

مقاله علمی پژوهشی

مدل‌سازی رشد جمعیت شته گندم-گل سرخ *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) در شرایط مزرعهمسعود امیرمعافی^{۱*}، شهرام شاه‌روخی خانقاه^۱ و میررضا جمشیدی^۲

۱ - مؤسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و ۲ - مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، لرستان، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: mamirmaafi@iripp.ir

چکیده

شته گندم-گل سرخ، *Metopolophium dirhodum* یکی از مهمترین شته‌های مزارع گندم و جو بوده و جمعیت آن در مزرعه به سرعت افزایش می‌یابد. در این مطالعه، سه سری داده مربوط به نوسانات جمعیت شته گندم-گل سرخ در یک مزرعه گندم در ورامین (تهران) در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰ و دو سری داده در یک مزرعه جو در منطقه الشتر استان لرستان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ برای مدل‌سازی رشد جمعیت این شته استفاده شد. نتایج نشان داد، مدل‌های نرمال و مربع سکانت هذلولوی نسبت به دو مدل لوجستیک و رشد نمایی توصیف بهتری از تغییرات جمعیت شته گندم-گل سرخ در کل فصل برای تمام سری داده‌ها در مزارع گندم و جو ارائه دادند. مدل‌های نرمال و مربع سکانت هذلولوی به خوبی با داده‌های مربوط به تغییرات جمعیت شته گندم-گل سرخ برازش یافتند، توصیف زیستی منطقی از تغییرات جمعیت شته ارائه دادند و یک مبنای آماری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی به دست آمده در این تحقیق بودند. پراسنجه‌های این مدل‌ها عبارتند از پیش‌بینی اندازه اوج جمعیت (N_{max})، پیش‌بینی زمان اوج جمعیت (t_{max}) و نرخ تولد سرانه تقریبی که از نظر کاربردی اهمیت دارند. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های رگرسیونی نرمال و مربع سکانت هذلولوی با منحنی‌های فراوانی شته برازش خوبی داشته و می‌توان توسط پراسنجه‌های این مدل‌ها، پراسنجه‌های مدل مکانیکی را تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: گندم، شته گندم-گل سرخ، رشد جمعیت، مدل‌سازی.

Population growth modeling of rose-grain aphid, *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) on wheat in field condition information systemsMasood Amir-Maafi^{*1}, Shahram Shahrokhi¹ & Mir Reza Jamshidi²

1. Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran & 2. Lorestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Lorestan, Iran.

*Corresponding author, E-mail: mamirmaafi@iripp.ir

Abstract

The rose-grain aphid, *Metopolophium dirhodum* is one of the most important species among wheat and barley aphids and its population trajectory in field is characterized by rapid boom. In the present study, three datasets from *M. dirhodum* population in a wheat field in Varamin (Tehran) from 1999 to 2001 and two datasets from a barley field in Aleshtar (Lorestan) in 2017 and 2018 were used for modeling the aphid population dynamics. We demonstrate that Normal and Hyperbolic Secant Squared models presented a much better description of *M. dirhodum* population dynamics in the whole season for all datasets from wheat and barley fields than the Exponential or Logistic Growth models. The Normal and Hyperbolic Secant Squared model analysis of data showed that the models were useful representations of the data, gave biologically reasonable descriptions of rose-grain aphid population dynamics.

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰

دبیر تخصصی: یعقوب فتحی‌پور

and were statistically powerful basis for the analysis of experimental data obtained in this research. The parameters of two mentioned models are the predicted peak size, N_{max} , the predicted time of peak, t_{max} , and an approximate per capita birth rate, all of which are of interest in practical applications. Overall, the results of this study showed that the Normal and Hyperbolic Secant Squared regression models were shown to fit diverse abundance curves adequately and the parameters of the mechanical model can be estimated by the parameters of these models.

Key words: Wheat, Rose-grain aphid, Population growth, Modeling.

Received: 30 December 2020, Accepted: 11 September 2021.

مقدمه

شته‌ها یکی از گروه‌های مهم آفات کشاورزی هستند. مهمترین ویژگی آن‌ها رشد سریع جمعیت در مزارع است، به طوری که این پتانسیل بالای رشد، سبب طغیان آن‌ها در برخی مناطق و یا سال‌ها می‌شود. در دهه‌های گذشته، شته‌ها به عنوان آفات مهم غلات گزارش شده‌اند (Blackman & Eastop, 1985). چندین گونه شته در مزارع غلات اهمیت دارند که یکی از آن‌ها شته گندم-گل سرخ (*Metopolophium dirhodum* (Walker) Dixon, 1987a,b; Blackman & Eastop, 1985) است. این گونه علاوه بر خسارت مستقیم، ناقل بیماری ویروسی جو نیز می‌باشد (Dixon, 1987a,b; Blackman & Eastop, 1985). این شته از مزارع غلات بسیاری از مناطق ایران گزارش شده است (Hodjat & Azemayeshfard, 2000; Rezvani, 2001). این گونه فراوان‌ترین شته مزارع گندم در برخی مناطق مانند کرج (Amirnazari, 2000) و ورامین (Shahrokhi, 2003; Noori & Rezwani, 1994) است.

زیست‌شناسی شته‌های بی‌بال (Shahrokhi & Amir-Maafi, 2013) و روش‌های نمونه‌برداری (Shahrokhi & Amir-Maafi, 2011 a, b) شته گندم-گل سرخ در گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. این گونه مانند بسیاری از شته‌ها در شرایط مطلوب محیطی از پتانسیل رشد جمعیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، به طوری که جمعیت آن در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۷۰ درصد هر سه روز دو برابر می‌شود (Shahrokhi, 2003). ویژگی رشد تصاعدی جمعیت پیش‌بینی آن را مشکل می‌سازد. همچنین مطالعه شته‌ها در شرایط صحرائی، به دلیل ویژگی‌هایی مانند داشتن نسل‌های متداخل، تولید مثل مستمر و توزیع سنی ناپایدار (Barlow & Dixon, 1980) عملاً غیرممکن است. بر این اساس مدل‌سازی جمعیت چنین آفاتی مناسب‌ترین روش برای مطالعه و درک پویایی جمعیت آن‌ها است. همچنین چنین مدل‌هایی برای توسعه موفق برنامه‌های کنترل شیمیایی و بیولوژیکی ضروری است (Metcalf & Metcalf, 1995).

در سال‌های اخیر توسعه نظری مدل‌سازی رشد جمعیت شته‌ها پیشرفت زیادی کرده است. برخی مدل‌های شبیه‌سازی برای رشد جمعیت شته‌ها توسط Barlow & Dixon (1980) توسعه یافته است. آن‌ها با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد جمعیت شته‌ها، بازخورد منفی جمعیت شته‌ها را بر خودشان، به دلیل تجمع اثرات سوء بر گیاه مانند مواد دفعی، ترشح عسلک و همچنین در اثر متقابل با دشمنان طبیعی توصیف کردند. (Kindlmann (1985) یک مدل مکانیکی را برای بیان تاثیر تجمعی عسلک بر بقای شته سیاه باقلا (*Aphis fabae* Scopoli) که در آن وابستگی تجمعی بصورت خطی وارد شده بود، پیشنهاد کرد و نشان داد که این مدل از نظر تحلیلی قابل آزمون است. راه حل این مدل بازخوردی برای داده‌ها در Kindlmann (2004) و Kindlmann *et al.* (2004) ارائه شده و مفهوم وابستگی اندازه تجمعی در مطالعات شبیه‌سازی جمعیت شته توسط Kindlmann و همکاران مورد استفاده قرار گرفته است (Kindlmann & Stadler, 2004; Kindlmann & Dixon, 1996). در یک تحقیق دیگر (1999) Williams *et al.* مدلی برای تعیین تاثیر میزبان بر رشد جمعیت شته سبز هلو، *Myzus persicae* sulzer و شته سیاه باقلا، *Aphis fabae* تهیه کردند. اساس مدل آن‌ها بر این بود که نرخ رشد سرانه این شته‌ها در چغندر قند با

افزایش سن گیاه میزبان کاهش می‌یابد. (Costamagna et al., 2007) با استفاده از داده‌های صحرایی بررسی تغییرات جمعیت شته سویا (*Aphis glycines* Matsumura) مدل نرخ ذاتی افزایش جمعیت نزولی (Decreasing r) را که در آن تاثیر دشمنان طبیعی حذف شده بود، ارایه نمودند. با این وجود، تا قبل از ارایه مدل توسط Prajneshu (1998)، هیچ مدل آماری قابل آزمون در مورد رشد جمعیت شته‌ها وجود نداشت. این محقق یک مدل قطعی غیرخطی برای رشد جمعیت شته‌ها، بر این اساس که نرخ رشد جمعیت تابعی از اندازه تجمعی جمعیت است، پیشنهاد کرد. مدل تصادفی آنالوگ این مدل که مبتنی بر فراوانی تجمعی جمعیت است، توسط (Matis et al., 2005) توسعه یافت که با استفاده از این مدل، کاربرد عملی مدل Prajneshu (1998) را با تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های بزرگی روی شته *Monellia caryella* (Fitch) نشان دادند. مدل ارایه شده توسط (Matis et al., 2007b) یکی از مهمترین مدل‌هایی است که برای توصیف رشد جمعیت در اکولوژی استفاده شده است. این مدل به خوبی پویایی جمعیت شته *M. caryella* را توصیف نموده است (Matis et al., 2006; 2007a,b). این مدل همچنین برای جمعیت حشراتی که به صورت یکنواخت (monotonically) افزایش یافته و به یک سطح تعادل به نام ظرفیت قابل تحمل محیط (Carrying capacity) می‌رسند، مورد استفاده قرار گرفته است (Matis & Al-; Matis et al., 2010 Muhammed, 2010). مدل یاد شده ابزار قدرتمندی برای کسانی که در مدیریت آفات کار می‌کنند بوجود آورده است، به این معنی که امکان پیش بینی اندازه و اوج جمعیت را فراهم نموده و این امکان را به مدیران می‌دهد که بتوانند جمعیت چنین آفاتی را پیش‌بینی نمایند (Matis et al., 2005; Matis et al., 2007a, b; Matis et al., 2009; Matis et al., 2008a).

هدف از این بررسی، مقایسه مدل‌های رشد جمعیت برای توصیف پویایی جمعیت شته گندم-گل سرخ است، که علاوه بر توصیف روند رشد جمعیت این آفت، می‌توان از آن برای پیش بینی دوره زمانی فعالیت شته گندم-گل سرخ که حدود ۳ تا ۵ هفته است، استفاده نمود. اهمیت چنین مدلی، امکان توسعه روش‌هایی با قوانین ساده برای تشخیص به موقع حضور آفت است. همچنین این مدل می‌تواند به توصیف رشد و نمو جمعیت کمک نموده و راهنمای تحقیقاتی برای بررسی رابطه بین شته، میزبان گیاهی و دشمنان طبیعی آن‌ها باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های این بررسی مربوط به یک مزرعه گندم در استان تهران (ورامین) در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰ و یک مزرعه جو در استان لرستان (الشتر) در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ است. به این منظور جمعیت شته گندم-گل سرخ در سال‌های مورد مطالعه در مناطق مورد نظر مورد آماربرداری قرار گرفت. نمونه‌برداری‌ها با شروع فصل زراعی آغاز و تا زمان برداشت محصول به صورت هفتگی ادامه یافت. به منظور نمونه برداری از شته گندم-گل سرخ، ۵۰ ساقه گندم (واحد نمونه برداری) و ۱۰۰ ساقه جو بطور تصادفی انتخاب و قسمت‌های آلوده به شته هر ساقه گندم (برگ‌ها و خوشه هر ساقه) در یک لوله آزمایشی قرار داده شدند. تعداد شته‌ها (پوره و حشره کامل) با استفاده از استرئومیکروسکوپ در آزمایشگاه شمارش و نتایج در جداول مربوطه ثبت شد. تغییرات جمعیت شته در مناطق مورد مطالعه و در سال‌های مورد بررسی با استفاده از مدل‌های نمایی، لجستیکی، نرخ ذاتی افزایش جمعیت نزولی و تصادفی مدل‌سازی شد که به شرح زیر است.

مدل نمایی (Exponential)

$$N_t = N_0 e^{rt} \quad (1)$$

که در این معادله t زمان (روز)، N_t اندازه جمعیت شته در زمان t (تعداد شته/ساقه)، N_0 جمعیت اولیه شته (تعداد شته/ساقه) و r نرخ ذاتی افزایش جمعیت شته است.

مدل لجستیکی (Logistic)

$$N_t = \frac{K}{1 + \frac{K-N_0}{N_0} e^{-rt}} \quad (۲)$$

که در این معادله K ظرفیت قابل تحمل محیط (تعداد شته / ساقه) است.

مدل نرمال (برای نرخ ذاتی افزایش جمعیت نزولی، (Decreasing r) (Costamagna et al., 2007):

این مدل توسط Costamagna et al. (2007) به عنوان یک مدل عمومی ارائه شده است که در آن نرخ ذاتی رشد جمعیت تابعی است که با زمان تغییر می کند. این مدل به صورت زیر نوشته می شود.

$$\dot{N} = r(t)N \quad (۳)$$

با

$$r(t) = r_{max}(1 - ct) \quad (۴)$$

در این مدل r_{max} نشان دهنده نرخ ذاتی افزایش جمعیت در زمان $t = 0$ و c شیب خط رگرسیون است. Williams et al. (1999) به صورت تجربی نشان داده اند که نرخ ذاتی افزایش جمعیت شته سبز هلو و شته سیاه باقلا روی چغندر قند با زمان کاهش می یابد. Costamagna et al. (2007) با حل تحلیلی این دو معادله آن را به صورت رگرسیون غیرخطی ارائه نمودند که به سادگی قابل حل است (معادله ۵).

$$N_t = N_{max} e^{(-g^2(t-t_{max})^2)} \quad (۵)$$

در این معادله N_{max} و t_{max} به ترتیب اوج جمعیت و زمانی که جمعیت به حداکثر خودش می رسد و همچنین g پراسنجه گسترش جمعیت است. مدل ارائه شده توسط Costamagna et al. (2007) دقیقاً شبیه منحنی نرمال است و از آن مشتق شده است، بنابراین با میانگین و انحراف معیار که مرکز و پراکنش این توزیع را نشان می دهد توصیف می شود، که عبارتند از:

$$\mu = t_{max} \quad (۶)$$

$$\sigma = (\sqrt{2g})^{-1} \quad (۷)$$

محدوده زیر منحنی (AUC) که تراکم تجمعی نیز خوانده می شود با انتگرال گیری از معادله ۵ بدست می آید که عبارت است از:

$$AUC = F(\infty) = \sqrt{\pi} N_{max} / g \quad (۹)$$

پراسنجه های مکانیکی مدل ۳، از پراسنجه های مدل رگرسیونی ۵ به دست می آید، که به شرح زیر است:

$$c = (t_{max})^{-1} \quad (۱۰)$$

$$r_{max} = 2g^2 t_{max} \quad (۱۱)$$

$$N_0 = N_{max} / \exp(g^2 t_{max}^2) \quad (12)$$

مدل مربع سکانت هذلولوی (برای رشد وابسته به اندازه-تجمعی) (Matis *et al.*, 2007b; 2008b) در مدل مربع سکانت هذلولوی (Hyperbolic Secant Squared) فرض بر این است که نرخ سرانه مرگ تابعی از اندازه جمعیت گذشته است:

$$F(t) = \int_0^t N(s) ds \quad (13)$$

با این فرض که نرخ تغییر بصورت،

$$\dot{N} = (\lambda - \delta F)N \quad (14)$$

بیان می‌شود، که در آن λ و δ به ترتیب نرخ تولد و مرگ است. (Prajneshu (1998 نشان داد که این معادله راه حل تحلیلی دارد. (Matis *et al.* (2007b) راه حل تحلیلی دیگری برای آن به شرح زیر ارائه داد:

$$N(t) = \frac{4N_{max}e^{-b(t-t_{max})}}{(1+e^{-b(t-t_{max})})^2} \quad (15)$$

که در این مدل، پراسنجه N_{max} نشان دهنده حداکثر جمعیت؛ t_{max} نشانگر زمانی است که این حداکثر رخ می‌دهد و b نرخ تولد تقریبی، هر دو پراسنجه اول دارای مفهوم زیستی هستند، بر این اساس انتخاب مقادیر اولیه این پراسنجه‌ها آسان خواهد بود. (Matis *et al.* (2008 b) راه حل تحلیلی دیگری برای این مدل ارائه نمودند که به عنوان مدل مربع سکانت هذلولوی خوانده می‌شود و به شرح زیر است:

$$N(t) = N_{max} \operatorname{sech}^2 \left[b(t - t_{max}) / 2 \right] \quad (16)$$

در این مدل نیز پراسنجه‌های N_{max} ، t_{max} و b استفاده شده که دو پراسنجه اول در اینجا نیز دارای مفهوم زیستی هستند. این مدل نیز شباهت زیادی به توزیع نرمال دارد، بنابر این با میانگین و انحراف معیار که مرکز و پراکنش این توزیع را نشان می‌دهد توصیف می‌شود، که عبارتند از:

$$\mu = t_{max} \quad (17)$$

$$\sigma = \pi / \sqrt{3} b \quad (18)$$

محدوده زیرمنحنی (AUC) که تراکم تجمعی نیز خوانده می‌شود با انتگرال‌گیری از معادله ۱۳ بدست می‌آید که عبارت است از:

$$AUC = F(\infty) = 4N_{max}/b \quad (19)$$

پراسنجه‌های مکانیکی مدل ۱۳، از پراسنجه‌های مدل رگرسیونی ۱۶ به دست می‌آید، که به شرح زیر است:

$$d = e^{(bt_{max})} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{b(d-1)}{(d+1)} \quad (21)$$

$$\delta = \frac{b^2}{2N_{max}} \quad (22)$$

$$N_0 = 4dN_{max}(1+d)^{-2} \quad (23)$$

به منظور مقایسه این مدل با مدل نرمال از روش توصیه شده (Matis *et al.*, 2009) استفاده شد. بنابراین نرخ سرانه رشد برای این مدل با استفاده از معادله زیر بدست آمد:

$$\dot{N}/N = -btanh\left[\frac{b(t-t_{max})}{2}\right] \quad (24)$$

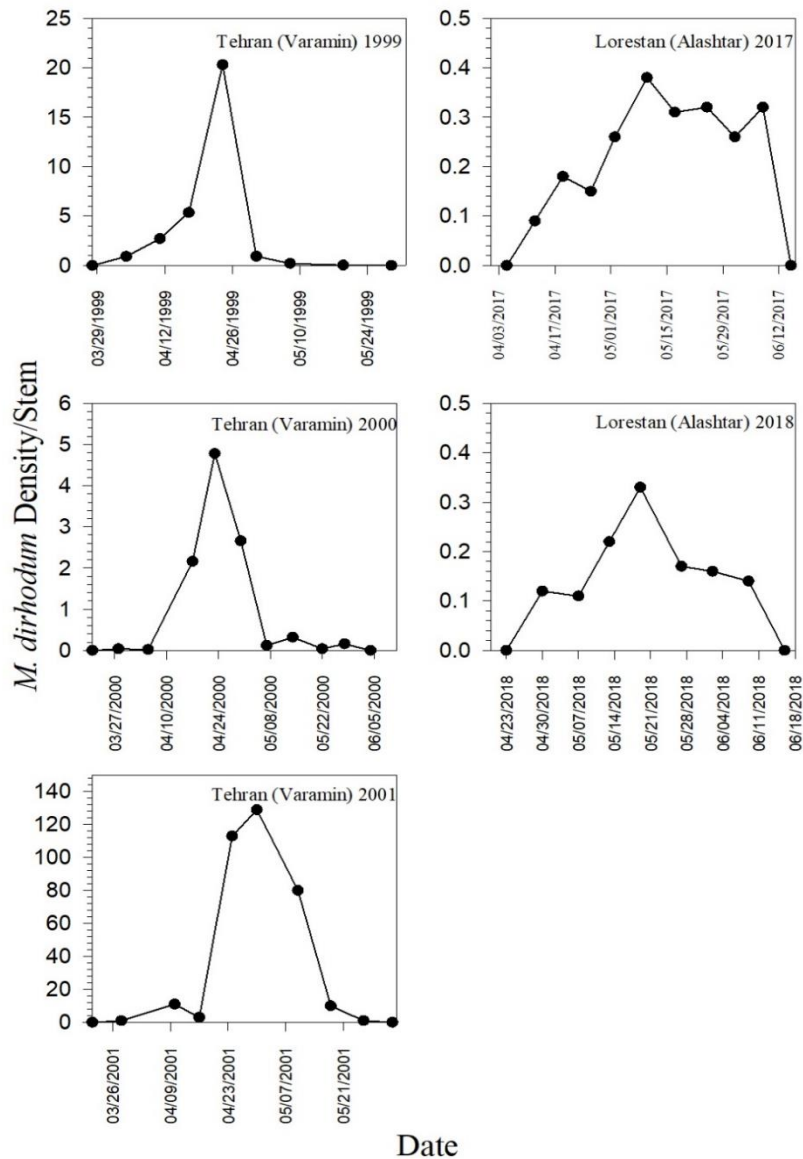
این معادله قابل مقایسه با معادله ۴ است. کلیه محاسبات با استفاده از رویه NLIN در نرم افزار SAS (Ver.9.4, 2013) و کلیه شکل‌ها با استفاده از نرم افزار SigmaPlot Ver. 12 (SysStat, 2012) ترسیم شده است. مقایسه مدل‌ها براساس ضریب تبیین انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی‌های انجام شده در دو استان تهران (ورامین) و لرستان (الشتر) در سال‌های مختلف نشان داد که تغییرات جمعیت شته گندم-گل سرخ در مزارع گندم و جو داری الگوی مشابهی است (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، جمعیت شته گندم-گل سرخ روی گندم در استان تهران (ورامین) در هر سه سال مورد بررسی در دهه دوم فروردین ماه و روی جو در استان لرستان (الشتر) در اواخر فروردین تا اوایل اردیبهشت ماه مشاهده شده است. عموماً اوج جمعیت در دهه اول اردیبهشت رخ می‌دهد، به استثناء سال ۱۳۹۷ که در استان لرستان (الشتر) در اواخر اردیبهشت ماه رخ داده است. دوره زمانی بین اولین مشاهده تا اوج جمعیت بین ۲۰ تا ۳۰ روز بود که به محل و سال مورد بررسی بستگی داشت. ویژگی مهم تغییرات جمعیت شته گندم-گل سرخ در هر دو مزرعه گندم و جو افزایش سریع جمعیت آن بود که بین سه تا چهار هفته بعد از اولین مشاهده شته رخ داد و به این دلیل پیش آگاهی جمعیت شته گندم-گل سرخ بسیار مشکل است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات جمعیت شته روی گندم در استان تهران (ورامین)، (جمعیت بالا، اوج جمعیت در سال‌های مورد مطالعه ۵ تا ۱۴۰ شته در هر ساقه) و روی جو در استان لرستان (الشتر)، (جمعیت پایین، اوج جمعیت در سال‌های مورد مطالعه ۰/۲۸ تا ۰/۳۶ شته در هر ساقه) مشابه و متقارن بود. در این الگو در ابتدای فصل جمعیت کم است و سپس با رشد سریع به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن جمعیت نزول می‌کند. چنین الگویی برای سایر شته‌ها نیز گزارش شده و دلیل این کاهش جمعیت، کاهش کیفیت میزبان (Williams *et al.*, 1999; Jones, 2007; Costamagna *et al.*, Douglas, 2003)، افزایش رقابت درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای به دلیل کاهش فضا (Honek *et al.*, 2006)، افزایش دما (Asin & Pons, 2001; Morgan *et al.*, 2001) و دشمنان طبیعی (Jones, 1979; Sigsgaard, 2002; Holland & Thomas, 1997) ذکر شده است.

بطور کلی اگرچه عوامل غیر زنده، دشمنان طبیعی و کاهش کیفیت گیاه همه از عوامل تعیین کننده نزول جمعیت شته‌ها در اواسط فصل هستند، اما هیچ یک از آن‌ها به تنهایی به عنوان عامل کاهش سریع جمعیت شته‌ها بیان نشده‌اند و پویایی جمعیت شته‌ها نیز مانند پویایی جمعیت سایر حشرات گیاه خوار احتمالاً ناشی از اثر متقابل

و پیچیده این عوامل است. برای مثال پویایی جمعیت شته‌ها و دشمنان طبیعی آن‌ها به شکل متفاوتی تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند (Skirvin et al., 1997). کیفیت گیاهان و تخصیص مواد شیمیایی ثانویه برای دفاع به شدت تحت تأثیر عوامل غیر زنده از جمله دما، بارندگی و سرعت باد قرار می‌گیرد (Bernays & Chapman, 1994) و حساسیت به دشمنان طبیعی ممکن است تحت تأثیر واکنش گیاه به افزایش جمعیت شته، افزایش یابد (van der Putten et al., 2001).



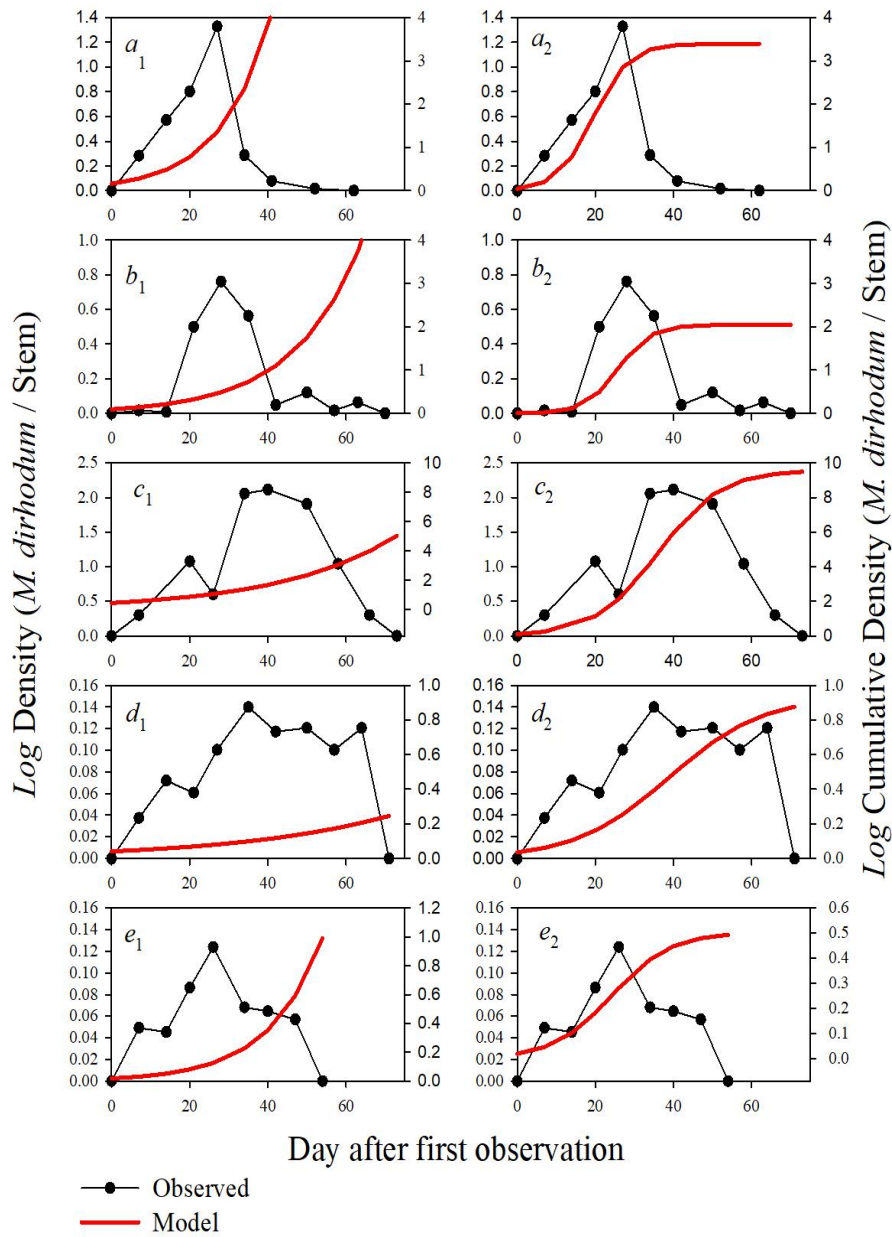
شکل ۱- تغییرات جمعیت کل شته *Metopolophium dirhodum* در مزرعه گندم استان تهران (ورامین) و مزرعه جو استان لرستان (الستر).

Fig. 1. Total population fluctuation of *Metopolophium dirhodum* in wheat field in Tehran province (Varamin) & barley field in Lorestan province (Alashtar).

نتایج تحقیق حاضر نشان داد، جمعیت شته گندم-گل سرخ در مزارع گندم و جو در یک دوره زمانی کوتاه و کاملاً مشخص وجود داشت. همینطور دارای رشد یکنواختی بود و حداکثر فراوانی آن به راحتی قابل تشخیص

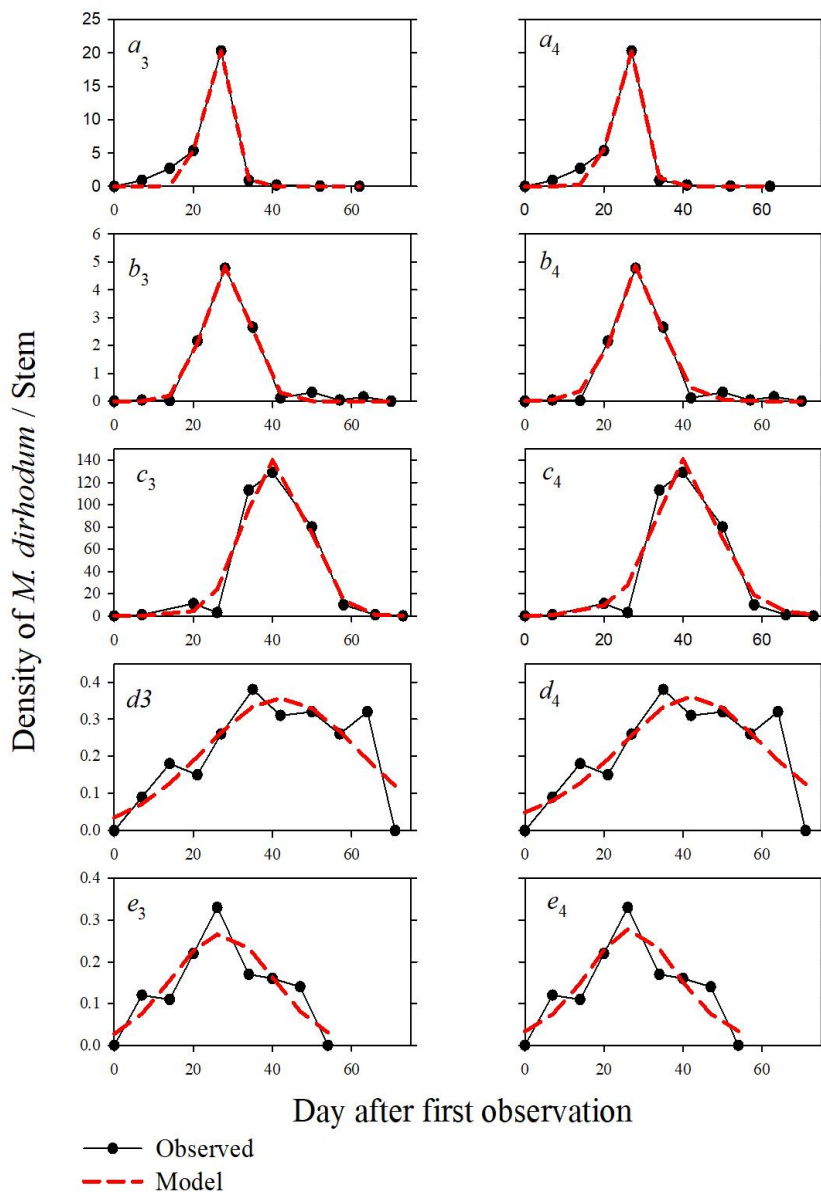
بود که چنین سیستمی برای مدل سازی الگوی کلی تغییرات جمعیت مناسب است (شکل ۱). به منظور مدل سازی رشد جمعیت شته ها، مدل های زیادی معرفی شده است که در این تحقیق برای درک پویایی جمعیت شته گندم - گل سرخ فقط از چهار مدل نمایی، لجستیک، نرمال (نرخ ذاتی افزایش جمعیت نزولی) و مدل مربع سکانت هذلولوی استفاده شد. نتایج برازش چهار مدل مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده و نشانگر این است که داده های مناطق مختلف در سال های متفاوت به خوبی با مدل های مورد نظر برازش یافته اند ($p > 0.90$). در بین این مدل ها، مدل های نمایی (شکل ۲، a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) و لجستیکی (شکل ۲، a_2, b_2, c_2, d_2, e_2) توانستند پویایی جمعیت شته را از زمان شروع مهاجرت به مزرعه تا زمانی که جمعیت شته به اوج رسیده توصیف کنند. مدل رشد نمایی تخمین مناسبی از رشد را برای اوایل فصل که هیچگونه محدودیت منابعی وجود ندارد، فراهم کرد، اما این مدل نتوانست تاثیر عوامل تلفات را بر تغییرات جمعیت شته در طول فصل تشریح نماید. فرض رشد نامحدود جمعیت در این مدل عملاً در طبیعت رخ نداده و غیر واقعی است (شکل ۲، a_1, b_1, c_1, d_1, e_1). مدل لجستیکی نیز با فرض محدود بودن رشد و داشتن یک حداکثر مشخص به نام ظرفیت قابل تحمل محیط (Verhulst, 1838) نتوانست تغییرات جمعیت شته را در کل فصل پیش بینی کند (شکل ۲، a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)، اگرچه شکل های متفاوتی با در نظر گرفتن این محدودیت از مدل رشد لجستیکی Verhulst ارائه شده و برای سیستم های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Tsoularis & Wallace, 2002). بنابراین فقط دو مدل نرمال (Costamagna et al., 2007) (شکل ۳، a_3, b_3, c_3, d_3, e_3) و مربع سکانت هذلولوی (Matis et al., 2007 b, 2008 b) (شکل ۳، a_4, b_4, c_4, d_4, e_4) به خوبی توانستند تغییرات جمعیت شته گندم-گل سرخ را در طول فصل تشریح نمایند.

در مجموع همانطور که به ترتیب در شکل ۲ (a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) و (a_2, b_2, c_2, d_2, e_2) و جدول ۱ نشان داده شده است، مدل های نمایی و لجستیکی فقط در مراحل اولیه رشد جمعیت شته گندم-گل سرخ با داده های تغییرات جمعیت شته به خوبی برازش داشتند و در زمان نزول جمعیت شته، برازش نیافته و قادر به توصیف تغییرات جمعیت نبودند، در صورتی که آزمون توانایی دو مدل نرمال و مربع سکانت هذلولوی در پیش بینی جمعیت شته در شرایط مختلف، داده های هر سال و منطقه بصورت جداگانه با این مدل ها برازش داده شدند و بطوری که جدول ۱ و شکل ۳ (a_3, b_3, c_3, d_3, e_3) و (a_4, b_4, c_4, d_4, e_4) نشان می دهد، هر دو مدل به خوبی با داده ها برازش یافتند. نظر به این که مدل نرمال (Costamagna et al., 2007) و مربع سکانت هذلولوی (Matis et al., 2007 b, 2008 b) مدل های مناسبی برای توصیف جمعیت شته گندم-گل سرخ بودند، پراسنجه های کلیدی این دو مدل مقایسه شدند (جدول ۱ و ۲). پراسنجه های $\sigma_1, t_{1max}, NI_{max}$ و $AUC1$ اشاره به پراسنجه های مدل مربع سکانت هذلولوی و $\sigma_2, t_{2max}, N2_{max}$ و $AUC2$ اشاره به پراسنجه های مدل نرمال دارد. مدل مربع سکانت هذلولوی (معادله ۱۶) و مدل نرمال (معادله ۵) با استفاده از رگرسیون غیرخطی با داده ها برازش داده شدند.



شکل ۲- پویایی جمعیت مشاهده شده شته *Metopolophium dirhodum* در مزرعه گندم در استان تهران (ورامین) (با a (1999), b (2000), c (2001)) و استان لرستان (الاشتر) (با d (2017), e (2018)) و برازش دو مدل با زیرنویس ۱ (نمایی) و ۲ (لجستیکی) نشان داده شده‌است. مشاهدات با نقطه-خط سیاه و مدل‌ها با خط قرمز نشان داده شده‌اند.

Fig. 2. Observed population dynamics of *Metopolophium dirhodum* in wheat fields in Tehran province (Varamin) (indicated by a (1999), b (2000), c (2001)) and Lorestan province (Alashtar) (indicated by d (2017), e (2018)) and the fit of two competing models (indicated by subscript, 1(Exponential), and 2 (Logistic)). Observations are indicated by black point-line and models by red solid line.



شکل ۳- پویایی جمعیت مشاهده شده شته *Metopolophium dirhodum* در مزرعه گندم در استان تهران (ورامین) (با a (1999), b (2000), c (2001)) و استان لرستان (الشر) (با d (2017), e (2018)) نشان داده شده است) و برازش دو مدل با زیرنویس ۳ (نرمال) و ۴ (مربع سکانت هذلولوی) نشان داده شده است. مشاهدات با نقطه-خط سیاه و مدلها با خط چین قرمز نشان داده شده اند.

Fig. 3. Observed population dynamics of *Metopolophium dirhodum* in wheat fields in Varamin (indicated by a (1999), b (2000), c (2001)) and Lorestan (indicated by d (2017), e (2018)) and the fit of two competing models (indicated by subscribe, 3 (Normal), 4 (Hyperbolic Secant Squared)). Observations are indicated by black point-line and models by red dashed line.

توصیف عمومی برازش مدلها (مدل مربع سکانت هذلولوی و نرمال)

هر دو مدل به خوبی با پنج سری داده مربوط به تغییرات جمعیت شته گندم - گل سرخ در مزارع گندم و جو برازش یافتند (جدول ۱). برای درک درست از این مدل‌ها ۴ حالت حداکثری و حداقلی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق حداکثر جمعیت شته در مزرعه گندم در استان تهران (ورامین) در سال ۱۳۸۰ مشاهده شد که تخمین مقدار آن با مدل مربع سکانت هذلولوی ۱۴۲ و با مدل نرمال ۱۴۱/۲ عدد شته بود و حداقل جمعیت در مزرعه جو در استان لرستان (الشتر) در سال ۱۳۹۷ مشاهده شد که مقدار تخمینی آن برای مدل‌های یاد شده به ترتیب ۰/۲۷۹ و ۰/۲۶۷ عدد شته بود. حداکثر و حداقل پراکندگی (انحراف معیار) به ترتیب در سال ۱۳۹۶ در استان لرستان (الشتر) و در سال ۱۳۹۹ در استان تهران (ورامین) مشاهده گردید (جدول ۲). حداکثر و حداقل تراکم تجمعی به ترتیب برای شته گندم - گل سرخ روی گندم در استان تهران (ورامین، ۱۳۸۰) و روی جو در استان لرستان (الشتر، ۱۳۹۷) توسط هر دو مدل تخمین زده شد. ضریب تبیین در همه موارد بیشتر از ۰/۹۰ بود که نشان داد این مدل‌ها به خوبی توانستند در حالت‌های مختلف (زمانی که اوج جمعیت بالا و یا پایین بود) و همچنین در پراکندگی باریک و یا وسیع تغییرات جمعیت، با داده‌ها برازش یابند (جدول ۱).

جدول ۱- پراسنجه‌های (میانگین \pm خطای معیار) چهار مدل برازش داده شده با فراوانی جمعیت شته *Metopolophium dirhodum* در مزرعه گندم استان تهران (ورامین) و مزرعه جو در استان لرستان (الشتر).

Table 1. Parameters (mean \pm SE) obtained by fitting four population growth models to mean population abundances of *Metopolophium dirhodum* in wheat field in Teheran province (Varamin) and barley field in Lorestan province (Alashtar).

Parameter	Varamin			Lorestan	
	1999	2000	2001	2017	2018
Exponential					
<i>r</i>	0.079 \pm 0.012	0.058 \pm 0.031	0.033 \pm 0.012	0.025 \pm 0.008	0.074 \pm 0.017
$\log(N_0)$	0.161 \pm 0.045	0.095 \pm 0.090	0.446 \pm 0.226	0.041 \pm 0.013	0.019 \pm 0.007
<i>r</i> ²	0.99	0.82	0.90	0.93	0.97
	<i>P</i> =0.001	<i>P</i> =0.031	<i>P</i> =0.003	<i>P</i> =0.0003	<i>P</i> =0.005
Logistic					
<i>r</i>	0.221 \pm 0.018	0.240 \pm 0.020	0.126 \pm 0.006	0.083 \pm 0.006	0.133 \pm 0.013
$\log(N_0)$	0.045 \pm 0.015	0.004 \pm 0.002	0.103 \pm 0.021	0.035 \pm 0.007	0.019 \pm 0.005
$\log(K)$	3.397 \pm 0.052	2.045 \pm 0.027	9.579 \pm 0.122	0.937 \pm 0.033	0.502 \pm 0.016
<i>r</i> ²	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001
Normal					
<i>N</i> _{max}	21.935 \pm 2.271	4.857 \pm 0.162	141.200 \pm 10.964	0.357 \pm 0.043	0.267 \pm 0.037
<i>t</i> _{max}	25.658 \pm 0.602	28.511 \pm 0.232	40.973 \pm 0.716	42.140 \pm 2.654	21.307 \pm 1.963
<i>g</i>	0.209 \pm 0.027	0.123 \pm 0.005	0.089 \pm 0.008	0.036 \pm 0.006	0.055 \pm 0.009
<i>r</i> ²	0.98	0.99	0.97	0.93	0.93
	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> =0.0006
Hyperbolic Secant Squared					
<i>N</i> _{max}	23.382 \pm 3.728	4.903 \pm 0.229	142.000 \pm 13.566	0.361 \pm 0.046	0.279 \pm 0.039
<i>t</i> _{max}	25.449 \pm 0.608	28.586 \pm 0.351	40.880 \pm 0.904	42.337 \pm 2.801	27.097 \pm 1.848
<i>b</i>	0.494 \pm 0.81	0.270 \pm 0.015	0.196 \pm 0.022	0.078 \pm 0.014	0.128 \pm 0.023
<i>r</i> ²	0.99	0.99	0.96	0.93	0.94
	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> <0.0001	<i>P</i> =0.0006

مقایسه نیکویی برازش

به طور کلی مدل مربع سکانت هذلولوی کمی بهتر از مدل نرمال با داده‌ها برازش یافت و در نتیجه تخمین‌های بهتری ارائه کرد (جدول ۱). یکی از بهترین روش‌ها برای مقایسه دو مدل، مقایسه نسبت مربع میانگین خطای (Error mean squares) دو مدل (EMS_{HSS}/EMS_N) است که برای دو حالت حداکثر و حداقل یعنی زمانی که پراکندگی تغییرات جمعیت شته وسیع و یا باریک بود به ترتیب ۰/۵۷ و ۲ بدست آمد. مقادیر نسبت بین مربع

میانگین خطا (حداقل ۰/۵۷ و حداکثر ۲) نشان دهنده این است که باقیمانده هر دو مدل به حدی کوچک است که از نظر بصری قابل مشاهده نمی‌باشد.

مقایسه میانگین و پراکندگی

هر دو مدل متقارن هستند و بدیهی است که مرکز منحنی تغییرات جمعیت مشاهده شده عمدتاً با مرکز منحنی‌های برازش یافته ($t1_{max}$ و $t2_{max}$) منطبق بوده و حدود یک روز اختلاف مشاهده شد، به استثناء داده‌های استان لرستان (الشتر) در سال ۱۳۹۶ که این تفاوت به ۷ روز رسید. در همه حالات، پیش‌بینی دو مدل برای زمان حداکثر جمعیت بسیار به همدیگر نزدیک بود. در این تحقیق برای مقایسه اندازه نسبی پیش‌بینی زمان حداکثر جمعیت شته با استفاده از مدل مربع سکانت هذلولوی ($t1_{max}$) و نرمال ($t2_{max}$) از رابطه رگرسیونی بدون عرض از مبدا و بدون هیچ پیش فرض و فقط با استفاده از شیب خط رگرسیون استفاده شد. معادله خط رگرسیون با ضریب تبیین برابر با ۱ که نشان دهنده انطباق کامل دو مدل با همدیگر بود (شکل ۴ B و جدول ۳)، به شرح زیر است:

$$t1_{max} = 0.999 t2_{max}$$

پراکندگی در مدل مربع سکانت هذلولوی ($\sigma1$) در همه موارد بیشتر از مدل نرمال ($\sigma2$) بود. حداقل و حداکثر نسبت پراکندگی مدل مربع سکانت هذلولوی به مدل نرمال ($\sigma1/\sigma2$) به ترتیب ۱/۰۸ استان تهران (ورامین، ۱۳۷۸) و ۱/۱۸ استان لرستان (الشتر، ۱۳۹۶) بود. اگرچه پراکندگی برای مدل مربع سکانت هذلولوی به طور کلی بیشتر بود، ولی این افزایش احتمالاً تابعی از دامنه بزرگتر است و از این رو قسمت عمده منحنی، در یک انحراف معیار از مرکز، همیشه کاملاً نزدیک به یکدیگر بود. شکل ۴، نشان دهنده رابطه بین $\sigma1$ و $\sigma2$ است. معادله خط رگرسیون آن بصورت زیر است:

$$\sigma1 = 1.159 \sigma2$$

ضریب تبیین برابر با ۰/۹۹۹ بدست آمد که نشان دهنده ۱۶ درصد افزایش پراکندگی برای مدل مربع سکانت هذلولوی نسبت به مدل نرمال بود (شکل ۴ C و جدول ۳).

مقایسه پراسنجه‌های کلیدی

تخمین مقدار حداکثر جمعیت در مدل مربع سکانت هذلولوی ($N1_{max}$) همواره بیشتر از مدل نرمال ($N2_{max}$) (به استثناء استان لرستان (الشتر) ۱۳۹۶) بود، اگرچه این تفاوت اندک است. حداقل نسبت $N1_{max}$ به $N2_{max}$ ، ۰/۵۵ (استان لرستان (الشتر)، ۱۳۹۶) و حداکثر نسبت $N1_{max}$ به $N2_{max}$ ، ۱/۰۷ (استان تهران (ورامین)، ۱۳۷۸) بود. شکل ۴ نشان دهنده رابطه رگرسیونی بین $N1_{max}$ و $N2_{max}$ است که معادله رگرسیونی آن با ضریب تبیین ۰/۹۹۹ به شرح زیر است که نشان دهنده یک درصد افزایش حداکثر جمعیت برای مدل مربع سکانت هذلولوی است (شکل ۴ A و جدول ۳):

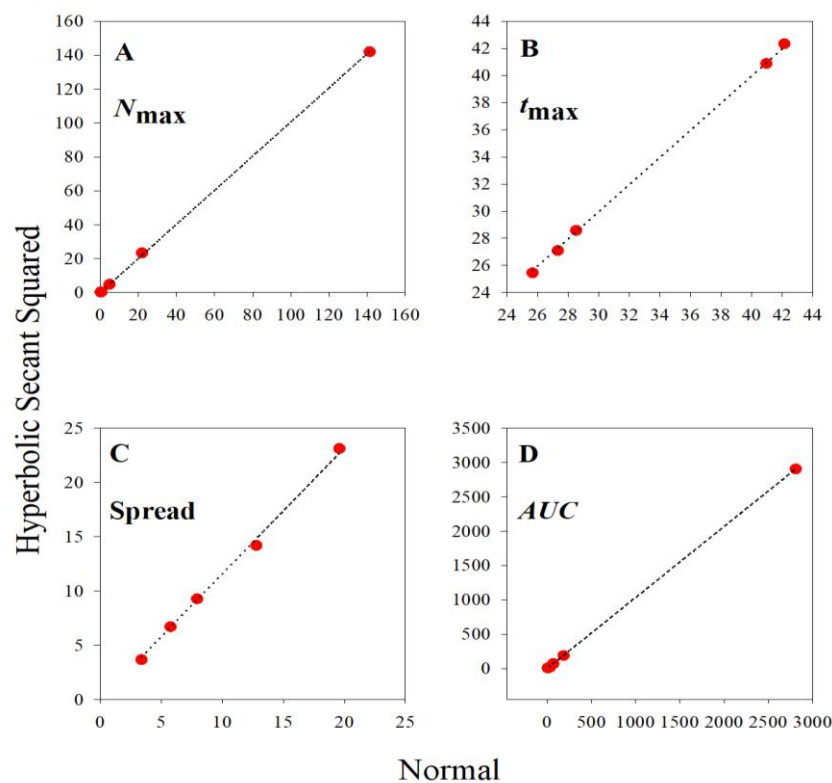
$$N1_{max} = 1.007N2_{max}$$

تخمین تراکم تجمعی برای مدل مربع سکانت هذلولوی ($AUC1$) نسبت به مدل نرمال در ۴ سری از ۵ سری داده بیشتر بود. حداکثر و حداقل نسبت $AUC1$ به $AUC2$ ، به ترتیب ۱/۰۴ و ۰/۵۷ بود. شکل ۴ نشان

دهنده رابطه رگرسیونی بین نسبت $AUC1$ و $AUC2$ است که معادله رگرسیونی آن بصورت زیر است:

$$AUC1 = 1.035 AUC2$$

ضریب تبیین ۱ بدست آمد که نشان دهنده ۴ درصد افزایش در تخمین تراکم تجمعی برای مدل مربع سکانت هذلولوی است (شکل ۴ D و جدول ۳).



شکل ۴- نمودار اسکاتر خط رگرسیون پراسنجه‌های مدل‌های نرمال در مقابل مربع سکانت هذلولوی برای مجموعه داده‌های شته *Metopolophium dirhodum* خط‌چین نشان دهنده مدل است. A. اندازه اوج جمعیت، B. زمان اوج جمعیت، C. پراکندگی و D. تراکم تجمعی.

Fig. 4. Scatter plots with regression lines for corresponding parameters for Hyperbolic Secant Squared vs Normal models for *Metopolophium dirhodum* data set. Dashed line indicate model. A. Peak size. B. Time of peak. C. Spread (σ). D. Cumulative density (AUC).

در یک نتیجه گیری کلی مدل‌های نمایی و لجستیک نتوانستند تغییرات جمعیت شته گندم-گل‌سرخ را در مزرعه گندم و جو در طول فصل توصیف نمایند. در صورتی که دو مدل مربع سکانت هذلولوی و نرمال که هر دو متقارن نیز هستند، نه تنها با داده‌های تغییرات جمعیت شته گندم-گل‌سرخ به خوبی برازش یافتند، بلکه به خوبی منحنی رشد جمعیت شته گندم-گل‌سرخ را در طول فصل توصیف کردند. مهمترین نکته‌ای که در این دو مدل یاد شده وجود دارد و در این بررسی نشان داده شد، این است که علیرغم فرمول‌بندی مکانیکی و راه‌حل‌های تحلیلی کاملاً متفاوت، هر دو مدل با مجموعه داده‌های تغییرات جمعیت شته چه آنجایی که اوج جمعیت زیاد یا

کم است و چه آنجایی که پراکندگی باریک یا وسیع است، به خوبی برازش یافتند. این ویژگی مهم قبلاً توسط Matis et al. (2007 c) برای مدل مربع سکانت هذلولوی اثبات شده و این محققین به دلیل همین ویژگی، این مدل را برای بسیاری از اهداف کاربردی قابل استفاده می دانند. اگرچه هر دو مدل به خوبی با داده ها برازش یافتند، اما تفاوت های مشخصی بین این دو مدل وجود داشت. این خصوصیات متمایز عبارتند از:

۱- مدل مربع سکانت هذلولوی برای داده های تغییرات جمعیت شته گندم - گل سرخ به ویژه در موارد نابرابر بودن مربع میانگین خطا، مناسب تر بود. مدل مربع سکانت هذلولوی از تناسب بهتری با داده ها برخوردار بود که ممکن است به دلیل ماهیت داده های صحرائی باشد.

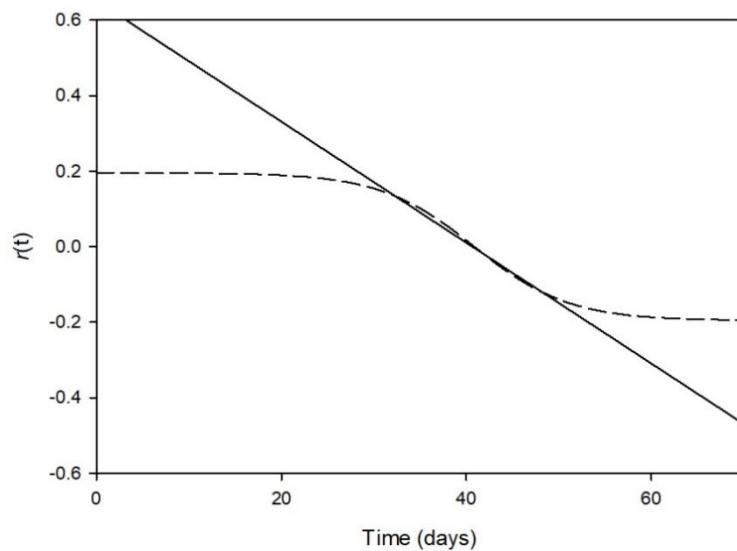
۲- مراکز منحنی های (t_{max}) برازش شده با دو مدل همیشه بسیار نزدیک به یکدیگر بودند. دامنه های مربوط به هر مدل نزدیک به ۱ برای هر مجموعه داده بود، با این حال، پراکندگی مدل مربع سکانت هذلولوی نسبت به مدل نرمال حدود ۱۶ درصد بیشتر بود.

۳- مقدار حداکثر جمعیت (N_{max}) پیش بینی شده توسط مدل مربع سکانت هذلولوی همواره بیشتر از مدل نرمال بود، اگرچه این تفاوت اندک و حدود یک درصد بود.

اگرچه هیچ رابطه تحلیلی بین پراسنجه های دو مدل مربع سکانت هذلولوی و نرمال وجود ندارد، اما از پراسنجه های هر دو مدل می توان به خوبی برای تخمین پراسنجه های مدل های مکانیکی یکدیگر استفاده نمود (Matis et al., 2009). این محققین همچنین بیان داشته اند که تابع نرخ سرانه رشد که توسط معادلات ۴ (مدل نرمال) و ۲۴ (مدل مربع سکانت هذلولوی) محاسبه شده و با همدیگر تفاوت دارند، می توانند اساس مقایسه دو مدل قرار گیرند. برای درک بهتر این موضوع، در تحقیق حاضر این محاسبات فقط برای داده های تغییرات جمعیت شته در مزرعه گندم در استان تهران (ورامین، ۱۳۸۰) که جمعیت بالا بود، انجام شد که معادلات آن ها به ترتیب $r(t) = 0.651 - 0.016 t$ و $r(t) = -0.196 \tanh(0.098 t - 4.006)$ است. نتایج برای بازه زمانی روز اول تا هفتم در شکل ۵ آمده است. توابع نرخ برای دوره زمانی ۳۰ تا ۵۰ ام بسیار نزدیک به یکدیگر هستند که در این دوره بیشترین تغییرات در اندازه جمعیت رخ داده است. (Johnson & Kotz (1970) بیان داشته اند که از نظر تجربی جدا کردن این مدل ها در این بازه زمانی که به همدیگر بسیار نزدیک هستند، دشوار است. زیرا تفاوت زیادی در عملکردها در محدوده های کمتر یا بیشتر از این دوره زمانی وجود دارد که عملاً ممکن است داده ای برای آن ها وجود نداشته باشد. به نظر می رسد داده های حاصل از یک طرح نمونه گیری، حتی شاید با مشاهدات روزانه در نواحی ابتدا و انتهای دوره حضور شته گندم-گل سرخ، برای مشاهده تفاوت بین دو مدل مکانیکی مورد نیاز باشد. در هر صورت همانطور که قبلاً اشاره شد، مدل مربع سکانت هذلولوی برازش بهتری با داده های تغییرات جمعیت شته گندم - گل سرخ داشت. دلایل نظری این که چرا پویایی جمعیت شته ها به خوبی توسط این مدل توصیف می شود توسط Matis et al. (2007 b) مورد بازبینی قرار گرفته است. این مدل با موفقیت برای تعدادی از گونه های شته، به صورت تجربی تأیید و همچنین تطبیق پذیری آن برای توصیف منحنی های فراوانی شته مورد بحث قرار گرفته است (Matis et al., 2009). این مدل علاوه بر شته ها برای توصیف پویایی جمعیت شب پره ابریشم باف ناجور (*Lymantria dispar* L.) استفاده شده است (Matis & Al-Muhammed, 2010).

برازش مدل اولین قدم برای توصیف پویایی جمعیت حشرات است و با استفاده از پراسنجه های مدل به عنوان متغیر پاسخ، می توان اثرات عوامل مختلف بر پویایی جمعیت را نشان داد. همانطور که Matis et al. (2008 a) اثرات تغذیه بر پویایی جمعیت شته *M. caryella* و شته (*Lipaphis erysimi* (kaltenbach))

و (2010) Matis & Al-Muhammed اثرات عوامل محیطی بر پویایی جمعیت شب پره ابریشم باف ناجور را مورد بررسی قرار داده‌اند



شکل ۵- تخمین نرخ سرانه تغییر اندازه جمعیت (مربع سکانت هذلولوی=خط چین، نرمال=خط)

Fig. 5. Estimated net per-capita rates for population size change (Hyperbolic Secant Squared=dashed line; Normal=solid line)

جدول ۲- پارانترهای مکانیکی شته *Metopolophium dirhodum* در مزرعه گندم استان تهران (ورامین) و مزرعه جو در استان لرستان (الشت).
Table 2. Estimates of mechanistic parameters of *Metopolophium dirhodum* in wheat field in Teheran province (Varamin) and barley field in Lorestan provinr (Alshar).

Parameters	Normal					Hypertobolic Secant Squared					
	Varamin		Lorestan			Varamin		Lorestan			
	1999	2000	2001	2017	2018	1999	2000	2001	2017	2018	
μ	25.658	21.511	40.973	42.140	27.307	μ	25.449	28.586	40.880	42.337	27.097
σ	3.388	5.763	7.936	19.587	12.878	σ	3.670	6.707	9.273	23.123	14.196
N_0 (No.)	7.7E-12	0.00002	0.0002	0.035	0.027	N_0 (No.)	0.0003	0.009	0.192	0.049	0.033
r_{max}	2.235	0.858	0.651	0.110	0.167	λ (Aphid/day)	0.494	0.270	0.195	0.073	0.120
c	0.054	0.035	0.024	0.024	0.037	δ (Aphid/day)	0.005	0.007	0.0001	0.009	0.029
AUC (No.)	186.246	70.149	2808.16	17.449	8.549	AUC (No.)	189.33	72.558	2905.371	18.423	8.742

جدول ۳- مقایسه نکویی برازش و تخمین شیب خط رگرسیون (با خطای معیار) برای زمان اوج جمعیت (r_{max})، پراکندگی (6)، اندازه اوج جمعیت (N_{max}) و تراکم تجمعی (AUC) برای مدل مربع سکانت هذلولوی در مقابل مدل نرمال برای 5 سری داده شته *Metopolophium dirhodum*.
Table 3. Comparisons of goodness-of-fit and of estimated regression slopes (with standard errors) for time of peak (r_{max}), spread (6), size of peak (N_{max}), and cumulative density (AUC) of Hypertobolic Secant Squared vs. Normal models for 5 set data for *Metopolophium dirhodum*.

Regression parameter	value (\pm SE)	r^2
Slope for time of peak (r_{max})	0.999 (0.003)	1
Slope for spread (6)	1.159 (0.016)	0.99
Slope for size of peak (N_{max})	1.007 (0.005)	0.99
Slope for cumulative density (AUC)	1.035 (0.003)	1

References

- Amirnazari, M.** (2000) Fauna of wheat aphids and their natural enemies in Karaj, Iran. M. Sc. thesis, Islamic Azad University of Tehran, Research and Science Branch, 71 pp. (In Persian with English summary).
- Asin, L. & Pons, X.** (2001) Effect of high temperature on the growth and reproduction of corn aphids (Homoptera: Aphididae) and implications for their population dynamics on the northeastern Iberian peninsula. *Environmental Entomology* 30(6), 1127-1134.
- Balckman, R. L. & Eastop, V. F.** (1985) *Aphids on the World's Crops: An Identification Guide*. J. Wiley.
- Barlow, N. & Dixon, A. F. G.** (1980) *Simulation of lime aphid population dynamics*. Pudoc., Wageningen.
- Bernays, E. A., & Chapman, R. E.** (1994) Behavior: the process of host-plant selection. *Host-Plant Selection by Phytophagous Insects*, 95-165.
- Costamagna, A. C., Van der Werf, W., Bianchi, F. J. J. A. & Landis, D. A.** (2007) An exponential growth model with decreasing r captures bottom up effects on the population growth of *Aphis glycines* Matsumura (Hemiptera: Aphididae). *Agricultural and Forest Entomology* 9(4), 297-305.
- Dixon, A. F. G.** (1987a) Cereal aphids as an applied problem. *Agricultural Zoology Reviews* 2, 1-57.
- Dixon, A. F. G.** (1987b) The way of life of aphids: host specificity, speciation and distribution. *Aphids, Their Biology, Natural Enemies and Control*, 197-207.
- Douglas, A. E.** (2003) The nutritional physiology of aphids. *Advances in Insect Physiology* 31(31), 73-140.
- Hodjat, S. H. & Azemayeshfard, P.** (1986) Aphids of wheat and other Graminae in Iran. *Iranian Journal of Applied Entomology and Phytopathology* 54 (1 & 2), 83-109. [In Persian with English summary].
- Holland, J. M. & Thomas, S. R.** (1996) Quantifying the impact of polyphagous invertebrate predators in controlling cereal aphids and in preventing wheat yield and quality reductions. *Annals of Applied Biology* 131(3), 375-397.
- Honek, A., Jarosik, V. & Dixon, A. F. G.** (2006) Comparing growth patterns among field populations of cereal aphids reveals factors limiting their maximum abundance. *Bulletin of Entomological Research* 96(3), 269.
- Jones, M. G.** (1979) Abundance of aphids on cereals from before 1973 to 1977. *Journal of Applied Ecology* 1-22.
- Johnson, N. L. & Kotz, S.** (1970) *Continuous Univariate Distributions-1*. Wiley, New York.
- Kindlmann, P.** (1985) A model of aphid population with age structure. In: *Mathematics in Biology and Medicine* (pp. 72-77). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kindlmann, P.** (2004) A simple aphid population model. pp. 325-330 in Simon, J.C.,

- Dedryver, C.A., Rispe, C. & Hulle, M. (Eds.) *Aphids in a New Millennium*. INRA, Paris.
- Kindlmann, P., & Dixon, A. F. G.** (1996) Population dynamics of a tree-dwelling aphid: individuals to populations. *Ecological Modelling*, 89(1-3), 23-30.
- Kindlmann, P. & Stadler, B.** (2004) Temporal fluctuations in through fall carbon concentrations in a spruce forest. *Ecological Modelling* 176(3-4), 381-388.
- Kindlmann, P., Arditi, R., & Dixon, A. F. G.** (2004) A simple aphid population model. In *Aphids in a new millennium. Proceedings of the Sixth International Symposium on Aphids, September, 2001, Rennes, France* (pp. 325-330). Institut National de la Recherche Agronomique.
- Matis, J. H. & Al-Muhammed, M. J.** (2010) Theory and application of the logistic probability density function as a population growth model. *Damascus University Journal for Basics Science* 26(1), 9-19.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I. & Stevenson, D. E.** (2005) Nonlinear stochastic modeling of aphid population growth. *Mathematical Biosciences* 198(2), 148-168.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I. & Stevenson, D. E.** (2006) Application of population growth models based on cumulative size to pecan aphids. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 11(4), 425.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I. & Stevenson, D. E.** (2007a) Stochastic modeling of aphid population growth with nonlinear, power-law dynamics. *Mathematical Biosciences* 208(2), 469-494.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I., Jackman, J. A. & Singh, H.** (2007b) Population size models based on cumulative size, with application to aphids. *Ecological Modelling* 205 (1-2), 81-92.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I. & Stevenson, D. E.** (2007c) Stochastic modeling of aphid population growth with nonlinear, power-law dynamics. *Mathematical Biosciences* 208(2), 469-494.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Matis, T. I., Jackman, J. A., Grant, W. E. & Singh, H.** (2008a) On the use of growth rate parameters for projecting population sizes: Application to aphids. *Ecological modelling* 213(1), 133-142.
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., Werf, W. V. D., Costamagna, A. C., Matis, T. I. & Michels Jr, G. J.** (2008 b) Comparisons of two symmetric density function solutions of aphid population growth models. *Proceedings of the Kansas State University Conference on Applied Statistics in Agriculture*. Available from: <https://doi.org/10.4148/2475-7772.1097>
- Matis, J. H., Kiffe, T. R., van der Werf, W., Costamagna, A. C., Matis, T. I. & Grant, W. E.** (2009) Population dynamics models based on cumulative density dependent feedback: A link to the logistic growth curve and a test for symmetry using aphid

- data. *Ecological Modelling* 220(15), 1745-1751.
- Matis, J. H., Al-Muhammed M. J. & van der Werf, W.**, (2010) Using the logistic pdf model to mitigate autocorrelation in growth curve analysis. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 64(2), 229-236.
- Metcalf, R. L. & Metcalf, R. A.**, (1995) *Destructive and useful insects*, 5th ed. McGraw-Hill, New York.
- Morgan, D., Walters, K. F. A. & Aegerter, J. N.** (2001) Effect of temperature and cultivar on pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae) life history. *Bulletin of Entomological Research* 91(1), 47.
- Noori, P. & A. Rezwani**, (1994) Wheat aphids and their population fluctuations in wheat fields of Tehran province, Iran. *Journal of Entomological Society of Iran* 14: 35-44.
- Prajneshu, C. S.** (1998) A nonlinear statistical model for aphid population growth. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 51, 73-80.
- Rezwani, A.**, (2001) *Key to the aphids (Hemiptera: Aphidinea) in Iran*. Ministry of Jihad-e Agriculture, Agricultural Research, Education and Extension Organization. 304 pp.
- SAS Statistical Analysis System.** (2013) *SAS/STAT user's guide, version 9.4*. SAS Institute. Cary, NC.
- Shahrokhi, S.** (2003) *Study of wheat aphids and their population dynamics in wheat fields of Varamin region, Iran*. 181 pp., Ph.D. thesis. Islamic Azad University of Tehran, Research and Science Branch. [In Persian with English summary].
- Shahrokhi, S., & Amir-Maafi, M.** (2011a) Sequential sampling plan of *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) in wheat fields. *Journal of Entomological Society of Iran*, 31(1). 69-82.
- Shahrokhi, S., & Amir-Maafi, M.** (2011b) Binomial sampling plan of *Metopolophium dirhodum* in irrigated wheat fields. *Applied Entomology and Phytopathology*, 79(1). 117-133.
- Shahrokhi, S., & Amir-Maafi, M.** (2013) Biology of apterous morph of rose grain aphid. *Metopolophium dirhodum* (Hem.: Aphididae) on wheat in laboratory condition. *Applied Entomology and Phytopathology*, 81(1).43-50.
- Sigsgaard, L.** (2002) A survey of aphids and aphid parasitoids in cereal fields in Denmark, and the parasitoids' role in biological control. *Journal of Applied Entomology* 126, 101-107.
- Skirvin, D. J., Perry, J. N. & Harrington, R.** (1997) The effect of climate change on an aphid-coccinellid interaction. *Global Change Biology* 3(1), 1-11.
- SysStat.** (2012) SigmaPlot for Windows, version 12.0.
- Tsoularis, A. & Wallace, J.** (2002) Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences* 179(1), 21-55.
- Van der Putten, W. H., Vet, L. E., Harvey, J. A. & Wäckers, F. L.** (2001) Linking above-

and belowground multitrophic interactions of plants, herbivores, pathogens, and their antagonists. *Trends in Ecology and Evolution* 16(10), 547-554.

Verhulst, P. F. (1838) Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondance Mathématique et Physique* 10, 113-126.

Williams, I. S., Van Der Werf, W., Dewar, A. M. & Dixon, A. F. G. (1999) Factors affecting the relative abundance of two coexisting aphid species on sugar beet. *Agricultural and Forest Entomology* 1(2), 119-125.
