

Application of a five-parameter nonlinear mechanistic model to mathematically describe the shape of the lactation curve in Iranian grade and purebred Holstein primiparous dairy cows

M. Doosti Toosechalaki¹, S. H. Farhangfar^{2*}, M. A. Abbasi³, M. B. Montazer Torbati⁴

1. MSc Student, Animal Science Department, Agriculture Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

2. Professor, Animal Science Department, Agriculture Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

3. Associate Professor, Animal Science Research Institute of IRAN (ASRI), Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

4. Assistant Professor, Animal Science Department, Agriculture Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

(Received: 06-03-2024 – Revised: 13-05-2024 – Accepted: 13-05-2024)

Introduction: In dairy cows, milk yield changes over the lactation period. Lactation curve modelling could be of importance from nutritional management and genetic selection point of view. The trajectory shape of the lactation curve has inclining and declining slopes which determine total amount of milk yield during the lactation. A great number of linear and nonlinear mathematical models have been so far utilized to describe the shape of the lactation curve in dairy cows. Among the models, mechanistic functions are considered to be more accurate than empirical models in terms of taking account of biological mechanisms undertaken in mammary gland to produce milk. To our knowledge, no research has been carried out to use a complex mechanistic model for describing the lactation curve of Iranian dairy cows. Based on this, the present research aimed to apply a five-parameter nonlinear mechanistic model for mathematical description of the shape of the lactation curve in Iranian first-parity dairy cows.

Materials and methods: Animal Breeding Centre of Iran provided the data used in this research. Initial data in separate files were merged and edited by the SPSS software. Final data comprised 5596039 milk test day records from 821153 first-parity cows distributed in 579 herds of 26 provinces over the country. The cows were the progeny of 7957 sires and 530394 dams and calved between 1996 and 2020. The cows were categorized into two groups based on the age of first calving: ≤ 25 or > 25 months. Also, two groups of cows were created based on the proportion of Holstein gene inheritance: $< 100\%$ (grade cows) or 100% (pure Holstein cows). A five-parameter nonlinear mechanistic model was applied to mathematically describe the shape of the lactation curve. The fitted mechanistic model had five parameters including MSmax (maximum milk secretion potential of the lactation), GR (relative proliferation rate of secretory cell number during early lactation), MSLmax (maximum secretion loss), NOD (proportion of parenchyma cell dead at parturition), and DR (relative decline rate in cell number) which their estimates were obtained for different seasons and ages of calving, as well as different genotypes (grade and pure Holstein) using NLIN procedure of the SAS software. Based on the estimated parameters of the model in each year of calving, phenotypic trends were calculated using the SPSS software.

Results and discussion: The results indicated that Iranian first-parity dairy cows reach to peak of milk production during the third month of the lactation curve. Based on standard deviation as well as coefficient of variation (CV) of milk test day milk records, maximum variation was observed in the last month of the lactation period. The findings also indicated that cows calved in autumn had the greatest MSmax and GR while cows calved in spring and summer had the lowest magnitude for these parameters ($P < 0.05$). The minimum magnitude of MSLmax and NOD were detected for the cows calved in summer ($P < 0.05$). Regarding the DR parameter of the model, cows

* Corresponding author: hfarhangfar@birjand.ac.ir



calved in spring were observed to have a minimum value. Maximum MS_{max}, Gr, and DR values were determined for cows calving up to 25 months of age, while maximum MSL_{max} and NOD values were observed for cows of later ages ($P<0.05$). Compared to pure Holstein cows, grade cows had higher MSL_{max} and NOD values, but other parameters were found to be greater in the pure Holstein cows ($P<0.05$), suggesting that the maximum milk secretion potential during lactation in pure Holstein cows is expected to be higher than that of grade cows. Annual phenotypic change trends were found to be 0.376 kg/year ($R^2=0.9$), 0.00009869 ($R^2=0.71$), -0.146 kg/year ($R^2=0.59$), -0.011 ($R^2=0.85$), and 0.001 ($R^2=0.85$) for MS_{max}, GR, MSL_{max}, NOD, and DR, respectively ($P<0.0001$).

Conclusions: This study found that the parameters of the mechanistic model fitted to the milk test day records of Iranian primiparous dairy cows are significantly influenced by the age and season of calving as well as the genotype of the cow. Cows calving in summer are expected to have more persistency. Moreover, pure Holsteins are more persistent than grade cows. Positive and negative annual trends have been detected for MS_{max} and MSL_{max} parameters, respectively, during 1996-2020 indicating a favorable increase in maximum milk secretion potential of the lactation and also a favorable decrease in maximum secretion loss over that period.

Keywords: Dairy cows, Test day records, Mechanistic model, Lactation curve

Conflicts of interest: The authors declare no conflicts of interest.

Funding: The authors received no specific funding for this project.

Acknowledgment: The data used in this research was provided by the Animal Breeding Center and Promotion of Animal Products (affiliated to the Ministry of Agri-Jihad of Iran), for which the authors express their gratitude.

How to cite this article:

Doosti Toosechalaki, M., Farhangfar, S. H., Abbasi, M. A., & Montazer Torbati M. B. (2024). Application of a five-parameter nonlinear mechanistic model to mathematically describe the shape of the lactation curve in Iranian grade and purebred Holstein primiparous dairy cows. *Animal Production Research*, 13(2), 25-41. doi: 10.22124/ar.2024.26952.1817



کاربرد یک مدل غیرخطی مکانیستیک پنج فراسنجه‌ای در توصیف ریاضی شکل منحنی شیردهی گاوهای زایش اول زینه و اصیل هلستاین ایران

مریم دوستی توسه چالکی^۱، سید همایون فرهنگ فر^{۲*}، مختار علی عباسی^۳، محمد باقر منتظر تربتی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، بخش علوم دام، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

۲- استاد، بخش علوم دام، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

۳- دانشیار، مؤسسه تحقیقات علوم دامی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

۴- استادیار، بخش علوم دام، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴)

چکیده

هدف از این پژوهش، کاربرد یک مدل غیرخطی مکانیستیک برای توصیف ریاضی منحنی شیردهی گاوهای شیری زینه و اصیل هلستاین ایران بود که برای اولین بار، زایش داشتند. تعداد کل ۵۵۹۶۰۳۹ رکورد روز آزمون شیر متعلق به ۸۲۱۱۵۳ رأس گاو در ۵۷۹ گله در ۲۶ استان کشور مورد استفاده قرار گرفتند. گاوهای مزبور، فرزندان ۷۹۵۷ رأس گاو نر و ۵۳۰۳۹۴ رأس گاو ماده بودند که طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ زایش داشتند. مدل مکانیستیک برازش داده شده بر داده‌ها دارای پنج فراسنجه MSmax (مرتبط با بیشترین پتانسیل ترشح شیر در دوران شیردهی)، GR (مرتبط با نرخ نسبی تکثیر سلول‌های ترشحی در اوایل دوره شیردهی)، MSLmax (مرتبط با بیشترین آفت ترشح شیر)، NOD (مرتبط با نسبتی از سلول‌های پارانشیم که در زمان زایمان مرده‌اند)، و DR (مرتبط با نرخ نسبی کاهش در تعداد سلول‌های ترشحی) بود که برآورد آن‌ها برای فصول و سنین مختلف زایش گاوهای دارای رکورد، و همچنین بر اساس نوع ژنوتیپ گاو (در دو نوع زینه و اصیل هلستاین) با نرم‌افزار SAS انجام شد. گاوهایی که در پاییز زایش داشتند، بیشترین MSmax و GR را نشان دادند و کمترین مقادیر فراسنجه‌های مذکور به ترتیب برای گاوهایی بود که در تابستان و بهار زایمان نموده بودند ($P < 0.05$). گاوهایی که اولین زایش آن‌ها تا ۲۵ ماهگی بود، بیشترین مقدار فراسنجه‌های MSmax، GR و DR را داشتند، در حالی که بیشترین مقدار فراسنجه‌های MSLmax و NOD برای گاوهایی بود که دیرتر از سن مذکور زایش داشتند ($P < 0.05$). گاوهای زینه در مقایسه با گاوهای اصیل هلستاین، مقدار بالاتری از فراسنجه‌های MSLmax و NOD را نشان دادند ولی برای سایر فراسنجه‌های مدل، گاوهای اصیل هلستاین مقدار بالاتری را دارا بودند ($P < 0.05$). بر اساس یافته‌های این پژوهش، نتیجه‌گیری می‌شود که در بین گاوهای زایش اول، گاوهای که در سنین پایین‌تری زایمان می‌نمایند، نسبت به سنین بالاتر در زایش، تداوم شیردهی بهتری را دارند، ضمن آن که گاوهای اصیل هلستاین در مقایسه با گاوهای زینه، عملکرد بهتری را در رابطه با تداوم شیردهی از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: گاوهای شیری، رکورد روز آزمون، مدل مکانیستیک، منحنی شیردهی

* نویسنده مسئول: hfhangfar@birjand.ac.ir

مقدمه

با برنامه‌های انتخاب و تصمیم‌های مناسب مدیریتی، و راهبردهای تولید در سطح واحد پرورش دام‌های شیرده هستند (Bouallegue and M'Hamdi, 2020).

منحنی شیردهی را می‌توان با مدل‌های ریاضی مختلف تجزیه و تحلیل نمود، و به‌طور کلی، تاکنون انواع مختلفی از مدل‌های مزبور در تحقیقات علوم دامی به‌کار برده شده‌اند که در بین آن‌ها و بر اساس میزان درک فرآیندهای زیست‌شناختی در پدیده مورد نظر (مانند منحنی شیردهی در دام شیرده)، مدل‌های تجربی و مکانیستیک (یا مدل زیست‌شناختی) مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Ghavi Hossein-Zadeh, 2014; Angeles-Hernandez *et al.*, 2018). مدل‌های مکانیستیک (که نوعی از مدل‌های رگرسیون غیرخطی هستند) به‌دلیل داشتن فرضیات عمیق‌تر پیرامون ساز و کارهای فیزیولوژیکی پیچیده‌ای که فرآیند تولید شیر را کنترل می‌نمایند (Pollott, 2000; Vetharanim *et al.*, 2003)، برای توصیف ریاضی منحنی شیردهی دام‌های شیرده نظیر گاوهای شیری (Albarrán-Portillo and Pollott, 2008) و گوسفندان شیری (Angeles-Hernandez *et al.*, 2018; Guevara Muñeton *et al.*, 2023) به‌کار برده شده‌اند. بر پایه رویکرد زیست‌شناختی پدیده تولید شیر، تاکنون مدل‌های مکانیستیک مختلفی برای منحنی شیردهی توسعه یافته‌اند (Neal and Thornley, 1983; Dijkstra *et al.*, 2003; Pollott, 2000; Vetharanim *et al.*, 1997) که در بیشتر آن‌ها، شمار و کارایی سلول‌های ترشحی بافت پستان، مبنای مدل‌سازی مکانیستیکی فعالیت غده پستان است (Dimauro *et al.*, 2011). ویژگی‌های مزبور، در حقیقت، از فراسنجه‌های مدل مکانیستیک هستند که بر اساس متغیر پاسخ تولید شیر و متغیر مستقل زمان شیردهی، و بر اساس ساز و کار فیزیولوژی تولید و ترشح شیر، برآورد می‌شوند.

در رابطه با توصیف ریاضی منحنی شیردهی گاوهای شیری ایران، تحقیقات بسیاری اجرا شده‌اند که در آن‌ها از انواع مختلف مدل‌های تجربی (Farhangfar and Naeemipour, 2007; Mehraban *et al.*, 2009) و یا مدل‌های مکانیستیک دو فراسنجه‌ای (Abbasi *et al.*, 2018; Farhangfar *et al.*, 2021)، سه فراسنجه‌ای (Ghavi Hossein-Zadeh, 2019a,b) و چهار فراسنجه‌ای (Elahi Torshizi and Farhangfar, 2020) استفاده شده است، اما تاکنون

بافت پستان که یکی از ویژگی‌های منحصر به‌فرد در پستانداران است، دارای کارکرد زیستی ویژه‌ای جهت تولید و ترشح شیر است که برای تغذیه نوزادان، نقش اساسی دارد (Imagawa *et al.*, 1990). تولید شیر، دربرگیرنده فرآیندهای تبدیل بیوشیمیایی مواد مغذی هضم شده به چربی، پروتئین، و لاکتوز و نهایتاً، ترشح آن‌ها در شیر است (Beever *et al.*, 1991). فعالیت غده پستان برای تولید شیر بستگی به تأمین خون در بافت مزبور دارد تا از این مسیر، پیش‌ماده مورد نیاز، با میزان مناسبی برای تولید شیر فراهم شود. در حقیقت، می‌توان بیان کرد که مقدار شیر تولید شده تابعی از شمار سلول‌های اپی‌تلیال ترشحی و فعالیت متابولیکی آن‌ها است، لذا هرگونه محدودیت در سوبسترای مورد نیاز بافت پستان، می‌تواند سبب اثرگذاری بر عوامل مذکور شود (Davis and Collier, 1985) و در نهایت، سبب تغییر در شکل منحنی شیردهی شود (Svennersten- Sjaunja and Olsson, 2005). در یک تحقیق روی گاوهای هلشتاین پر تولید، دینامیک سلول‌های ترشحی و مقدار شیر تولیدی در مدت ۲۴۰ روز شیردهی، مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که شمار سلول‌های ترشحی در ابتدای دوره شیردهی، بیشترین مقدار را داشت، در حالی که مقدار شیر تولید شده به‌وسیله هر یک از سلول‌های ترشحی، در کمترین مقدار خود بود، و به‌طور قابل ملاحظه‌ای تا زمان رسیدن به اوج شیردهی، افزایش یافت و سپس ثابت باقی ماند (Capuco *et al.*, 2001).

منحنی شیردهی در گاوهای شیری نشان‌دهنده الگوی تولید شیر طی یک دوره شیردهی است (Wood, 1967). یک منحنی شیردهی طبیعی، در برگیرنده سه مرحله ۱- افزایش تولید (بین زایمان و اوج تولید)، ۲- حفظ سطح اوج تولید و ۳- کاهش تولید پس از اوج است (Gengler, 1996). تغییرات تولید شیر طی یک دوره شیردهی به‌دلیل تغییر شمار سلول‌های ترشحی و میزان فعالیت آن‌ها در بافت پستان است (Thornley and France, 2007). تاکنون منحنی‌های شیردهی، به‌دلیل استفاده در تجزیه ژنتیکی رکوردهای روز آزمون شیر و ارزیابی اثر عوامل مختلف بر دوره شیردهی، در حد گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Ptak and Schaeffer, 1993). افزون بر آن، منحنی‌های شیردهی، ارائه‌دهنده اطلاعات مفیدی در رابطه

Hernandez *et al.* (2018) نیز برای توصیف منحنی شیردهی میش‌های دورگ منطقه مرکزی کشور مکزیک مورد استفاده قرار گرفته است. شکل کلی مدل رگرسیونی مزبور به صورت زیر بود:

$$MY = (MS \max / (1 + (Z \times \exp(-GR(n-150)))) - (MSL \max / (1 + ((1 - NOD) / NOD) \times \exp(-DR \times n)))$$

که در آن، MY رکورد تولید شیر روز آزمون (بر حسب کیلوگرم) و n روز شیردهی است. مدل مزبور دارای پنج فراسنجه است که عبارتند از: MSmax (مرتبط با بیشترین پتانسیل ترشح شیر در دوران شیردهی)، فراسنجه GR (مرتبط با نرخ نسبی تکثیر سلول‌های ترشحی در اوایل دوره شیردهی)، فراسنجه MSLmax (مرتبط با بیشترین آفت ترشح شیر)، فراسنجه NOD (مرتبط با نسبتی از سلول‌های پارانیشیم که در زمان زایمان مرده‌اند) و فراسنجه DR (مرتبط با نرخ نسبی کاهش در تعداد سلول‌های ترشحی). در مدل بالا، Z یک عدد ثابت است و مقدار آن $Z = ((1 - Angeles-Hernandez \text{ et al. } (0.999999) / 0.999999)$ است (2018; Guevara Muñeton *et al.*, 2023). گاوهایی که از مقادیر بالاتری برای فراسنجه‌های MSmax و GR و مقادیر کمتری برای فراسنجه‌های MSLmax، NOD و DR برخوردار باشند، مطلوب‌تر هستند. مدل مزبور به وسیله نرم-افزار SAS نسخه ۹/۴ (SAS, 2013) بر رکوردهای روز آزمون شیر گاوهای زایش اول، برآزش داده شد و فراسنجه-های آن در زیر گروه‌های مختلف سال زایش (۱۳۹۹-۱۳۷۵)، فصل زایش (بهار، تابستان، پاییز و زمستان)، سن زایش (کمتر یا مساوی با ۲۵ ماه و بیشتر از ۲۵ ماه)، و نوع زئوتیپ گاوها (زینه یا اصیل هلشتاین) برآورد شدند.

پژوهشی در رابطه با استفاده از یک مدل مکانیستیک پیچیده‌تر که در برگزیده فراسنجه‌های بیشتری نسبت به تحقیقات مذکور باشد، برای گاوهای شیری ایران انجام نشده است. از این رو، هدف از پژوهش کنونی، استفاده از یک مدل غیرخطی مکانیستیک پنج فراسنجه‌ای در توصیف ریاضی شکل منحنی شیردهی گاوهای شیری (زینه و اصیل هلشتاین) ایران بود که برای اولین بار (در فصول مختلف سال و سنین متفاوت) زایش داشتند.

مواد و روش‌ها

داده‌های خام مورد استفاده در این پژوهش، به وسیله مرکز اصلاح نژاد و بهبود تولیدات دامی (وابسته به وزارت جهاد کشاورزی) تأمین شد. داده‌های خام، شامل فایل اطلاعات زایش، خشکی، شجره و رکوردهای روز آزمون شیر بودند. پس از ادغام داده‌های خام و ویرایش آن‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ (George and Mallery, 2020) و فاکس پرو (نسخه ۲/۶) (Griver, 1994) برای مواردی مانند سن هنگام زایش (۴۸-۱۸ ماه) و طول دوره شیردهی (۳۰۵-۴ روز)، فایل نهایی داده‌ها مشتمل بر ۵۵۹۶۰۳۹ رکورد روز آزمون شیر در نوبت اول شیردهی بود. این تعداد داده، متعلق به ۸۲۱۱۵۳ رأس گاو شیری (زینه و اصیل هلشتاین) در ۵۷۹ گله و توزیع یافته در ۲۶ استان کشور بود که برای اولین بار طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ زایش داشتند. اطلاعات مربوط به فایل نهایی داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

برای توصیف ریاضی منحنی شیردهی، از یک مدل مکانیستیک غیرخطی پنج فراسنجه‌ای استفاده شد. مدل مذکور که شکل کاهش یافته مدل افزایشی بیان شده به-وسیله (Pollott (2000) Angeles- در تحقیق

جدول ۱- برخی اطلاعات مرتبط با ساختار داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Some information associated with the data structure used in the present research

Information	Statistics
Total Number of Records	5596039
Total Number of Cows with Records	821153
Total Number of Sires	7957
Total Number of Dams	530394
Total Number of Herds	579
Total Number of Calving Years (1996-2020)	25
Total Number of Provinces	26
Average Number of Records for each Cow	6.81
Average Number of Records for each Herd	9665
Average Number of Records for each Province	215232

رکوردهای روز آزمون شیر گاوهای شیری ایران که در فصول مختلف سال زایش نموده‌اند در جدول ۳ ارائه شده‌اند. شاخص آماری ضریب تبیین مدل برازش‌یافته بر رکوردهای روز آزمون شیر در فصول مختلف زایش حدوداً بین ۹۴ تا ۹۵ درصد بود.

نتایج نشان داد گاوهایی که در فصول تابستان و پاییز زایمان می‌نمایند، به ترتیب، کمترین و بیشترین مقدار فراسنجه MSmax را دارا هستند ($P < 0.05$). مانند فراسنجه MSmax، گاوهایی که در پاییز، زایش داشته‌اند بالاترین مقدار فراسنجه GR را دارند، در حالی که کمترین آن مربوط به گاوهایی است که در فصل بهار، زایش می‌نمایند ($P < 0.05$). فراسنجه MSmax مرتبط با بیشترین پتانسیل ترشح شیر در دوران شیردهی و فراسنجه GR مرتبط با نرخ نسبی تکثیر سلول‌های ترش‌چی در اوایل دوره شیردهی هستند، پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد هر چه مقدار دو فراسنجه مزبور بالاتر باشد، توانایی تولید شیر گاوها افزایش خواهد یافت و از آن جا که گاوهایی که در ماه‌های گرم فصل تابستان، زایش می‌نمایند، کم و بیش تحت تأثیر تنش دمایی قرار خواهند گرفت و توانایی تولید حداکثری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. در واقع، فراسنجه MSmax، یک

در این پژوهش، برای به دست آوردن برآورد فراسنجه‌های مدل، اطلاعات دو نوع ژنوتیپ گاوهای زینه و اصیل هلستاین، به صورت توأمان استفاده شد. مقایسه آماری بین برآورد هر یک از فراسنجه‌ها در زیرگروه‌های مختلف فصل زایش/ سن زایش/ نوع ژنوتیپ گاوها، بر اساس هم‌پوشانی یا عدم هم‌پوشانی حدود اطمینان ۹۵ درصدی برآوردها انجام شد. بر اساس فراسنجه‌های برآورد شده در هر سال زایش، روند تغییرات فنوتیپی آن‌ها نیز با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ (George and Mallery, 2020) برآورد شد. خصوصیات آماری رکوردهای روز آزمون شیر گاوهای شیری ایران مشتمل بر شمار رکوردها، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، صدک‌های بیست و پنجم و هفتاد و پنجم در هر یک از ماه‌های شیردهی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. بر اساس جدول مزبور، بیشترین مقدار رکورد روز آزمون شیر در ماه سوم، و بیشترین انحراف معیار و ضریب تغییرات مربوط به رکوردهای ماه دهم شیردهی بود.

نتایج و بحث

فراسنجه‌های برآورد شده برای فصول مختلف زایش: مقادیر برآورد شده فراسنجه‌های مدل مکانیستیک برازش‌یافته بر

جدول ۲- برخی شاخص‌های آمار توصیفی برای رکوردهای روز آزمون شیر (کیلوگرم) در ماه‌های مختلف شیردهی گاوهای شیری زایش اول ایران

Table 2. Some descriptive statistics for milk test day records (kg) over the course of lactation in Iranian first parity dairy cows

Stage of Lactation*	No. Records	Mean (kg)	SD (kg)	CV (%)	P25** (kg)	P75** (kg)
1	497443	29.42	7.52	25.55	24.60	34.20
2	596168	34.46	7.70	22.36	30.00	39.40
3	577504	35.37	7.74	21.89	30.60	40.40
4	595926	35.26	7.77	22.05	30.40	40.40
5	574394	34.85	7.79	22.34	30.00	40.00
6	588679	34.25	7.85	22.91	29.20	39.40
7	566926	33.52	7.88	23.51	28.40	39.00
8	573422	32.60	7.89	24.21	27.40	38.00
9	531260	31.40	7.90	25.15	26.00	36.80
10	494317	30.25	7.93	26.21	25.00	35.60
Overall	5596039	33.26	8.04	24.18	28.00	38.70

* Stage 1: up to 30 d after calving; Stage 2: 31-60 d; Stage 3: 61-90 d; Stage 4: 91-120 d; Stage 5: 121-150 d; Stage 6: 151-180 d; Stage 7: 181-210 d; Stage 8: 211-240 d; Stage 9: 241-270 d; Stage 10: 271-305 d. ** 25th percentile *** 75th percentile

۱. در این پژوهش، برازش مدل مکانیستیک بر رکوردهای روز آزمون شیر تک تک گاوها انجام نشده است، بلکه بر رکوردهای شیر مجموعی از گاوها برازش داده شد که در زیرگروه‌های سال زایش، فصل زایش، سن زایش و یا نوع ژنوتیپ قرار داشتند. در صورتی که قرار باشد برازش مدل مزبور بر رکوردهای شیر هر یک از گاوها اجرا شود، بهتر است که تعداد رکوردهای هر گاو ۱۰ باشد تا فراسنجه‌های مدل، برای هر گاو، با دقت مناسبی برآورد شوند.

جدول ۳- فراسنجه‌های برآورد شده مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران بر حسب فصول مختلف زایش

Table 1. Estimated parameters of nonlinear mechanistic model used to describe the lactation curve of first parity Iranian dairy cows with respect to different calving seasons

Parameter*	Season	No. Records	Estimate**	SE	Lower 95% CI	Upper 95% CI
MSmax (kg)	Spring	1308649	34.9717 ^c	0.033800	34.9054	35.0380
	Summer	1446792	34.6972 ^d	0.010700	34.6763	34.7182
	Autumn	1474656	35.6233 ^a	0.010900	35.6020	35.6446
	Winter	1365942	35.3871 ^b	0.017000	35.3537	35.4205
GR	Spring	1308649	0.1059 ^d	0.000042	0.1059	0.1060
	Summer	1446792	0.1065 ^c	0.000035	0.1065	0.1066
	Autumn	1474656	0.1071 ^a	0.000033	0.1071	0.1072
	Winter	1365942	0.1069 ^b	0.000037	0.1069	0.1070
MSLmax (kg)	Spring	1308649	6.3580 ^a	0.225800	5.9155	6.8005
	Summer	1446792	4.8232 ^b	0.095900	4.6352	5.0113
	Autumn	1474656	6.3729 ^a	0.061100	6.2530	6.4927
	Winter	1365942	6.5442 ^a	0.061800	6.4232	6.6653
NOD	Spring	1308649	0.1773 ^a	0.004060	0.1694	0.1853
	Summer	1446792	0.0243 ^d	0.001480	0.0214	0.0272
	Autumn	1474656	0.0335 ^c	0.001300	0.0310	0.0361
	Winter	1365942	0.1548 ^b	0.002800	0.1493	0.1603
DR	Spring	1308649	0.0171 ^c	0.000615	0.0159	0.0183
	Summer	1446792	0.0363 ^a	0.000932	0.0345	0.0381
	Autumn	1474656	0.0383 ^a	0.000614	0.0371	0.0395
	Winter	1365942	0.0279 ^b	0.000453	0.0270	0.0288

* MSmax: maximum milk secretion potential of the lactation, GR: relative proliferation rate of secretory cell number during early lactation, MSLmax: maximum secretion loss, NOD: proportion of parenchyma cells dead at parturition, DR: relative decline rate in cell number.

** For each parameter, calving seasons estimates with different letters are statistically different from each other ($P < 0.05$).

زایش کرده در فصل بهار، بیشترین مقدار، و برای گاوهای زایش کرده در فصل تابستان، کمترین مقدار را داشت ($P < 0.05$). هر چه مقدار این فراسنجه بالاتر باشد، اثر منفی آن بر کل مقدار تولید شیر حیوان بیشتر می‌شود. در رابطه با فراسنجه مرتبط با نرخ نسبی کاهش در تعداد سلول‌های ترشحی (DR)، یافته‌ها نشان داد گاوهایی که در تابستان و پاییز زایمان می‌نمایند از بیشترین مقدار DR برخوردار هستند و این امر در حالی است که مقدار فراسنجه مزبور در گاوهای زایش کرده در فصل بهار، به‌طور معنی‌داری از سایر فصول زایش، کمتر است ($P < 0.05$). بالاتر بودن فراسنجه DR نشان‌دهنده تداوم شیردهی بیشتر است، و لذا یافته‌ها نشان می‌دهد این فراسنجه تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار دارد. اصولاً، اثر فصل بر تداوم شیردهی را می‌توان به تغییرات درجه حرارت و میزان بارندگی نسبت داد که بر آسایش گاوها و فراهم بودن علوفه مورد نیاز آن‌ها اثر دارد (Koloj *et al.*, 2018).

حد بالایی از مقدار شیر تولید شده در طول روز را نشان می‌دهد مشروط بر این که مرگ سلول‌های ترشحی رخ نداده باشد. مرگ سلول‌های ترشحی (آپوپتوزیس) یک خصوصیت زیستی است که به‌طور ضمنی در فراسنجه‌های NOD و DR مدل مکانیستیک لحاظ شده‌اند. در حقیقت، فراسنجه مذکور را می‌توان نتیجه تعداد کل سلول‌های ترشحی تولید شده و تمایز یافته در طول دوره شیردهی قلمداد نمود که تابع دو متغیر است: ۱- تعداد کل سلول‌های پارانشیمی بافت پستان که در اوایل شیردهی فعال می‌شوند و ۲- بیشترین نرخ ترشح شیر (بر حسب کیلوگرم) به‌ازای هر سلول ترشحی در طول روز (Pollott, 2000). یافته‌ها نشان داد فراسنجه MSLmax در گاوهای زایش کرده در فصل تابستان، کمترین مقدار را دارد و تفاوت آن با سایر فصول زایش، معنی‌دار است ($P < 0.05$). در رابطه با فراسنجه مزبور، تفاوت معنی‌دار آماری بین سایر فصول زایش وجود نداشت. فراسنجه NOD که مرتبط با نسبت سلول‌های پارانشیم مرده در زمان زایمان است در گاوهای

(Pollott, 2011). در تحقیقی دیگر که از تابع تجربی گامای وود (Wood, 1967) برای توصیف منحنی شیردهی گاوهای هلشتاین کشور ترکیه استفاده شد، تداوم شیردهی محاسبه شده بر اساس فراسنجه‌های تابع مزبور برای گاوهایی که در تابستان زایش داشتند، بیشترین مقدار را داشت (Tekerli Madalena et al., 2000). همچنین، در تحقیق (Madalena et al., 1979) که خصوصیات منحنی شیردهی گاوهای هلشتاین-فریزین، جیر و دورگ (۵۰: ۵۰) حاصل از تلاقی دو نژاد مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت، مشخص شد که شیب کاهشی منحنی شیردهی در گاوهایی که در فصل خشک سال (ماه‌های آوریل تا سپتامبر) زایش داشتند کمتر از گاوهایی است که در فصل مرطوب (ماه‌های اکتبر تا فوریه) کشور برزیل زایش کرده بودند و از تداوم شیردهی بالاتری برخوردار هستند.

فراسنجه‌های برآورد شده برای سنین مختلف زایش: در تحقیق حاضر، گاوهای شیری شکم اول بر اساس میانگین سن زایش (۲۵ ماه) در مجموعه داده‌های مورد استفاده، به دو گروه ۱- مساوی یا کمتر از ۲۵ ماه (گروه جوان‌تر) و ۲- بیش‌تر از ۲۵ ماه (گروه مسن‌تر) تقسیم‌بندی شده بودند. فراسنجه‌های برآورد شده مدل مکانیستیک مورد استفاده برای دو گروه سنی مذکور در جدول ۴ ارائه شده‌اند. شاخص آماری ضریب تبیین مدل برازش‌یافته بر رکوردهای روز آزمون شیر در دو گروه مزبور به ترتیب حدود ۹۵ و ۹۴ درصد بود. یافته‌ها نشان داد گاوهای جوان‌تر در زمان اولین زایش از مقدار بالاتر فراسنجه‌های MSmax، GR و DR در مقایسه با گاوهای مسن‌تر برخوردار هستند، در حالی‌که برای فراسنجه‌های MSLmax و NOD، مقادیر برآورد شده برای گاوهای مسن‌تر، بزرگتر از مقادیر مربوطه برای گاوهای جوان‌تر است. این امر بیان‌گر آن است که در بین گاوهای شیری که در نوبت اول شیردهی هستند، افزایش سن زایش حیوان بر فراسنجه‌های MSmax، GR و DR اثر منفی، و بر فراسنجه‌های MSLmax و NOD اثر مثبت دارد. در تحقیق (Angeles-Hernandez et al., 2018) روی گوسفندان شیری کشور مکزیک که از مدل مکانیستیک مشابه با تحقیق حاضر استفاده شد، اثر نوبت زایش (که بازتابی از اثر افزایش سن حیوان است) فقط برای فراسنجه‌های MSmax، GR و DR معنی‌دار بود ($P < 0.05$)، به‌نحوی که با افزایش نوبت زایش همیشه تا شکم سوم، مقدار فراسنجه MSmax افزایش یافت، اما مقدار فراسنجه‌های GR و DR

در تحقیق (Angeles-Hernandez et al., 2018) که از مدل مکانیستیک مشابه با مدل تحقیق حاضر برای توصیف منحنی شیردهی گوسفندان شیری کشور مکزیک و بررسی اثر عوامل محیطی بر فراسنجه‌های مدل استفاده شد، اثر گله و نوبت زایش برای برخی فراسنجه‌ها معنی‌دار گزارش شد، ولی اثر فصل زایش بر هیچ‌یک از فراسنجه‌ها، به‌لحاظ آماری، معنی‌دار نبود ($P > 0.05$). در بین فراسنجه‌های مدل مکانیستیک مورد استفاده در تحقیق حاضر، فراسنجه MSLmax می‌تواند به‌عنوان عامل مهمی در رابطه با ویژگی تداوم شیردهی گاوهای شیری محسوب شود، به‌گونه‌ای که هر چه مقدار فراسنجه مزبور بیشتر باشد، نشان‌دهنده تداوم شیردهی کمتر گاو خواهد بود. با این حال، فراسنجه DR (که در ارتباط با میزان کاهش نسبی تعداد سلول‌های ترشح‌کننده شیر است) نیز به‌عنوان عامل دیگر مؤثر بر تداوم شیردهی معرفی شده است (Farhangfar et al., 2018). اصولاً، تولید شیر، تا حد زیادی، تحت تأثیر اندازه جمعیت سلولی بافت پستان قرار دارد (Knight and Wilde, 1987). تکثیر گسترده و مرگ سلول‌های ترشحی بافت پستان، در دوره‌ی آبستنی و شیردهی رخ می‌دهند، به‌گونه‌ای که تغییرات آندوکروینی مرتبط با آبستنی، سبب تحریک تکثیر گسترده سلول‌ها در بافت پستان می‌شود، که این فرآیند، تا اوایل دوره‌ی شیردهی بسیاری از گونه‌ها اتفاق می‌افتد (Dijkstra et al., 1997). سپس، جمعیت سلولی تا زمان توقف آمادگی دستگاه تناسلی برای آبستنی بعدی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند (Imagawa et al., 1990). در تحقیق حاضر و بر مبنای فراسنجه MSLmax برآورد شده برای فصول مختلف زایش، گاوهایی که در تابستان زایش می‌نمایند، تداوم شیردهی بالاتری نسبت به زایش در سایر فصول دارند که با نتایج برخی تحقیقات انجام شده روی گاوهای شیری ایران مغایرت دارد (Naeemipour et al., 2018) و با نتایج برخی تحقیقات دیگر مطابقت دارد (Elahi Torshizi, 2016). در یک تحقیق روی گاوهای شیری گله‌های تجاری کشور انگلستان که از مدل مکانیستیک دو فراسنجه‌ای استفاده شد، اثر فصل زایش بر فراسنجه‌های MSmax و DR به-لحاظ آماری معنی‌دار بود ($P < 0.001$) و تداوم شیردهی گاوهایی که شیردهی خود را در فصول تابستان یا پاییز شروع کرده بودند بیشتر از گاوهایی بود که در فصول بهار یا زمستان زایش داشتند (Albarrán-Portilloa and

ترکیبات مختلف ژنتیکی حاصل از تلاقی بین آن‌ها در کشور برزیل، و بر مبنای تداوم شیردهی محاسبه شده بر اساس تابع نمائی ویلمینک (Wilmlink, 1987)، مشاهده شد که گاوهای هلشتاین، تداوم شیردهی بالاتری را نسبت به گاوهای دورگی داشتند که سهم توارث نژاد هلشتاین در آن‌ها برابر با ۶۲/۵ درصد بود (Daltro *et al.*, 2021). با این حال، بر خلاف یافته‌های پژوهش حاضر، در تحقیق دیگری که پیرامون خصوصیات منحنی شیردهی گاوهای هلشتاین-فریزین و جیر در کشور برزیل انجام شد، گاوهای دورگ با ترکیب ژنتیکی ۵۰:۵۰ از دو نژاد مذکور، و یا ۷۵ درصد هلشتاین-فریزین و ۲۵ درصد جیر، نسبت به گاوهای هلشتاین-فریزین از تداوم شیردهی بالاتری برخوردار بودند (Madalena *et al.*, 1979).

همچنین، در تحقیق (Seangjun *et al.*, 2009) روی خصوصیات منحنی شیردهی گاوهای کشور تایلند مشخص شد که تداوم شیردهی در گاوهای دورگ (که سهم مختلفی از توارث نژاد هلشتاین را داشتند) نسبت به گاوهای اصیل مزبور، بالاتر بود. اصولاً، اختلاف بین نژادهای مختلف گاو به دلیل تفاوت در ساختار ژنتیکی آن‌ها است (Grossman *et al.*, 1986). بر این اساس و از آن جا که برای همه فراسنجه‌های مدل مکانیستیک مورد استفاده در پژوهش حاضر، تفاوت معنی‌دار آماری بین دو گروه گاوهای زینه و اصیل هلشتاین ایران وجود دارد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فراسنجه‌های مدل تحت تأثیر تفاوت ساختار ژنتیکی دو گروه گاوهای مزبور (از حیث سهم توارث نژاد اصیل هلشتاین) قرار دارند، و در نتیجه، می‌تواند مبنایی برای فرآیند انتخاب در جهت تغییر شکل منحنی شیردهی باشد. فراسنجه‌های برآورد شده برای سال‌های مختلف زایش: شاخص آماری ضریب تبیین مدل برازش‌یافته بر رکوردهای روز آزمون شیر در سال‌های مختلف زایش حدوداً بین ۹۳ تا ۹۵ درصد بود. بر اساس مقادیر فراسنجه‌های برآورد شده مدل مکانیستیک در سال‌های مختلف زایش ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ (و کدگذاری شده از ۱ تا ۲۵)، شکل‌های ۱ تا ۳ ایجاد شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد فراسنجه‌های MSmax، GR و DR در بازه زمانی مزبور، تغییرات سالانه رو به افزایش، و فراسنجه‌های MSLmax و NOD، تغییرات سالانه رو به کاهش داشته‌اند. میزان روند تغییرات سالانه برای فراسنجه‌های مذکور در جدول ۶ ارائه شده است.

کاهش نشان داد. بر خلاف تحقیق مذکور، در پژوهش حاضر، مقدار فراسنجه MSmax با افزایش سن نخستین زایش گاوها کاهش یافت، ولی در تطابق با یافته‌های تحقیق مزبور، مقدار دو فراسنجه GR و DR با افزایش سن نخستین زایش گاوها، کاهش داشتند. بر مبنای فراسنجه MSLmax، نتایج پژوهش حاضر نشان داد گاوهایی که در سنین جوان‌تر زایش دارند از تداوم شیردهی بالاتری برخوردارند که با نتایج تحقیق (Elahi Torshizi, 2016) مطابقت دارد. همچنین، در تحقیق (Tekerli *et al.*, 2000) که روی گاوهای هلشتاین کشور ترکیه انجام شد، گرچه اثر متغیر کمکی سن زایش بر تداوم شیردهی گاوها معنی‌دار نبود ($P > 0/05$)، اما گاوهای زایش اول، تداوم شیردهی بالاتری نسبت به گاوهای زایش دوم و یا زایش‌های بعدی داشتند. اثر منفی افزایش سن گاو بر تداوم شیردهی، در تحقیق اخیر که به‌وسیله (Innes *et al.*, 2024) و در رابطه با مقایسه نکویی برازش سه تابع غیرخطی بر رکوردهای شیر گاوهای هلشتاین-فریزین کشور هلند انجام شده بود نیز مشاهده شده است. اثر سن بر تداوم شیردهی را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که گاوهای مسن‌تر، شیردهی خود را در یک سطح بالاتری شروع می‌نمایند و از آن جا که اثر منفی آبستنی مجدد حیوان در مرحله یکسانی از شیردهی رخ می‌دهد، از این رو، میزان کاهش تولید شیر بعد از زمان اوج شیردهی، در گاوهایی که در سنین بالاتر زایش می‌نمایند، بیشتر می‌شود (Koloji *et al.*, 2018).

فراسنجه‌های برآورد شده برای ژنوتیپ‌های مختلف: فراسنجه‌های مدل مکانیستیک برای گاوهای زینه و اصیل هلشتاین در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. شاخص ضریب تبیین مدل برازش‌یافته بر رکوردهای روز آزمون شیر در گاوهای زینه و اصیل هلشتاین به ترتیب حدود ۹۴ و ۹۵ درصد بود. گاوهای زینه در مقایسه با گاوهای اصیل هلشتاین، فراسنجه‌های MSLmax و NOD بزرگ‌تری را داشتند ($P < 0/05$)، در حالی که مقدار سایر فراسنجه‌های مدل برای گاوهای اصیل هلشتاین بالاتر بود ($P < 0/05$). با توجه به فراسنجه MSLmax که بر تداوم شیردهی اثرگذار است می‌توان نتیجه‌گیری نمود که گاوهای اصیل هلشتاین ایران در مقایسه با گاوهای زینه، از تداوم شیردهی بالاتری برخوردار هستند که با نتایج تحقیق (Farhangfar *et al.*, 2023) مطابقت دارد. در یک تحقیق روی خصوصیات شیردهی گاوهای نژاد هلشتاین و نژاد جیر و همچنین

جدول ۴- فراسنجه‌های برآورد شده مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران بر حسب سنین مختلف زایش

Table 4. Estimated parameters of nonlinear mechanistic model used to describe the lactation curve of first parity Iranian dairy cows with respect to different calving ages

Parameter*	Age (mo)	No. Records	Estimate**	SE	Lower 95% CI	Upper 95% CI
MSmax (kg)	≤25	3694559	35.5473 ^a	0.007440	35.5327	35.5618
	>25	1901480	34.2649 ^b	0.017400	34.2309	34.2990
GR	≤25	3694559	0.1070 ^a	0.000021	0.1070	0.1071
	>25	1901480	0.1058 ^b	0.000036	0.1057	0.1058
MSLmax (kg)	≤25	3694559	5.5043 ^b	0.049600	5.4070	5.6016
	>25	1901480	6.6098 ^a	0.086400	6.4405	6.7791
NOD	≤25	3694559	0.0506 ^b	0.001190	0.0482	0.0529
	>25	1901480	0.1512 ^a	0.002450	0.1464	0.1560
DR	≤25	3694559	0.0327 ^a	0.000417	0.0318	0.0335
	>25	1901480	0.0233 ^b	0.000415	0.0225	0.0242

* MSmax: maximum milk secretion potential of the lactation, GR: relative proliferation rate of secretory cell number during early lactation, MSLmax: maximum secretion loss, NOD: proportion of parenchyma cells dead at parturition, DR: relative decline rate in cell number.

** For each parameter, calving age estimates with different letters are statistically different from each other ($P < 0.05$).

پلوت-گوتوین استفاده شد، روند فنوتیپی برای فراسنجه MSmax مثبت و برابر با ۵۲۰ گرم در سال به دست آمد ($P < 0.0001$)، اما بر خلاف یافته تحقیق حاضر که روند فنوتیپی فراسنجه DR مثبت بود، روند فنوتیپی گزارش شده برای فراسنجه DR در تحقیق مذکور، منفی و برابر با -0.000025 بود ($P < 0.0001$)، که یکی از دلایل این اختلاف را می‌توان به متفاوت بودن تعداد فراسنجه‌ها در مدل‌های مورد استفاده و همچنین تفاوت در شیوه برازش توابع بر رکوردهای روز آزمون شیر نسبت داد.

نتایج حاصل از برآورد روند فنوتیپی نشان داد که طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ و به‌طور متوسط، مقدار فراسنجه MSmax به میزان ۳۷۶ گرم در هر سال افزایش، ولی فراسنجه MSLmax به میزان ۱۴۶ گرم کاهش داشته‌اند. مقادیر روند فنوتیپی برای فراسنجه‌های GR، DR و NOD به ترتیب 0.00009869 ، 0.0001 و -0.0011 بودند. همه روندهای فنوتیپی برآورد شده به لحاظ آماری معنی‌دار بودند ($P < 0.0001$) و با ضریب تبیین در حد متوسط تا بالا به دست آمدند.

در تحقیق Farhangfar *et al.* (2018) روی گاوهای زایش اول ایران که از مدل مکانیستیک دو فراسنجه‌ای

جدول ۵- فراسنجه‌های برآورد شده مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران بر حسب نوع مختلف ژنوتیپ

Table 5. Estimated parameters of nonlinear mechanistic model used to describe the lactation curve of first parity Iranian dairy cows with respect to different genotypes

Parameter*	Genotype	No. Records	Estimate**	SE	Lower 95% CI	Upper 95% CI
MSmax (kg)	Grade	1678202	33.1997 ^b	0.016600	33.1672	33.2322
	Pure Holstein	3917837	35.8894 ^a	0.007630	35.8744	35.9043
GR	Grade	1678202	0.1060 ^b	0.000038	0.1059	0.1061
	Pure Holstein	3917837	0.1068 ^a	0.000021	0.1068	0.1069
MSLmax (kg)	Grade	1678202	6.5191 ^a	0.096700	6.3295	6.7086
	Pure Holstein	3917837	5.6494 ^b	0.050200	5.5510	5.7478
NOD	Grade	1678202	0.1275 ^a	0.002340	0.1229	0.1320
	Pure Holstein	3917837	0.0600 ^b	0.001240	0.0576	0.0625
DR	Grade	1678202	0.0237 ^b	0.000447	0.0228	0.0246
	Pure Holstein	3917837	0.0311 ^a	0.000386	0.0304	0.0319

* MSmax: maximum milk secretion potential of the lactation, GR: relative proliferation rate of secretory cell number during early lactation, MSLmax: maximum secretion loss, NOD: proportion of parenchyma cells dead at parturition, DR: relative decline rate in cell number.

** For each parameter, genotype estimates with different letters are statistically different from each other ($P < 0.05$).

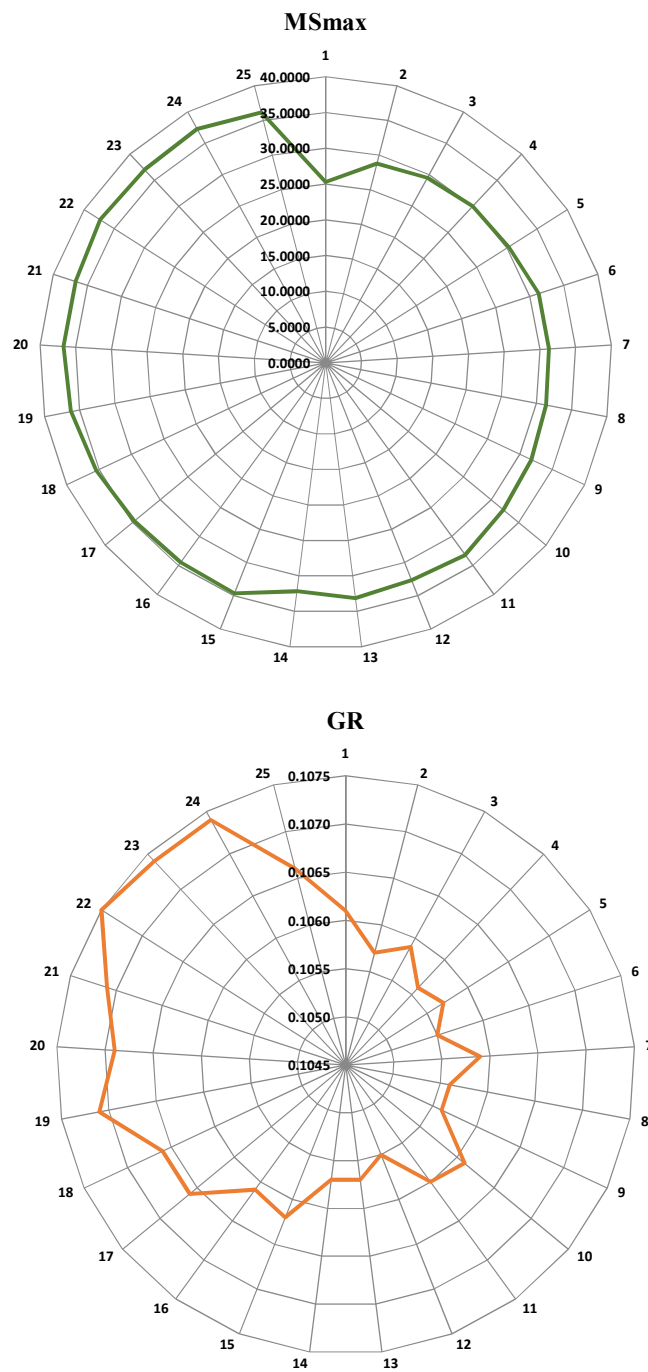


Fig. 1. Radar plot of annual change trend of estimated parameters of MSmax and GR for mechanistic nonlinear model used for describing the lactation curve of first parity Iranian dairy cows (n of 1 to 25 in the circle circumference represent years of 1996 to 2020, respectively)

شکل ۱- منحنی راداری تغییرات سالیانه فراسنجه‌های برآورد شده مرتبط با MSmax و GR برای مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران (اعداد ۱ تا ۲۵ روی محیط دایره به ترتیب نشان‌دهنده سال‌های زایش ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ است)

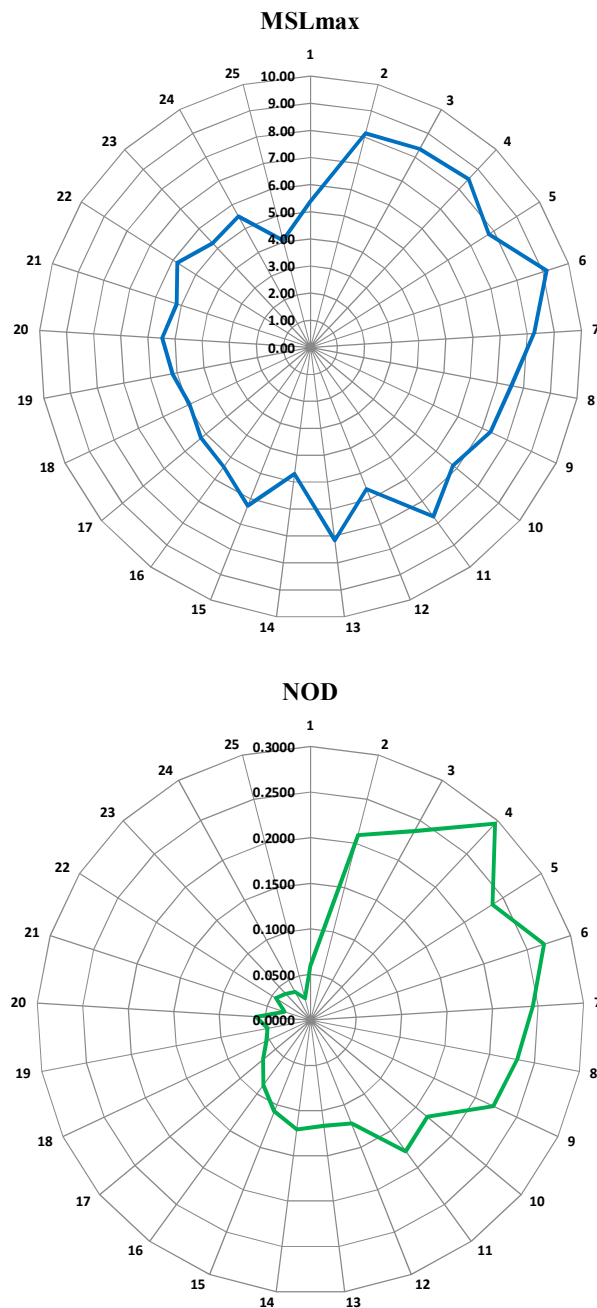


Fig. 2. Radar plot of annual change trend of estimated parameters of MSLmax and NOD for mechanistic nonlinear model used for describing the lactation curve of first parity Iranian dairy cows (numbers of 1 to 25 in the circle circumference represent years of 1996 to 2020, respectively)

شکل ۲- منحنی راداری تغییرات سالیانه فراسنجه‌های برآورد شده مرتبط با MSLmax و NOD برای مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران (اعداد ۱ تا ۲۵ روی محیط دایره به ترتیب نشان‌دهنده سال‌های زایش ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ است)

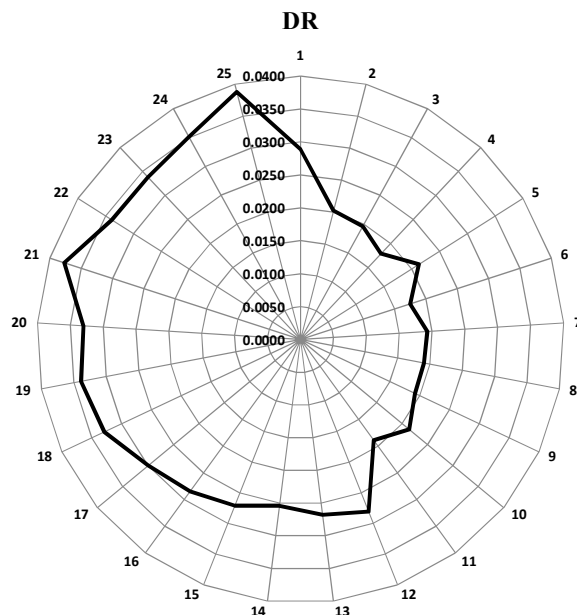


Fig. 3. Radar plot of annual change trend of estimated parameters of DR for mechanistic nonlinear model used for describing the lactation curve of first parity Iranian dairy cows (numbers of 1 to 25 in the circle circumference represent years of 1996 to 2020, respectively)

شکل ۳- منحنی راداری تغییرات سالیانه فراسنجه برآورد شده مرتبط با DR برای مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران (اعداد ۱ تا ۲۵ روی محیط دایره به ترتیب نشان دهنده سال‌های زایش از ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ است)

جدول ۶- روند فنوتیپی برای فراسنجه‌های برآورد شده مدل غیرخطی مکانیستیک مورد استفاده در توصیف منحنی شیردهی گاوهای زایش اول ایران

Table 6. Phenotypic trend for the estimated parameters of nonlinear mechanistic model used to describe the lactation curve of first parity Iranian dairy cows

Parameter*	Trend	SE	P-value	R ²
MSmax (kg)	0.37600000	0.026000	0.0001	0.900
GR	0.00009869	0.000013	0.0001	0.708
MSLmax (kg)	-0.14600000	0.025000	0.0001	0.594
NOD	-0.01100000	0.001000	0.0001	0.849
DR	0.00100000	0.000085	0.0001	0.846

*MSmax: maximum milk secretion potential of the lactation, GR: relative proliferation rate of secretory cell number during early lactation, MSLmax: maximum secretion loss, NOD: proportion of parenchyma cells dead at parturition, DR: relative decline rate in cell number.

در زمان اوج شیردهی و تداوم شیردهی است (Gebreyohanes *et al.*, 2007). تداوم شیردهی که توانایی یک گاو در حفظ سطح تولید شیر در پس از زمان اوج تولید است (Jamrozik *et al.*, 1997) یک صفت مهم اقتصادی است که بر هزینه‌های باروری، سلامت و خوراک گاوهای شیری اثر دارد (Dekkers *et al.*, 1998) و لذا بهبود آن، سودآوری گله را افزایش می‌دهد. در واقع، تداوم شیردهی بالا با نرخ کمتری از کاهش تولید شیر بعد از اوج شیردهی، همراه است (Appuhamy *et al.*, 2007). گاوهایی که از

بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر و به دلیل روند کاهش سالانه فراسنجه MSLmax می‌توان نتیجه گرفت که تداوم شیردهی گاوهای شیری ایران طی سنوات گذشته، بهبود یافته است که با نتایج تحقیق (Farhangfar *et al.*, 2023) مشابه است. افزایش مداوم تولید شیر به‌زای هر رأس گاو را می‌توان به بهبود خصوصیات ژنتیکی، سلامت و بهداشت، عملکرد تولید مثلی و شرایط تغذیه نسبت داد (Wildman *et al.*, 1982)، ضمن آن که اقتصاد تولید شیر در یک دوره شیردهی گاو اساساً تابعی از طول دوره شیردهی، مقدار شیر

مرگ برنامه‌ریزی شده سلول‌های ترشحی (آپوپتوزیس) است (Pollott and Gootwine, 2000). گرچه تجزیه ژنتیکی فراسنجه‌های یک مدل مکانیستیک (با دو فراسنجه MSmax و DR) به‌وسیله Farhangfar *et al.* (2018) برای گاوهای شیری ایران انجام شده است، اما با توجه به ویژگی‌های مطلوب و زیست‌شناسی محور^۲ بودن مدل‌های مکانیستیک (به‌ویژه زمانی که از تعداد فراسنجه‌های بیشتری برخوردار باشند)، استفاده ژنتیکی از مدل‌های پیچیده‌تر مذکور نظیر مدل پنج فراسنجه‌ای مورد استفاده در پژوهش حاضر، می‌تواند اطلاعات بیشتری را در خصوص ظرفیت گاوهای شیری ایران در رابطه با منحنی شیردهی ارائه دهد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، مدل پنج فراسنجه‌ای مکانیستیک برازش داده شده بر منحنی شیردهی، برای اولین بار در گاوهای شیری ایران مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که سن، فصل زایش و نوع ژنوتیپ گاوها بر فراسنجه‌های مدل مزبور، اثر معنی‌داری داشتند به‌نحوی که گاوهایی که در تابستان زایش دارند نسبت به سایر فصول زایش، از تداوم بالاتری در شیردهی برخوردار بودند. در بین گاوهای زایش اول، گاوهای که در سنین پایین‌تری زایمان می‌نمایند، نسبت به سنین بالاتر در زایش، تداوم شیردهی بهتری را دارند^۲، ضمن آن که گاوهای اصیل هلشتاین، در مقایسه با گاوهای زینه، عملکرد بهتری را در رابطه با تداوم شیردهی از خود نشان می‌دهند. فراسنجه‌های MSmax و MSLmax طی دوره ۱۳۷۵ الی ۱۳۹۹ به‌ترتیب روند مثبت و منفی معنی‌دار آماری را داشته‌اند که نشان می‌دهد طی سال‌های مزبور، نه تنها بیشترین ظرفیت ترشح شیر افزایش یافته است بلکه میزان افت ترشح شیر، روند کاهشی داشته است که نشان‌گر بهبود خصوصیت مطلوب تداوم شیردهی در گاوهای شیری ایران است. گرچه در پژوهش حاضر، فقط به بررسی فنوتیپی فراسنجه‌های مدل مکانیستیک پرداخته شده است، اما در صورتی که بتوان مدل مزبور را بر رکوردهای روز آزمون شیر هر یک از گاوها به‌طور جداگانه برازش داد، آن‌گاه می‌توان مواردی از قبیل

تداوم شیردهی بیشتری برخوردار باشند، هزینه‌های خوراک، بهداشت و تولیدمثلی کمتری دارند (Sölkner and Fuchs, 1987; Ghavi Hossein-Zadeh, 2016). بر این اساس، در زمانی که برای مدت ماندگاری اختیاری یک گاو در گله تصمیم‌گیری می‌شود، توجه به تداوم شیردهی حیوان در زمان تلقیح مصنوعی می‌تواند مفید باشد، به‌ویژه برای گاودارانی که در مدیریت تولیدمثلی گله خود به تداوم شیردهی گاوها توجه می‌نمایند (Chen *et al.*, 2023). با سطح تولید یکسان در طول دوره شیردهی، گاوهایی که تداوم شیردهی بالاتری دارند، مقدار شیر در زمان اوج تولیدشان کمتر است (Dekkers *et al.*, 1998) و دیرتر به اوج شیردهی می‌رسند که این امر سبب می‌شود که تنش متابولیکی کمتری را در اوایل دوره شیردهی داشته باشند (Ferris *et al.*, 1985). در واقع، پایین‌تر بودن سطح تولید شیر در زمان اوج شیردهی سبب می‌شود که عدم تعادل انرژی، کمتر رخ دهد که در نتیجه آن، گاو جهت تأمین مواد مغذی مورد نیاز برای تولید شیر از ذخایر بدن خود کمتر استفاده می‌نماید (Tamminga, 2000) و به‌همین دلیل، تنش متابولیکی در حیوان که موجب بروز مشکلات مرتبط با سلامت در اوایل دوره شیردهی است، کاهش پیدا می‌نماید (Harder *et al.*, 2006).

در تحقیق حاضر، از یک مدل مکانیستیک برای توصیف ریاضی منحنی شیردهی گاوهای شیری استفاده شد. مدل شیردهی مکانیستیک که بر اساس زیست‌شناسی بافت پستان است، برای اولین بار به‌وسیله Neal and Thornley (1983) پیشنهاد شد در حالی که، Rook *et al.* (1993) و Dijkstra *et al.* (1997) از یک رویکرد زیست‌شناختی برای تجزیه منحنی شیردهی استفاده نمودند که در سال‌های بعد، یک سری توابع، بر اساس زیست‌شناسی ترشح شیر به‌وسیله Pollott (2000) توسعه یافت. منطق ایجاد چنین مدل‌هایی، بر اساس برازش دو منحنی لجیستیک است که یکی از آن‌ها، افزایش تولید شیر در طول دوره شیردهی را توصیف می‌نماید که تحت تأثیر نرخ تکثیر سلول‌های ترشحی و تمایز آن‌ها است و دیگری، کاهش تولید شیر در طول دوره شیردهی را توصیف می‌کند که اساساً تحت تأثیر

1. Biology-oriented

۲. فارغ از گروه‌بندی مورد استفاده برای سن زایش در پژوهش حاضر، واقعیت این است که در گاوهای شکم اول، هر چه سن زایش بیشتر شود، انتظار می‌رود که تداوم شیردهی آن‌ها کمتر شود.

تشکر و قدردانی

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌وسیله مرکز اصلاح نژاد و بهبود تولیدات دامی (وابسته به وزارت جهاد کشاورزی) ارائه شده‌اند که بدین‌وسیله، مراتب سپاس خود را اعلام می‌نماییم.

وراثت‌پذیری و ارزش اصلاحی گاوها را برای هر یک از فراسنجه‌های مدل محاسبه نمود و دام‌های گله را برای ویژگی‌های مختلف منحنی شیردهی مورد گزینش ژنتیکی قرار داد.

فهرست منابع

- Abbasi, M. A., Pahlavan, R., Afrazandeh, M. R., Kazemi, M., Hasani Bafarani, A., Kazemi, A., & Jamali, N. (2021). Investigation of standard and atypical lactation curves of Simmental and Jersey cows in Iran. *Iranian Journal of Animal Science*, 52(2), 123-131. doi: 10.22059/ijas.2021.323864.653826 [In Persian]
- Albarrán-Portillo, B., & Pollott, G. E. (2008). Genetic parameters derived from using a biological model of lactation on records of commercial dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 91(9), 3639-3648. doi: 10.3168/jds.2007-0929
- Albarrán-Portillo, B., & Pollott, G. E. (2011). Environmental factors affecting lactation curve parameters in the United Kingdom's commercial dairy herds. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 43(2), 145-153. doi: 10.4067/S0301-732X2011000200007
- Angeles-Hernandez, J. C., Pollott, G., Albarran-Portillo, B., Ramírez-Perez, A. H., Lizarazo-Chaparro, A., Ortega, O. A. C., & Ronquillo, M. G. (2018). The application of a mechanistic model to analyze the factors that affect the lactation curve parameters of dairy sheep in Mexico. *Small Ruminant Research*, 164, 58-63. doi: 10.1016/j.smallrumres.2018.05.003
- Appuhamy, J. A. D. R. N., Cassell, B. G., Dechow, C. D., & Cole, J. B. (2007). Phenotypic relationships of common health disorders in dairy cows to lactation persistency estimated from daily milk weights. *Journal of Dairy Science*, 90(9), 4424-4434. doi: 10.3168/jds.2007-0077
- Beever, D. E., Rook, A. J., France, J., Dhanoa, M. S., & Gill, M. (1991). A review of empirical and mechanistic models of lactational performance by the dairy cow. *Livestock Production Science*, 29(2-3), 115-130. doi: 10.1016/0301-6226(91)90061-T
- Bouallegue, M., & M'Hamdi, N. (2020). Mathematical modeling of lactation curves: a review of parametric models. In: Lactation in Farm Animals - Biology, Physiological Basis, Nutritional Requirements, and Modelization, Edited by Naceur M'Hamdi. Part of IntechOpen Book Series: *Veterinary Medicine and Science*, 3, 95-114. doi: 10.5772/intechopen.78900
- Capuco, A. V., Wood, D. L., Baldwin, R., Mcleod, K., & Paape, M. J. (2001). Mammary cell number, proliferation, and apoptosis during a bovine lactation: relation to milk production and effect of bST. *Journal of Dairy Science*, 84(10), 2177-2187. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(01)74664-4
- Chen, Y., Steeneveld, W., Nielen, M., & Hostens, M. (2023). Prediction of persistency for day 305 of lactation at the moment of the insemination decision. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1-9. doi: 10.3389/fvets.2023.1264048
- Daltro, D. S., Padilha, A. H., Gama, L. T., Silva, M. V. G. B., & Cobuci, J. A. (2021). Breed, heterosis, and recombination effects for lactation curves in Brazilian cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 50, 1-18. doi: 10.37496/rbz5020200085
- Davis, S. R., & Collier, R. J. (1985). Mammary blood flow and regulation of substrate supply for milk synthesis. *Journal of Dairy Science*, 68(4), 1041-1058. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(85)80926-7
- Dekkers, J. C. M., Ten Hag, J. H., & Weersink, A. (1998). Economic aspects of persistency of lactation in dairy cattle. *Livestock Production Science*, 53(3), 237-252. doi: 10.1016/S0301-6226(97)00124-3
- Dijkstra, J., France, J., Dhanoa, M.S., Maas, J.A., Hanigan, M.D., Rook, A.J., & Beever, D.E. (1997). A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of Dairy Science*, 80(10), 2340-2354. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76185-X
- Dimauro, C., Atzori, A. S., & Pulina, G. (2011). Assessing and optimazing the performance of a mechanistic mathematical model of the sheep mammary gland. In: Sauvant, D., Van Milgen, J., Faverdin, P., Friggens, N. (Eds.), *Modelling Nutrient Digestion and Utilisation in Farm Animals*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 72-82. doi:10.3920/978-90-8686-712-7
- Elahi Torshizi, M. (2016). Effects of season and age at first calving on genetic and phenotypic characteristics of lactation curve parameters in Holstein cows. *Journal of Animal Science and Technology*, 58(8), 1-14. doi: 10.1186/s40781-016-0089-1

- Elahi Torshizi, M., & Farhangfar, H. (2020). The use of dijkstra mechanistic model for genetic analysis of the lactation curve characteristics and their relationships with age at first calving and somatic cell score of Iranian dairy cows. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, 42, 1-12. doi: 10.4025/actascianimsci.v42i1.50181
- Farhangfar, H., & Naeemipour, H. (2007). Phenotypic study of lactation curve in Iranian Holsteins. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 9(4), 279-286. doi: 20.1001.1.16807073.2007.9.4.8.9
- Farhangfar, H., Nezamdoost, S., Montazar Torbati, M. B., & Asghari, M. R. (2018). Genetic analysis of Pollott-Gootwine mechanistic model parameters for lactation curve of Iranian dairy cows. *Journal of Animal Science Research*, 28(3), 31-46. [In Persian]
- Farhangfar, S. H., Rashidi Toghroljerdi, M. S., Montazer Torbati, M. B. & Sayyad Nezhad, M. B. (2023). A study on the lactation curve characteristics of grade and Iranian purebred Holstein cows with the use of raw, fat corrected, and energy-corrected milk test day records. *Animal Production Research*, 12(2), 71-84. doi: 10.22124/AR.2023.22771.1718 [In Persian]
- Ferris, T. A., Mao, I. L., & Anderson, C. R. (1985). Selection for lactation curve and milk yield in cattle. *Journal of Dairy Science*, 68(6), 1438-1448. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(85)80981-4
- Gebreyohanes, G., Tegegne, A., Diedhiou, M. L., & Hegde, B. P. (2007). Persistency of lactation and comparison of different persistency measures in indigenous and crossbred cows at Bako, *Ethiopian Journal of Animal Production*, 7(1), 1-11.
- Gengler, N. (1996). Persistency of lactation yields: a review. *Interbull Bulletin*, 12, 102-106.
- George, D., & Mallery, P. (2020). IBM SPSS Statistics 26 Step by Step: A Simple Guide and Reference. 16th Edition. Taylor & Francis.
- Ghavi Hossein-Zadeh, N. (2014). Comparison of non-linear models to describe the lactation curves of milk yield and composition in Iranian Holsteins. *The Journal of Agricultural Science*, 152, 309-324. doi: 10.1017/S0021859613000415
- Ghavi Hossein-Zadeh, N. (2017). Application of growth models to describe the lactation curves for test-day milk production in Holstein cows. *Journal of Applied Animal Research*, 45(1), 145-151, doi: 10.1080/09712119.2015.1124336
- Ghavi Hossein-Zadeh, N. (2019a). Application of non-linear mathematical models to describe effect of twinning on the lactation curve features in Holstein cows. *Research in Veterinary Science*, 122, 111-117. doi: 10.1016/j.rvsc.2018.11.017
- Ghavi Hossein-Zadeh, N. (2019b). Comparison of the parameters of the lactation curve between normal and difficult calvings in Iranian Holstein cows. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 17(1), e0401. doi: 10.5424/sjar/2019171-13673
- Griver, Y. A. (1994). The FOXPRO 2.6 Codebook. Sybex, San Francisco Inc., USA.
- Grossman, M., Kuck, A. L., & Norton, H. W. (1986). Lactation curves of purebred and crossbred dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 69(1), 195-203. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(86)80386-1
- Guevara Muñeton, L. P., Gloria, L. S., Benaouda, M., Teuntle-López, I. A., Valdés-Córdoba, X. S., Ángeles-Hernández, J. C., Aniceto, E. S., & Acero, A. P. (2023). The shape of curve lactation of crossbred dairy sheep affects the fitting of empirical and mechanistic models. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 31(Supl. 1), 305-311. doi: 10.53588/alpa.310553
- Harder, B., Bennewitz, J., Hinrichs, D., & Kalm, E. (2006). Genetic parameters for health traits and their relationship to different persistency traits in German Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 89(8), 3202-3212. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72595-4
- Imagawa, W., Bandyopadhyay, G. K., & Nandi, S. (1990). Regulation of mammary epithelial cell growth in mice and rats. *Endocrine Reviews*, 11(4), 494-523. doi: 10.1210/edrv-11-4-494
- Innes, D. J., Pot, L. J., Seymour, D. J., France, J., Dijkstra, J., Doelman, J., & Cant, J. P. (2024). Fitting mathematical functions to extended lactation curves and forecasting late-lactation milk yields of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 107(1), 329-345. doi: 10.3168/jds.2023-23478
- Jamrozik, J., Schaeffer, L. R., & Dekkers, J. C. M. (1997). Genetic evaluation of dairy cattle using test day yields and random regression model. *Journal of Dairy Science*, 80(6), 1217-1226. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76050-8
- Knight, C. H., & Wilde, C. J. (1987). Mammary growth during lactation: implications for increasing milk yield. *Journal of Dairy Science*, 70(9), 1991-2000. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(87)80241-2
- Koloi, S., Pathak, K., Karunakaran, M., & Mandal, A. (2018). Lactation persistency and its genetic evaluation in cattle- A Review. *Research and Reviews: Journal of Dairy Science and Technology*, 7(3), 1-8. doi: 10.37591/rjodst.v7i3.1388
- Madalena, F. E., Martinez, M. L., & Freitas, A. F. (1979). Lactation curves of Holstein-Friesian and Holstein-Friesian x Gir cows. *Animal Production*, 29(1), 101-107. doi: 10.1017/S0003356100012198
- Mehraban, H., Farhangfar, H., Rahmaninia, J., & Soltani, H. A. (2009). Comparison of some functions describing the shape of the lactation curve for Holstein cows. *Iranian Journal of Animal Science Research*, 1(2), 47-55. doi: 10.22067/IJASR.V1I2.1974 [In Persian]

- Naeemipour, H., Shariati, M. M., Zerehdaran, S., & Jabbari, M. (2018). Effects of season and age at first calving on phenotypic and genetic characteristic of lactation curve parameters in primiparous Iranian Holstein cows. *Animal Science Journal*, 30(117), 163-176. doi: 10.22092/ASJ.2018.116054 [In Persian]
- Neal, H. D. S. C., & Thornley, J. H. M. (1983). The lactation curve in cattle: a mathematical model of the mammary gland. *Journal of Agricultural Science*, 101(2), 389-400. doi: 10.1017/S0021859600037710
- Pollott, G. (2000). A biological approach to lactation curve analysis for milk yield. *Journal of Dairy Science*, 83(11), 2448-2458. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(00)75136-8
- Pollott, G. E., & Gootwine, E. (2000). Appropriate mathematical models for describing the complete lactation of dairy sheep. *Animal Science*, 71(2), 197-207. doi: 10.1017/S1357729800055028
- Ptak, E., & Schaeffer, L. R. (1993). Use of test day yields for genetic evaluation of dairy sires and cows. *Livestock Production Science*, 34(1-2), 23-34. doi: 10.1016/0301-6226(93)90033-E
- Rook, A. J., France, J., & Dhanoa, M. S. (1993). On the mathematical description of lactation curves. *The Journal of Agricultural Science*, 121(1), 97-102. doi: 10.1017/S002185960007684X
- SAS. (2013). Base SAS® 9.4 Procedures Guide Statistical Procedures. Second Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Seangjun, A., Koonawootrittriron, S., & Elzo, M. A. (2009). Characterization of lactation patterns and milk yield in a multibreed dairy cattle population in the central Thailand. *Kasetsart Journal - Natural Science*, 43(1), 74-82.
- Sölkner, J., & Fuchs, W. (1987). A comparison of different measures of persistency with special respect to variation of test-day milk yields. *Livestock Production Science*, 16(4), 305-319. doi: 10.1016/0301-6226(87)90001-7
- Svennersten-Sjaunja, K., & Olsson, K. (2005). Endocrinology of milk production. *Domestic Animal Endocrinology*, 29(2), 241-258. doi: 10.1016/j.domaniend.2005.03.006
- Tammenga, S. (2000). Issues arising from genetic change: Ruminants. The Challenge of Genetic Change in Animal Production. W. G. Hill, S. C. Bishop, B. McGuirk, J. C. McKay, G. Simm, and A. J. Webb, ed. *British Society of Animal Science*, 27, 53-62. doi: 10.1017/s146398150004053x
- Tekerli, M., Akinci, Z., Dogan, I., & Akcan, A. (2000). Factors affecting the shape of lactation curves of Holstein cows from the Balikesir province of Turkey. *Journal of Dairy Science*, 83(6), 1381-1386. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(00)75006-5
- Thornley, J. H. M., & France, J. (2007). *Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*. 2nd ed. Wallingford, CABI. 928p.
- Vetharaniam, I., Davis, S. R., Upsdell, M., Kolver, E. S., & Pleasants, A. B. (2003). Modeling the effect of energy status on mammary gland growth and lactation. *Journal of Dairy Science*, 86(10), 3148-3156. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(03)73916-2
- Wildman, E. E., Jones, G. M., Wagner, P. E., Boman, R. L., Troutt, H. F., & Lesch, T. N. (1982). A dairy cow body condition scoring system and its relationship to selected production characteristics. *Journal of Dairy Science*, 65(3), 495-501. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82223-6
- Wilmink, J. B. M. (1987). Adjustment of test-day milk, fat and protein yields for age, season and stage of lactation. *Livestock Production Science*, 16(4), 335-348. doi: 10.1016/0301-6226(87)90003-0
- Wood, P. D. P. (1967). Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*, 216, 164-165. doi: 10.1038/216164A0