optimization in corn weed control using atrazine under interval uncertainty. *Applied Theories of Economic*, 13(2), 87-104.
https://doi.org/ 10.22034/ecoj.2026.68399.3444

 Publisher: University of Tabriz
DOI: 10.22034/ecoj.2026.68399.3444

Introduction

Agriculture is recognized as a major pillar of global food security, yet it is constantly threatened by various biological constraints, particularly weed invasions. Weeds act as aggressive and opportunistic competitors for essential agricultural resources. This competition directly leads to significant reductions in crop yield and quality, as weeds often have higher nutrient uptake efficiencies than domesticated crops such as maize (Cousens, 1985). In maize cultivation, uncontrolled weed growth can result in devastating economic losses for farmers, reducing potential harvests by more than half if left unchecked. Beyond the immediate financial impact, the widespread spread of weeds threatens the sustainability of agricultural production on a macro-scale. Historically, weed management has evolved from traditional manual methods to complex chemical and biological interventions. However, the inherent complexity of ecosystems and market fluctuations has made selecting the optimal control strategy an ongoing challenge (Seefeldt et al., 1995).

Effective weed management is fundamentally a matter of profitability analysis and economic optimization. Decisions about herbicide application rates should be based not only on technical efficiency, but also on the goal of maximizing the producer's net profit in the long run (Jones and Cacho, 2000). Unfortunately, this process is accompanied by numerous uncertainties, such as crop price fluctuations and climate change. Traditional deterministic models often fail to capture the range of possible outcomes in such an environment. These stochastic factors necessitate the development of robust analytical frameworks. This research addresses this gap by proposing an interval-optimal control model for corn weed management that balances weed suppression with economic sustainability under uncertain conditions (Leal et al., 2021).

Methodology

The core of this research involves modeling the dynamics of weed populations and their responses to atrazine doses. To quantify this relationship, a dose-response function was implemented using a log-logistic model. This model is known for its high accuracy in representing the sigmoidal relationship between herbicide concentration and weed population mortality (Seefeldt et al., 1995; Lacerda and Victoria Filho, 2004). The state of the system is defined by the density of the weed seed bank in the soil, and a dynamic state equation governs its transition from one season to the next. This equation includes factors such as natural seed mortality, germination rate, and atrazine-induced mortality rate (Pandey and Madd, 1990).

The optimization problem is formulated as an optimal control over a finite time interval, based on the mathematical principles of optimal processes (Pontryagin, 2018). The main objective is to maximize the discounted net profit for the corn producer. To account for uncertainties, parameters such as corn market price and operating cost are represented as closed intervals (ranges), allowing a range of possible values to be included in the model without the need for probability distributions (Leal et al., 2021; Leal et al., 2022). To solve this system, dynamic programming techniques, which are essential in natural resource applications (Bellman, 1957; Kennedy, 2012), were used. These techniques were combined with the LU ordinal relation, which provides a partial ordering for interval spaces, so that strategies can be compared based on "worst-case" (lower bound) and "best-case" (upper bound) scenarios. The simulation path identifies the optimal herbicide doses that minimize seed bank density and maximize profit.

Results and Discussion

The simulation showed that applying optimized interval doses results in a sustained reduction in the weed seed bank over time. One of the most important findings is that using optimal LU solutions enables the producer to achieve a significant increase in profitability even in the face of high market uncertainty. The model suggests a strategic approach: using higher initial doses to quickly deplete the seed bank, followed by gradual dose reductions in subsequent years (Jones and Cacho, 2000). This results in a field with lower weed pressure and requiring fewer chemical inputs over time. This intelligent management

keeps chemical use at the minimum level required for economic security, which is in line with the principles of precision agriculture (Kim et al., 2006).
Scenario analysis showed that the model provides a strong buffer against economic shocks. Even in the "pessimistic" scenario (low crop price and high pesticide cost), the lower bound of the profit margin under the optimal strategy was significantly higher than that of the conventional fixed-dose methods. Incorporating feedback loops into the dynamic system enables real-time adjustments based on actual weed density at the start of each season, thereby preventing the overuse of chemicals (Kennedy, 2012). This avoids environmental degradation and maximizes financial returns. The evolution of the seed bank and profitability metrics clearly shows that the optimal interval control approach leads to a more resilient agricultural system. The model provides a roadmap for long-term economic sustainability in maize production and offers a scientific solution to the challenges of modern agriculture. The proposed framework is an efficient tool for sustainable decision-making, ensuring that agriculture remains profitable despite future uncertainties (Santin-Montagna, 2011).

نظریه‌های کاربردی اقتصاد

بهینه‌سازی سود در کنترل علف‌های هرز ذرت با استفاده از آترازین تحت عدم قطعیت بازه‌ای

طاهره شکوهی[1] ✉، مجید پازند[2]

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه ریاضی کاربردی، مجتمع آموزش عالی سراوان، دانشگاه سراوان، سیستان و بلوچستان، ایران.
رایانامه: t.shokouhi@saravan.ac.ir
۲. استادیار، گروه اقتصاد، مجتمع آموزش عالی سراوان، دانشگاه سراوان، سیستان و بلوچستان، ایران.
رایانامه: m.pazand@ saravan.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

JEL: Q16 ،C61 ،D81.

واژه‌های کلیدی:
برنامه‌ریزی پویا،
عدم قطعیت بازه‌ای،
علف‌های هرز،
کنترل بهینه.

چکیده

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سود در کنترل علف‌های هرز ذرت تحت عدم قطعیت از نوع بازه‌ای در راستای افزایش عملکرد ذرت تمرکز دارد. ما به دنبال یافتن یک تعادل بهینه بین محصول و علف هرز برای حداکثرسازی منفعت اقتصادی تولیدکننده هستیم. برای دستیابی به این هدف، ابتدا یک تابع دز-پاسخ برای علف‌کش‌ها و پویایی جمعیت علف هرز (مانند علف هرز مهاجم دودندانه) مدل‌سازی شد. سپس، با در نظر گرفتن عواملی مانند روش کاشت، شرایط آب و هوایی و آفات، بازده نهایی محصول محاسبه شد. این مسئله به عنوان یک مسئله کنترل بهینه با تابع سود بازه‌ای از طریق سیستم‌های برنامه‌ریزی پویا فرمول‌بندی شده است. سیستم‌های پویا، تکنیکی برای استفاده از اصول مهندسی بازخورد و کنترل در شبیه سازی است، که ما را قادر به فهم الگوهای پیچیده موجود در روابط علت و معلولی سیستم‌ها می‌سازد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از علف‌کش آترازین نشان داد که اعمال دزهای بهینه علف‌کش منجر به کاهش پایدار بانک بذر و افزایش قابل توجه سودآوری در طول زمان می‌شود. جواب‌های بهینه بر اساس رابطه ترتیبی **LU** نشان داده شده است، که مفهوم جدیدی از رابطه مرتبه جزئی برای فضای بازه‌ای با استفاده از توابع مقید محدب مرتبط با بازه‌ها می‌باشد. در این پژوهش استفاده از مدل برنامه ریزی پویا مدیریت هوشمندانه علف‌های هرز، بهره‌وری و سود اقتصادی بلندمدت را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد، از این رو می‌تواند بعنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های پایدار در کشاورزی و مدیریت عدم قطعیت‌های اقتصادی باشد.

استناد: شکوهی، طاهره و پازند، مجید (۱۴۰۵). بهینه‌سازی سود در کنترل علف‌های هرز ذرت با استفاده از آترازین تحت عدم قطعیت بازه‌ای. *نظریه های کاربردی اقتصاد*، ۱۳(۲)، ۱۰۴-۸۷.

DOI: 10.22034/ecoj.2026.68399.3444

ناشر: دانشگاه تبریز

۱- مقدمه

کشاورزی، ستون فقرات امنیت غذایی جهانی، همواره با چالش‌های متعددی از جمله آفات، بیماری‌ها و به ویژه علف‌های هرز روبرو بوده است. علف‌های هرز به عنوان رقیبانی سرسخت برای محصولات زراعی، با کاهش دسترسی به منابع حیاتی مانند آب، نور، و مواد مغذی، می‌توانند به طور قابل توجهی عملکرد و کیفیت محصول را کاهش دهند. این رقابت نه تنها منجر به زیان‌های اقتصادی گسترده برای کشاورزان می‌شود، بلکه در مقیاس وسیع‌تر، امنیت غذایی و پایداری سیستم‌های کشاورزی را به خطر می‌اندازد. در طول تاریخ کشاورزی، از روش‌های سنتی گرفته تا تکنیک‌های پیشرفته شیمیایی و بیولوژیکی، تلاش‌های بی‌شماری برای کنترل موثر علف‌های هرز صورت گرفته است (احمدی[1]، ۱۳۷۸؛ کیم و همکاران[2]، ۲۰۰۶ و لاسردا و ویکتوریا فیلهور[3]، ۲۰۰۴). با این حال، با توجه به پیچیدگی‌های اکوسیستم‌های کشاورزی و پویش‌های متغیر محیطی، انتخاب بهترین استراتژی کنترل علف‌های هرز، بعنوان یک موضوع چالش‌برانگیز باقی مانده است (کیم و همکاران، ۲۰۰۶).

یکی از جنبه‌های کلیدی در مدیریت علف‌های هرز، تحلیل سودآوری و بهینه‌سازی اقتصادی است. تصمیم‌گیری در مورد نوع، زمان و میزان اعمال روش‌های کنترلی، نه تنها باید بر مبنای کارایی فنی، بلکه با در نظر گرفتن حداکثرسازی سود اقتصادی برای کشاورز صورت گیرد. با این حال، این تصمیم‌گیری غالباً تحت تأثیر عدم قطعیت‌های متعددی قرار دارد. عواملی نظیر نوسانات قیمت محصول، تغییرات آب و هوایی، میزان بارندگی، شیوع آفات و بیماری‌ها، و حتی مقاومت علف‌های هرز به علف‌کش‌ها، همگی می‌توانند بر بازده نهایی و در نتیجه سود حاصل از کشاورزی تأثیر بگذارند. این عدم قطعیت‌ها، نیاز به رویکردهای تحلیلی پیشرفته‌ای را ایجاد می‌کنند که قادر به مدل‌سازی و مدیریت ریسک‌های مرتبط با آن‌ها باشند.

در این راستا، رابطه بین دز علف‌کش و واکنش گیاه برای تجزیه و تحلیل اثربخشی علف‌کش و نحوه عملکرد آن از اهمیت اساسی برخوردار است. تابع دز-پاسخ ابزاری حیاتی برای تعیین حساسیت علف‌های هرز به علف‌کش است. چندین پژوهشگر نشان داده‌اند که مدل لگاریتمی-لجستیک مزایای متعددی نسبت به سایر روش‌های تجزیه و تحلیل دارد (کیم و همکاران، ۲۰۰۶؛ لاسردا و ویکتوریا فیلهور، ۲۰۰۴ و سانتین مونتانیا[4]، ۲۰۱۱).

این مقاله با هدف ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی سود در کنترل علف‌های هرز، تحت شرایط عدم قطعیت از نوع بازه‌ای، به این خلأ می‌پردازد. ما به دنبال توسعه یک مدلی هستیم که با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف سودآوری در محصول ذرت، به تعیین استراتژی‌های بهینه برای مدیریت علف‌های هرز کمک کند. تمرکز اصلی ما بر یافتن تعادلی است که نه تنها به کنترل مؤثر علف‌های هرز منجر شود، بلکه با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت‌های موجود، حداکثر سود را برای تولیدکننده به ارمغان آورد. این رویکرد، گامی مهم در جهت توسعه سیستم‌های کشاورزی پایدارتر و سودآورتر خواهد بود.

---

[1] Ahmadi (1999)
[2] Kim et al.
[3] Lacerda & Victoria Filho
[4] Santín-Montanyá

۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۱-مدل دز-پاسخ

رابطه بین دز علف‌کش و واکنش گیاه برای تجزیه و تحلیل اثربخشی علف‌کش و نحوه عملکرد آن از اهمیت اساسی برخوردار است. تابع دز-پاسخ برای تعیین کمیت حساسیت گیاه آسیب‌دیده به علف‌کش استفاده می‌شود.

طبق گفته سیفلدت و همکارانش[1] در مرجع (سیفلدت و همکاران، ۱۹۹۵)، به دلیل وجود پارامتر GR_{50} (کاهش رشد) در معادله، بهترین مدل دوز-پاسخ، مدل لگاریتمی-لجستیک است. شاخص GR_{50}، دز مورد نیاز برای کاهش ۵۰ درصدی رشد جمعیت گیاهان مضر را نشان می‌دهد.

مدل دز-پاسخ، که در این مرجع ارائه شده است، برای تعیین کمیت حساسیت ρ گیاه به علف‌کش u استفاده می‌شود و به شرح زیر است:

$$\rho(u) = c + \frac{d-c}{1+(\frac{u}{GR_{50}})^b} \quad (1)$$

که در آن، c حد پایین منحنی است که مربوط به میانگین پاسخ‌ها با دزهای بالای علف‌کش‌ها است، d حد بالای منحنی است که مربوط به میانگین پاسخ کنترل است، و b شیب منحنی، حدود است که مربوط به دز مورد نیاز برای کاهش ۵۰٪ رشد علف هرز نسبت به کنترل است.

۲-۲- مدل‌سازی پویایی جمعیت علف‌های هرز

برای درک بهتر این پویایی‌ها و امکان مدیریت بهینه آن‌ها، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. مدلی که پویایی جمعیت علف‌های هرز را توصیف می‌کند، بر اساس مطالعات جونز و کاچو[2] (۲۰۰۰) به صورت زیر است:

$$y_t = x^g \delta x_t \quad (2)$$

$$y_t^a = \left(1-\rho(u_t)\right) y_t \quad (3)$$

$$x_t^r = \exp\left[\frac{\gamma ln y_t^a}{\mu+\varepsilon ln y_t^a}\right] \quad (4)$$

$$x_t^n = \kappa x_t^r - \eta + \xi \quad (5)$$

$$x_{t+1} = x_t^n + (1-\Psi)(1-\delta)x_t \quad (6)$$

با متغیرها و پارامترهای تعریف شده در جدول (۱) وقتی y_t^aکمتر از ۰.۵ باشد، x_t^r تهی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین با توجه به رابطه (۴)، وقتی y_t^a به صفر نزدیک می‌شود، x_t^r به بی‌نهایت میل می‌کند.

جدول (۱): تعریف پارامترها و متغیرهای مدل جامعه

متغیرها	
x_t	تراکم بانک بذر (متر مربع) در ابتدای سال t
y_t	تراکم علف‌های هرز جوان (متر مربع) در سال t
y_t^a	تراکم علف‌های هرز سبز شده (متر مربع) که به مرحله بلوغ می ر می‌رسند
x_t^r	تراکم بذر (متر مربع) ناشی از تولید مثل علف‌های هرز

[1] Seefeldt et al
[2] Jones & Cacho

x_t^n	بذرهای جدید اضافه شده به بانک بذر (متر مربع) در سال t
x^g	درصد بذرهای جوانه زده که سبز شدند (متر مربع)
δ	سرعت جوانه زنی سالانه بذر علف های هرز
u_t	دوز علف‌کش مصرفی (لیتر در هکتار) در سال t
ρ	میزان مرگ و میر علف‌های هرز ناشی از علف‌کش در سال t
ε, γ, μ	ضرایب x_t^r
κ	میزان بقای بذرهای جدید
η	حذف بذر در زمان برداشت
ξ	واردات بذر (باد، پرندگان و غیره)
Ψ	میزان مرگ و میر بذرهای در حال خواب

نرخ مرگ و میر ناشی از علف‌کش، $\rho(u_t)$، که در (۱) ارائه شده است، از اهمیت اساسی برخوردار است، زیرا رابطه بین دز علف‌کش و پاسخ گیاه را توصیف می‌کند و برای درک اثربخشی علف‌کش و نحوه عملکرد آن استفاده می‌شود.

۲-۳- تابع تولید و تابع سود در کنترل علف‌های هرز

در هر سیستم کشاورزی، عوامل متعددی بر میزان تولید نهایی محصول تأثیرگذار هستند که برخی از آن‌ها ثابت و برخی دیگر متغیرند. به عنوان مثال، عملکرد محصول می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر رقم و نوع خاک، میزان بارندگی، و شیوع آفات و بیماری‌ها قرار گیرد. با توجه به نقش حیاتی علف‌های هرز در کاهش تولید محصول، در این مطالعه تمرکز اصلی بر ارزیابی تأثیر این عامل است و سایر عوامل تأثیرگذار، ثابت فرض می‌شوند.

هدف در این مرحله، بررسی تغییرات تراکم علف‌های هرز در محصول از طریق کاربرد علف‌کش‌ها است؛ بدین معنی که تنها این روش کنترل (کاربرد آفت‌کش شیمیایی) مورد بررسی قرار می‌گیرد و سایر روش‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین، تنها دو عامل اصلی به عنوان متغیر در مدل در نظر گرفته می‌شوند: تراکم اولیه جمعیت علف‌های هرز (x_t) و دز علف‌کش اعمال شده (u_t). سایر عوامل ثابت در نظر گرفته شده و با z_t نمایش داده می‌شوند. بر این اساس، تابع تولید (Y) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (جونز و کاچو، ۲۰۰۰):

$$Y = f(x_t, u_t, z_t) \quad (۷)$$

تأثیر x_t بر Y کاهش عملکرد حاصل از محصول است، در حالی که تأثیر u_t کاهش ضرر ناشی از x_t است. تابع تولید (۷) را می‌توان به دو تابع دیگر تقسیم کرد Y_0: که عملکرد در یک محصول عاری از علف هرز است و Y_L که کاهش عملکرد مرتبط با تراکم و کنترل علف‌های هرز است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y_0 = f_1(z_t) \quad (۸)$$

$$Y_L = f_2(x_t, u_t) \quad (۹)$$

که در آن Y_L مربوط به کاهش عملکرد از طریق رقابت بین گیاه زراعی و علف هرز است. طبق نظر کوزنس[1] (۱۹۸۵) تابعی که به بهترین شکل کاهش عملکرد را به عنوان تابعی از تراکم علف هرز توصیف می‌کند، یک تابع هذلولی است، زیرا برای تراکم کم علف هرز، رقابت بیشتری با گیاه زراعی وجود دارد و بنابراین باعث کاهش تولید می‌شود. با این

[1] Cousens

حال، هنگامی که تراکم علف هرز زیاد است، افزایش رقابت درون گونه‌ای تمایل به کاهش عملکرد دارد. تابع هذلولی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Y_L = \frac{aD}{1+\frac{a}{r}D}, \tag{10}$$

که در آن a پارامتری است که نشان‌دهنده کاهش عملکرد ناشی از هر بار اضافه شدن علف هرز در هر متر مربع (تراکم‌های کم علف هرز)، r پارامتری است که نشان‌دهنده کاهش عملکرد زمانی است که تراکم علف هرز به بی‌نهایت میل می‌کند (تراکم‌های زیاد علف هرز) و D تابعی از تراکم اولیه علف هرز و نسبت علف‌های هرز کشته شده توسط کاربرد علف‌کش بر اساس $\rho(u_t)$ است:

$$D = x_t\big(1-\rho(u_t)\big), \qquad 0 \le \rho \le 1 \tag{11}$$

کاهش عملکرد در تولید، به دلیل اثر سمی ماده شیمیایی (سمیت گیاهی) بر روی محصول، طبق کار پاندی و مد[1] در تخمین زده شد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y_p = \phi u_t \tag{12}$$

که در آن ϕ یک پارامتر تعدیل است که به علف‌کش اعمال شده بستگی دارد. بنابراین، تابع تولید Y به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$Y = Y_0(1-Y_L)\big(1-Y_p\big) \tag{13}$$

پس از تعریف تابع تولید، تابع سود برای مسئله‌ای که در آن دز بهینه علف‌کش اعمال شده به محصول تعیین می‌شود، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\pi(x_t,u_t) = P_y Y(x_t,u_t) - P_u u_t - C(t) \tag{14}$$

با پارامترهای تعریف شده در جدول (۲) عبارت P_yY در (۱۴) عملکرد کل است که نه تنها توسط سطح متغیر کنترل، بلکه توسط تراکم اولیه علف هرز، x_t، نیز تعیین می‌شود. بنابراین، عملکرد کل برای هرگونه تغییر ut با مقدار اولیه x_tمشخص خواهد شد. با این حال، در یک سیستم تولید پویا، برآورد هزینه، تابع تغییراتی است که ناشی از تقاضای بیشتر یا کمتر برای حشره‌کش، قارچ‌کش، مواد کمکی یا حتی نیاز به آبیاری است.

جدول (۲): تعریف پارامترهای مدل اقتصادی

π	سود سالانه مزرعه
P_y	قیمت هر واحد محصول
P_u	هزینه هر واحد کنترل
C	هزینه‌های ثابت اعمال کنترل و تولید

طبق گزارش موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی، عوامل دیگری نیز بر هزینه‌های ذرت تأثیر می‌گذارند، مانند هزینه‌های مربوط به نیروی کار، مدیریت قبل از کاشت، کوددهی، کاشت و برداشت. همچنین عامل عدم قطعیت در هزینه‌های تولید وجود دارد که به دلیل تغییرات ناشی از مدیریت ذرت، قیمت واحد کنترل، P_u، و همچنین قیمت واحد تولید، P_y، از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است. این نشان‌دهنده دسترسی کمتر به عوامل تولید یا حتی محدودیت‌های لجستیکی برای تأمین عناصر لازم برای تولید است.

---
[1] Pandey & Medd

تعیین این نوسانات در هزینه‌های تولید برای تضمین سودآوری ضروری است و لازم است احتمال وقوع یک سناریوی خوش‌بینانه یا بدبینانه در سیستم تولید در نظر گرفته شود. به منظور توصیف عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای P_y، P_u و C، این پارامترها از نوع بازه‌ای در نظر گرفته خواهند شد.

تابع سود برای مسئله‌ای که در آن هدف تعیین دز بهینه علف‌کش مورد استفاده برای محصول، با در نظر گرفتن نوسانات قیمت و هزینه‌های تولید است، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\prod(x_t,u_t) = [\underline{P}_y, \overline{P}_y y]Y(x_t,u_t) - [\underline{P}_u, \overline{P}_u]u_t - [\underline{C(t)}, \overline{C(t)}] \quad (15)$$

که در آن عبارت $[\underline{P}_y, \overline{P}_y y]Y$ در (۱۵) کل بازده است که نه تنها توسط سطح متغیر کنترل و تراکم اولیه علف هرز، x_t، بلکه توسط تغییرات احتمالی در قیمت هر واحد محصول نیز تعیین می‌شود. به طور مشابه، عبارت $[\underline{P}_u, \overline{P}_u]$ ut تغییرات احتمالی در هزینه هر واحد کنترل را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، $[\overline{C(t)}, \underline{C(t)}]$ نشان‌دهنده نوسانات در هزینه‌های اعمال کنترل و تولید است. بنابراین، تابع سود بازه‌ای ، وقوع سناریوهای خوش بینانه یا بدبینانه را در یک سیستم تولید ارزیابی می‌کند.

۲-۴-مسئله کنترل بهینه بازه‌ای

مسئله کنترل بهینه در پی یافتن قانون کنترلی برای یک سیستم دینامیکی معین است به شکلی که ضابطه بهینگی خاصی به دست آید. مسئله کنترل، تابعی از متغیرهای کنترل و متغیرهای حالت است. کنترل بهینه، در واقع مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل است که مسیری از متغیرهای کنترل که تابع هزینه را بهینه می کند، نشان می دهد.

یک مسئله کنترل بهینه از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: توصیفی ریاضی از سیستم دینامیکی که باید کنترل شود، بیان مشخصه‌ای از یک معیار عملکرد و مشخصه‌ای از محدودیت ها. معیار عملکرد معمولا یک تابع از متغیرهای حالت و کنترل است که کیفیت کنترل را اندازه گیری می کند. محدودیت ها ممکن است شامل شرایط اولیه و نهایی، محدوده هایی بر روی متغیرهای حالت و کنترل و معادلات دیفرانسیلی که دینامیک سیستم را توصیف می کنند، باشند (لیل و همکاران[1]، ۲۰۲۱).

تعریف ۱. (۹). فرض کنید $A = [\underline{a}, \overline{a}]$ و $B = [\underline{b}, \overline{b}]$ دو بازه باشند. رابطه ترتیب $\leq_{LU}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$A \leq_{LU} B$ اگر و تنها اگر $\overline{a} \leq \overline{b}$ و $\underline{a} \leq \underline{b}$ باشد. همچنین، $A <_{LU} B$ اگر و تنها اگر، $A \leq_{LU} B$ و $A \neq B$ باشد.

مسائل کنترل بهینه از نظریه حساب تغییرات در حدود سال ۱۹۵۶ سرچشمه گرفتند. بلمن[2] (۱۹۵۷) و پونتریاگین[3] (۲۰۱۸) نقش عمده‌ای در توسعه این نظریه داشتند (لیل و همکاران، ۲۰۲۱). نظریه کنترل بهینه برای توصیف و مطالعه کاربردها، معمولاً موقعیت‌هایی که تعیین ضرایب یک تابع، مانند اعداد حقیقی، دشوار است، استفاده می‌شود. در این زمینه، در این بخش، مختصری از مسائل کنترل بهینه با مقدار بازه ارائه خواهد شد، که در آن ضرایب تابع هدف نامشخص و با عدم قطعیت از نوع بازه در نظر گرفته می‌شوند.

در یک مسئله کنترل بهینه، یک متغیر حالت وابسته به زمان $x = x(t) \in R^n$ طبق یک دینامیک معین تکامل می‌یابد.

[1] Leal et al.
[2] Bellman
[3] Pontryagin et al.

$$x'(t) = f(x(t), u(t), t), \quad t > t_0 \tag{۱۶}$$

با شروع از حالت اولیه $x(t_0) = x_0$. در اینجا $f: R \times R^n \times R^m \rightarrow R^n$ مربوط به مدل مورد مطالعه است، $x_0 \in R^n$ حالت اولیه سیستم و $u: R \rightarrow R^m$ یک پارامتر آزاد است که بر دینامیک تأثیر می‌گذارد و کنترل سیستم نامیده می‌شود. در بسیاری از مسائل، یک شرط مرزی نهایی $x(t_1) = x_1$ یا یک شرط مرزی عرضی نیز ارائه می‌شود. معادله (۱۶) معادله حالت نامیده می‌شود (لیل و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به مسائل کنترل بهینه مقدار بازه که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است، هدف، حداکثرسازی تابعی‌های بازه از نوع زیر می باشد:

$$I(x,u) = \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), u(t), t)\mathrm{dt}, \tag{۱۷}$$

که در آن، $L:R \times I(R)^n \times I(R)^m \dashrightarrow I(R)^n$ تابعی بازه‌ای وابسته به متغیرهای بازه‌ای مقدار X و U است. علاوه بر این، $X \in X_{ad}$ و، $U \in U_{ad}$ که X_{ad} و U_{ad} مجموعه‌ای از حالت‌ها و کنترل‌های قابل قبول بازه‌ای می‌باشند. کاندیداهای جواب مسئله کنترل بهینه بازه‌ای، فرآیندهای بازه‌ای قابل قبول $(X, U) \in X_{ad} \times U_{ad}$ هستند. بنابراین، مسئله کنترل بهینه بازه‌ای توصیف شده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} & max \quad I(x,u) = \int_{t_0}^{t_1} L(x(t), u(t), t)dt, \\ & \text{s.t} \quad U \in U_{ad} \\ & x'(t) = f(x(t), u(t), t), \quad t > t_0 \\ & \quad x(t_0) = x_0 \end{aligned} \tag{۱۸}$$

تعریف ۲. (۹). فرض کنید $(\hat{x}, \hat{u})$ یک فرآیند قابل قبول از مسئله (۱۸) باشد؛ یعنی $(\hat{x}, \hat{u}) \in X_{ad} \times U_{ad}$. گفته می‌شود $(\hat{x}, \hat{u})$ یک جواب بهینه LU برای مسئله (۱۸) است، اگر $(x, u) \in X_{ad} \times U_{ad}$ وجود نداشته باشد، به طوری که:

$$<_{LU} \ I(\hat{x}, \hat{u}) \tag{۱۹}$$

$I(x, u)$

قضیه ۱ (۹): فرض کنید تابع بازه ای $L: [t_0, t_1] \times R^n \times R^m \rightarrow I(R)$ به ازای همه $t \in [t_0, t_1]$، در متغیرهای $x(.)$ و $u(.)$ به طور پیوسته مشتق پذیر از E و محدب از LU است. فرض کنید $f: [t0, t1] \times Rn \times Rm \rightarrow Rn$ برای همه $t \in [t_0, t_1]$ به طور پیوسته در متغیرهای x و u مشتق‌پذیر و محدب باشد. اگر $(\hat{x}, \hat{u}, \hat{p}) \in C([t_0, t_1]; R^n) \times C([t_0, t_1]; R^m)$، یک جواب برای دستگاه معادلات باشد.

$$\begin{cases} x'(t) = \dfrac{\partial \widetilde{H}}{\partial x}(t, x, u, \hat{p}) \\ p'(t) = -\dfrac{\partial \widetilde{H}}{\partial x}(t, x, u, \hat{p}) \\ \dfrac{\partial \widetilde{H}}{\partial x}(t, \hat{x}, \hat{u}, \hat{p}) = 0, \quad t \in (t_0, t_1), \\ x(t_0) = t_0 \, e\hat{p}(t_1) = 0 \end{cases} \tag{۲۰}$$

که در آن $H = (\lambda_1 \underline{l} + \lambda_2 \bar{l}) + p^T f$ با $0 < \lambda_1, \lambda_2 \in R$، به طوری که $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ باشد، آنگاه (x, u) یک جواب بهینه LU برای معادله (۱۸) است.

۲-۵- فرمول‌بندی مسئله کنترل بهینه علف‌های هرز با عدم قطعیت از نوع بازه‌ای

طبق گفته کندی[1] (۲۰۱۲) ، مسئله کنترل علف‌های هرز باید به عنوان یک مسئله مدیریت منابع در نظر گرفته شود و برای این کار، توسعه یک مدل پویا ضروری است. بنابراین، لازم است تعریف شود که چگونه متغیر حالت در طول زمان تکامل می‌یابد. در این حالت، بانک بذر، x_t، به عنوان متغیر حالت و u_t، که در تابع دز-پاسخ $\rho(u_t)$ بیان می‌شود، به عنوان متغیر کنترل در نظر گرفته می‌شوند. معادله‌ای که تغییرات این بانک بذر را در طول زمان توصیف می‌کند، باید به عنوان یک معادله پویا تعریف شود. در این حالت، بذرهای گیاه به عنوان یک منبع تجدیدپذیر و بانک بذر بعنوان موجودی این منبع در نظر گرفته می‌شوند. در مسائل پویا، این موجودی می‌تواند راه‌حل بهینه مسئله را در طول زمان تغییر دهد.

با گذشت زمان، اندازه بانک بذر ممکن است به دلیل عوامل مختلفی مانند عملکرد کنترل اعمال شده که باعث کاهش بانک بذر می‌شود و همچنین تولید مثل گیاه که باعث رشد بانک بذر در طول سال‌ها می‌شود، تغییر کند. این تغییرات را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد:

$$x_{t+1} = (1-\Psi)(1-\delta)x_t + \kappa \exp\left(\frac{\gamma \ln\left((1-\left(c+\frac{d-c}{1+e^{(bl(n(u_t)-\ln(GR_{50}))}}\right)x^g\delta x_t\right)}{\mu+\varepsilon \ln\left((1-\left(c+\frac{d-c}{1+e^{(bl(n(u_t)-\ln(GR_{50}))}}\right)x^g\delta x_t\right)}\right) - \eta + \xi \qquad (۲۱)$$

توجه داشته باشید که در مدل جمعیتی ارائه شده توسط (۲)-(۶)، با جایگزینی (۲) در (۳)، (۳) در (۴)، (۴) در (۵)، (۵) در (۶)، پویایی جمعیت خلاصه شده توسط (۱۰) را بدست می‌آوریم. بهینه‌سازی فرآیند در دوره t مستقیماً بر بهینه‌سازی در دوره $t+1$، در مدل پویا (۲۱) تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، میزان کنترل اعمال شده در یک دوره مستقیماً بر راه‌حل بهینه در دوره بعدی تأثیر خواهد گذاشت.

به طور کلی، هدف تعیین چگونگی و میزان تغییر بانک بذر، x_t، در هر فصل یا سال، با کاربرد علف‌کش، u_t، است، که در نتیجه هدف، کاهش استفاده از علف‌کش و در نتیجه، به حداکثر رساندن سود تولیدکننده با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف در هزینه تولید است. از آنجایی که هدف این تحقیق بهینه‌سازی یک تابع با مقدار بازه‌ای است، مسئله حاصل، یک مسئله کنترل بهینه با مقدار بازه‌ای خواهد بود.

مسئله کنترل بهینه با مقدار بازه‌ای به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\max\ J = \sum_{t=0} \alpha^t \Pi(x_t, u_t) \qquad (۲۲)$$

Subject to

$$x_{t+1} = g(x_t, u_t) \qquad (۲۳)$$

$$x(0) = x_0 \qquad (۲۴)$$

$$0 \le u(t) \le u_{max} \qquad (۲۵)$$

که در آن J مقدار بازه‌ای سود حاصل در یک دوره T ساله است، Π یک تابع مشتق‌پذیر E است (لیل و همکاران، ۲۰۲۲)، که توسط معادله (۱۵) داده شده است، α یک عامل تخفیف است، u_{max} حداکثر دز علف‌کش مجاز در مزرعه و معادله (۲۵) مجموعه مقادیر قابل قبول برای u_t است.

[1] Kennedy

مسئله شرح داده شده توسط معادلات (۲۲)-(۲۵) یک مسئله‌ی کنترل بهینه با تابع هدف بازه‌ای مقدار است. بنابراین، بر اساس نوعی رابطه‌ی ترتیبی در فضای بازه‌ای ، مفهوم راه‌حل برای مسئله‌ی مورد نظر تعریف می‌شود. از آنجایی که هدف مورد نظر توصیف سناریوهای مختلف سودآوری در یک سیستم تولید محصول است، رابطه‌ی ترتیبی مورد استفاده LU خواهد بود. اگر هدف حداقل کردن تغییرپذیری سودآوری باشد، باید از رابطه ترتیبی LS استفاده شود (لیل و همکاران، ۲۰۲۱).

تکنیک وزن‌دهی مسئله‌ی مقدار بازه‌ای، که در بخش قبلی اکنون برای مسئله کنترل بهینه با مقدار بازه‌ای توسعه داده خواهد شد، با هدف تعیین نرخ سالانه‌ی علف‌کشی که سود مقدار بازه‌ای را در سیستم تولید ذرت، به معنای رابطه‌ی ترتیبی LU، به حداکثر می‌رساند. یکی از اجزای مهم این نوع مسئله، متغیر حالت مشترک است که با p_t نشان داده می‌شود، مشابه ضریب لاگرانژ. نحوه‌ی وارد کردن متغیر حالت مشترک در مسئله‌ی کنترل بهینه از طریق تابع همیلتون است. برای مسئله‌ی مدیریت علف‌های هرز، تابع همیلتون با مقدار بازه‌ای به صورت زیر ارائه می‌شود (کندی، ۲۰۱۲):

$$H_t = (p_{t+1}, x_t, u_t) = \Pi(x_t, u_t) + \alpha p_{t+1} g(x_t, u_t) \qquad (۲۶)$$

برای مشکل کنترل علف‌های هرز مورد بحث، از سیستم زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial H_t}{\partial u_t} = \left(\lambda_1 \underline{p_y} + \lambda_2 \overline{p_y}\right)\frac{\partial Y}{\partial u_t} - \left(\lambda_1 \underline{p_u} + \lambda_2 \overline{p_u}\right) + \alpha p_{t+1}\frac{\partial g}{\partial u_t} = 0 \qquad (۲۷)$$

$$\alpha p_{t+1} = -\frac{\partial H_t}{\partial x_t} = -\left(\lambda_1 \underline{p_y} + \lambda_2 \overline{p_y}\right)\frac{\partial Y}{\partial x_t} - \alpha p_{t+1}\frac{\partial g}{\partial x_t} \qquad (۲۸)$$

$$x_{t+1} = \frac{\partial H_t}{\partial p_{t+1}} = g(x_t, u_t) \qquad (۲۹)$$

با تأکید بر این واقعیت که H یک تابع کلاسیک است که به صورت زیر داده می‌شود:

$$H_t = \left(\lambda_1 \underline{\pi}(x_t, u_t) + \overline{\pi}(x_t, u_t)\right) + \alpha p_{t+1} g(x_t, u_t) \qquad (۳۰)$$

با $\lambda_1, \lambda_2 \in R$ ، $0 \le$، به طوری که $\lambda 1 + \lambda 2 = 1$. بنابراین، (۲۲) شرط لازم برای حداکثرسازی مسئله نسبت به u_t را فراهم می‌کند، (۲۸) مربوط به معادله‌ی ضرایب لاگرانژ و (۲۹) بیان مجدد معادله‌ی حرکت نسبت به بانک بذر است.

متغیر حالت به حالت اولیه سیستم x_0 بستگی دارد، اگرچه x_0 داده شده است، p_1 ناشناخته است و یک شرط اضافی، که به عنوان شرط عرضی شناخته می‌شود، برای اینکه مسئله یک جواب منحصر به فرد داشته باشد، مورد نیاز است. به طور خاص، داریم که زمان نهایی T داده شده است و حالت نهایی x_t آزاد است، بنابراین شرط عرضی $p_t + 1 = 0$ است . بنابراین، برای هر مقدار λ_2 ،$\lambda_1 > ۰$، یک فرآیند LU بهینه تعیین می‌شود که به ترتیب از متغیر حالت x، متغیر کنترل u و متغیر حالت مشترک مربوط به حالت، p، تشکیل شده است.

از آنجایی که مسئله با مقدار بازه‌ای مورد بحث را می‌توان به عنوان یک مسئله وزنی کلاسیک تفسیر کرد که محدودیت‌هایی روی متغیر کنترل، u_t، به شکل کران‌های پایین و بالا دارد، باید یک روش برنامه‌ریزی غیرخطی برای متغیرهای کراندار اتخاذ شود. بنابراین، از روش ASA_CG استفاده شد.

روش ASA_CG[1]که توسط آسا[2] (۲۰۱۸) بیان شده است شامل ترکیبی از دو الگوریتم مورد استفاده برای حل عددی مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی است. این الگوریتم شامل دو مرحله است، مرحله اول تصویرسازی گرادیان غیریکنواخت و مرحله دوم انجام یک بهینه‌سازی بدون قید، که توسط روش گرادیان مزدوج اجرا می‌شود و همچنین مجموعه‌ای از

[1] Active-Set Algorithm with Conjugate Gradient
[2] Asa et al.

قوانین برای شاخه‌بندی بین این دو مرحله. به عبارت دیگر، این الگوریتم بین تکرارهای این دو روش به طور متناوب عمل می‌کند.

از آنجایی که روش گرادیان پیش‌بینی‌شده ممکن است در مجاورت یک حداقل محلی همگرایی کندی داشته باشد، الگوریتم به روش گرادیان مزدوج منشعب می‌شود تا از ویژگی همگرایی فوق خطی که این روش دارد، بهره‌برداری کند. روش ASA_CG به عنوان ورودی به یک جواب اولیه x_0 و رویه‌ای که گرادیان تابعی که باید بیشینه شود را محاسبه می‌کند، نیاز دارد. نحوه انتخاب α_k و d_k توسط الگوریتم شرح داده شده در الگوی آسا (۲۰۱۸) است. برای محاسبه α_k، یک جستجوی خطی در جهت d_k، بر اساس گرادیان تابع همیلتونی مسئله، انجام می‌شود[۱].

۴-تحلیل یافته‌ها

این بخش به ارائه یک مطالعه موردی می‌پردازد که در آن پویایی جمعیت علف هرز مهاجم دودندانه در کشت ذرت، با استفاده از کنترل شیمیایی آترازین، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. هدف اصلی این مطالعه، یافتن بهینه‌ترین راهکار برای مدیریت آلودگی علف‌های هرز و تخمین سودآوری حاصل در دو سناریوی بدبینانه و خوش‌بینانه است.

۴-۱-پارامترها و داده‌ها

مقادیر پارامترهای اقتصادی مربوط به محصول ذرت در دوره کشت ۱۴۰۱/۱۴۰۰ ، به همراه پارامترهای مدل جمعیتی علف هرز و مدل دز-پاسخ علف‌کش، در جدول ۳ ارائه شده‌اند. ضرایب فنی و هزینه‌های کشت ذرت برای دوره ۱۴۰۱/۱۴۰۰ از گزارش‌هایی شرکت بازرگانی دولتی ایران (GTC) و آرشیو گزارش‌های آماری وزارت جهاد کشاورزی استخراج شده‌اند. در این تحلیل، تکامل بانک بذر و میزان بهینه علف‌کش برای دو افق زمانی ۵ و ۱۰ ساله، با در نظر گرفتن شرایط اولیه بانک بذر، ۵۰۰ بذر در متر مربع، ارزیابی شدند.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

جمعیت	ارزش ها
$\delta(\%)$	۶۰
$\psi(\%)$	۳۰
η (دانه ها در متر مربع)	۰
ξ(دانه ها در متر مربع)	۰
$\kappa(\%)$	۳۰
$x^g(\%)$	۶۰
γ	۶/۸۰
μ	۲/۰۰
ε	۰/۶۷
دوز-پاسخ	
b	-۰/۱۸
c	-۳/۰۵
d	۱۰۳/۰۴

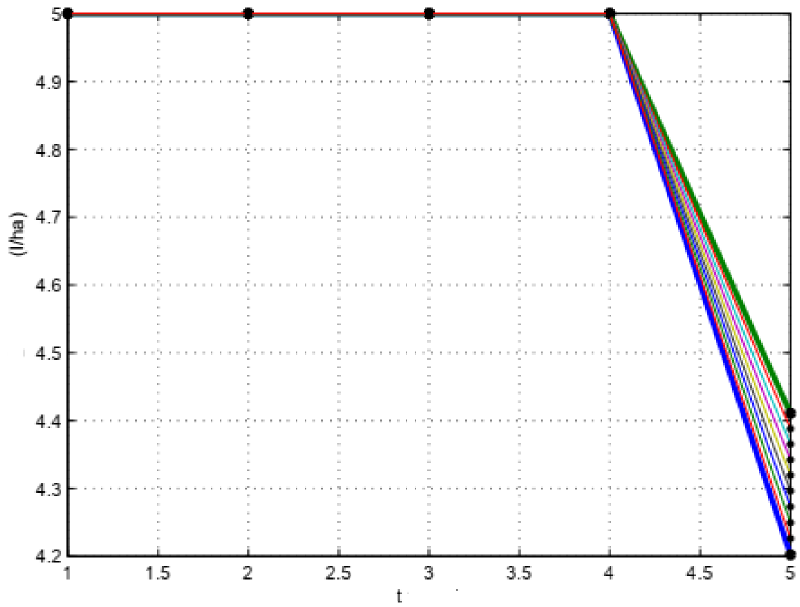
[۱] برای اطلاعات بیشتر در مورد روش ASA_CG، به مقالات آسا و همکاران(۲۰۱۲) و تریفتن و بائو (۲۰۲۲) مراجعه کنید.

GR_{50} (لیتر در هکتار)	۷۲۷/۳۳
اقتصادی	
$[\underline{p_y}, \overline{p_y}]$(دلار در تن)	[498,547.8]
$[\underline{p_u}, \overline{p_u}]$ (دلار به ازای هر لیتر)	[11.90,12.90]
Y_0 (تن در هکتار)	7.80
$[\underline{c}, \overline{c}]$	[954.73,1457.09]
u_{max} (لیتر در هکتار)	5.00

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۲-تحلیل نتایج

نتایج شبیه‌سازی با هدف حداکثرسازی سود تولیدکننده و با در نظر گرفتن نوسانات قیمت واحد محصول و کنترل، و همچنین عدم قطعیت در هزینه‌های اعمال کنترل و تولید، ارائه می‌شوند. از آنجایی که برای هر جفت عامل وزن‌دهی λ_2 , $\lambda_1>0$، یک جواب بازه‌ای برای مسئله بهینه‌سازی بازه‌ای به دست می‌آید، شکل ۱ طیف وسیعی از کنترل‌های LU بهینه را برای افق ۵ ساله به تصویر می‌کشد.



شکل (۱): کنترل‌های LU برای افق ۵ ساله

منبع: یافته‌های تحقیق

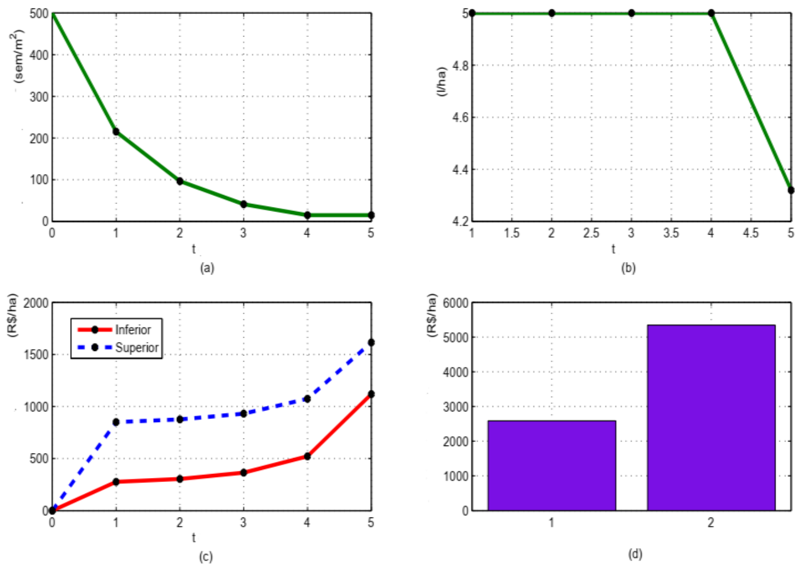
از هر یک از این کنترل‌ها، تکامل بانک بذر و سناریوهای سودآوری مربوطه تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه تغییرات میان کنترل‌ها و تأثیر آن‌ها بر سودآوری ناچیز بود، در ادامه نتایج تنها برای یک راه‌حل LU خاص، با در نظر گرفتن $\lambda1=\lambda2=0.5$، برای هر دو افق ۵ ساله و ۱۰ ساله ارائه شده‌اند. این انتخاب به ما امکان می‌دهد تا به بررسی عمیق‌تر پویایی‌های اصلی بپردازیم.

شکل (a) و (b) مقدار بهینه بانک بذر (x) و شکل (c) و (d) به ترتیب نرخ بهینه کنترل (دز علف‌کش اعمال شده، (u) را برای افق‌های زمانی ۵ و ۱۰ ساله نشان می‌دهند. این اشکال به وضوح نشان می‌دهند که به دلیل اعمال دزهای بهینه

علف‌کش (همانطور که در شکل‌های (c) و (d) ارائه شده‌اند)، بانک بذر با گذشت زمان کاهش قابل توجهی را تجربه کرده است. نکته قابل توجه این است که پس از چهارمین کاربرد، دزهای علف‌کش کاهش یافته و حتی در این سناریو نیز، بانک بذر در سطوح پایینی تثبیت می‌شود که نشان‌دهنده اثربخشی استراتژی بهینه در مدیریت بلندمدت علف هرز است.

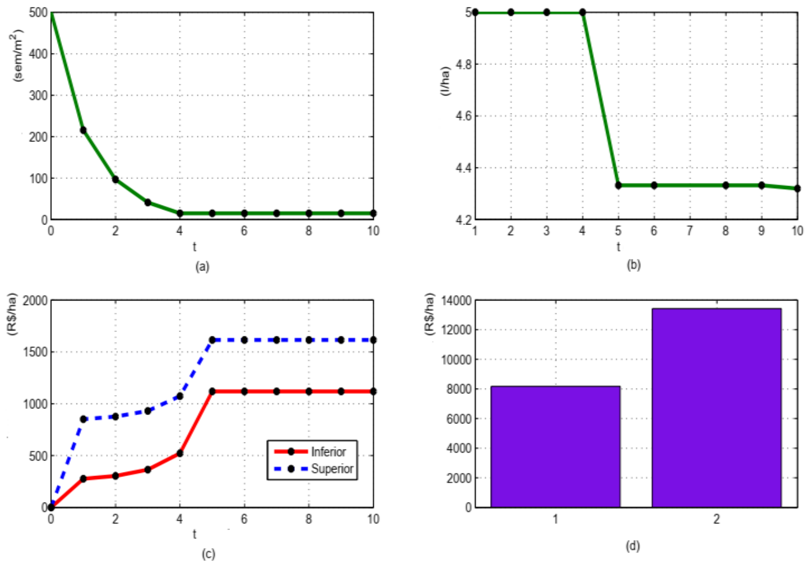
شکل ۲ (c) و ۳ (c) سناریوهای سودآوری بدبینانه و خوش‌بینانه را با در نظر گرفتن نرخ بهینه کاربرد علف‌کش به نمایش می‌گذارند. منحنی پایینی نشان‌دهنده سناریوی بدبینانه و منحنی بالایی، سناریوی خوش‌بینانه سود تولید ذرت است. این منحنی‌ها تغییرات سود را بر اساس نوسانات در هزینه تولید و قیمت واحد محصول و کنترل توصیف می‌کنند. در افق ۱۰ ساله، مشاهده می‌شود که از سال پنجم به بعد، تابع سود با مقدار بازه‌ای به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش سود با کاهش نرخ کاربرد علف‌کش در دوره‌های مربوطه مرتبط است، که نشان‌دهنده بهینه‌سازی مؤثر هزینه‌ها در کنار کنترل آلودگی است .شکل ۲ (d) و ۳ (d) به ترتیب سناریوی کلی سودآوری را در طول ۵ و ۱۰ سال نشان می‌دهند.

با استفاده از فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی مقدار بازه‌ای، میزان بهینه کاربرد علف‌کش تعیین شد، کاهش بانک بذر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، و علاوه بر آن، سناریوهای سودآوری در طول افق زمانی قابل پیش‌بینی بودند. این رویکرد امکان تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر را برای کشاورزان فراهم می‌آورد.



شکل (۲): نتایج بهینه‌سازی برای افق ۵ ساله

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۳): نتایج بهینه‌سازی برای افق ۱۰ ساله

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی پویا برای کنترل علف‌های هرز ارائه شده است. با استفاده از ابزارهای تحلیلی سیستم های برنامه ریزی پویا، شرایط استفاده بهینه از نهاده‌ها (یعنی کنترل علف‌های هرز) برای موقعیت‌های استاتیک و دینامیک مقایسه شده است. مسئله کنترل علف‌های هرز را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی پویا با مقدار بازه‌ای مربوط به کاربرد علف‌کش فرمول‌بندی و ارائه شد. هدف، حداکثرسازی سود تولیدکننده در مواجهه با عدم قطعیت‌های اقتصادی بود. برای حل این مسئله، از مفهوم راه‌حل ایجاد شده توسط رابطه ترتیبی LU استفاده شد، که امکان بررسی سناریوهای سودآوری خوش‌بینانه و بدبینانه را فراهم آورد.

این تحلیل با در نظر گرفتن عدم قطعیت از نوع بازه‌ای، گسترش بیشتری یافته و نشان می‌دهد که سطح بهینه کنترل علف‌های هرز نیز تحت تأثیر عدم قطعیت در اثربخشی علف‌کش‌ها و بقای بذرهای علف‌های هرز تولید شده قرار می‌گیرد. با تحلیل پویایی جمعیت علف هرز مهاجم دودندانه و علف‌کش آترازین، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اعمال دزهای بهینه علف‌کش منجر به کاهش پایدار بانک بذر و افزایش قابل توجه سودآوری در طول زمان می‌شود، حتی با کاهش تدریجی دزهای مورد نیاز، با در نظر گرفتن یکی از راه‌حل‌های بهینه LU، تکامل بانک بذر و سناریوهای سودآوری به وضوح نشان دادند که مدیریت هوشمندانه علف‌های هرز، منجر به بهبود چشمگیر بهره‌وری و سود اقتصادی در بلندمدت می‌گردد. این رویکرد، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های پایدار در کشاورزی ارائه می‌دهد.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی مرتبط با تحقیق حاضر ندارند.

فهرست منابع

1. Ahmadi, A. (1999). Determination of critical period of weed control on tomato. M.Sc. Thesis, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Pardis Abouraihan, Tehran University, Iran, 100p (In Persian).
2. Asa, C. G. (2018). Pengaruh Kesadaran Iklan, Kesadaran Merek, Citra Merek dan Ekuitas Merek Mamahke Jogja dengan Produk Kue di Media Sosial Terhadap Keputusan Pembelian Konsumen.
3. Cousens, R. (1985). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of applied biology*, *107*(2), 239-252.
4. Bellman, R. I. C. H. A. R. D. (1957). Dynamic programming, princeton univ. *Press Princeton, New Jersey*, *39*.
5. Jones, R. E., & Cacho, O. J. (2000). A dynamic optimisation model of weed control.
6. Kennedy, J. O. (Ed.). (2012). *Dynamic programming: applications to agriculture and natural resources*. Springer Science & Business Media.
7. Kim, D. S., Marshall, E. J. P., Brain, P., & Caseley, J. C. (2006). Modelling the effects of sub-lethal doses of herbicide and nitrogen fertilizer on crop–weed competition. *Weed Research*, *46*(6), 492-502.
8. Lacerda, A. L. D. S., & Victoria Filho, R. (2004). Dose-response curves in weed species with the use of herbicide glyphosate. *Bragantia*, *63*, 73-79.
9. Leal, U. A., Maqui, G., Silva, G. N., & Lodwick, W. (2022). Single-Level Differentiability for Interval-valued Functions. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, *9*(1).
10. Leal, U., Lodwick, W., Silva, G., & Maqui-Huaman, G. G. (2021). Interval optimal control for uncertain problems. *Fuzzy Sets and Systems*, *402*, 142-154.
11. Merotto Jr, A., Jasieniuk, M., Osuna, M. D., Vidotto, F., Ferrero, A., & Fischer, A. J. (2009). Cross-resistance to herbicides of five ALS-inhibiting groups and sequencing of the ALS gene in Cyperus difformis L. *Journal of agricultural and food chemistry*, *57*(4), 1389-1398.
12. Pandey, S., & Medd, R. W. (1990). Integration of seed and plant kill tactics for control of wild oats: an economic evaluation. *Agricultural Systems*, *34*(1), 65-76.
13. Pontryagin, L. S. (2018). *Mathematical theory of optimal processes*. Routledge.
14. Trefethen, L. N., & Bau, D. (2022). *Numerical linear algebra*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
15.Santín-Montanyá, I. (2011). The bioassay technique in the study of the herbicide effects. *Herbicides, Theory and Applications. Rijeka: InTech*, p431-454.

16.Seefeldt, S. S., Jensen, J. E., & Fuerst, E. P. (1995). Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed technology*, *9*(2), 218-227.