



Using Nonlinear Regression Functions to Growth Curve Description of Sanjabi Sheep

Sajad Badbarin^{1✉}, Mohammad Heydari², Javad Ahmadpanah

1. Assistant Professor, Animal Science Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Kermakshah, Iran. Email: s.badbarin@areeo.ac.ir
2. Assistant Professor, Animal Science Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Kermakshah, Iran. Email: m_heydari@areeo.ac.ir
3. Assistant Professor, Animal Science Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. Email: j.ahmadpanah@areeo.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received 21 December 2025
Received in revised form 18
January 2025
Accepted 19 January 2025
Available online 21 March
2026

Keywords:

Nonlinear models
Growth curve
Sanjabi sheep

Objective: Due to the high economic importance value of growth traits in sheep, changes in body weight at different ages are important for designing breeding programs. The best function describing the growth curve can vary depending on the breed and population under study. The objective of this project was to describe the growth curve of Sanjabi sheep for body weight traits at different ages using nonlinear growth models.

Method: The data used in this study were included records of birth weight, 1, 2, 3, 6 and 9 months of body weight of 719 Sanjabi lambs (369 female lambs and 350 male lambs), which were collected during the years 2018 to 2024 at the Mehrgan Station located in Kermanshah Province. Four nonlinear regression models were used to describe the growth curve, including the Gompertz, Logistic, Von Bertalanffy and Brody models. Models were analysed with NLIN persidture and SAS (9/4) software. The best model was determined using the R^2 , MSE and AIC information index.

Results: The value of parameter A in the Gompertz, Logistic, Von Bertalanffy, and Brodie models was calculated as 38.54, 36.93, 39.32, and 42.77 kg, respectively. Also, the value of parameter K in these models was calculated as 0.46, 0.70, 0.39 and 0.23, respectively. The highest and lowest K value were observed in Logistic and Brodie models, respectively. Finally, based on the goodness of fit criteria, although the Gompertz model showed the highest coefficient of determination, but the Brody model with the lowest values of AIC information index and MSE, was selected as the most appropriate model to describe the growth curve of Sanjabi breed lambs.

Conclusions: Result of this study showed that the examined models could described the growth curve of Sanjabi sheep with very high accuracy and among them the Brody model showed the best description .So, it could usedfor clerfy the management problems, adjustment feed programs and notify the decendent lose of Sanjabi growth.

Cite this article: Badbarin, Sajad., Heydari, Mohammad., & Ahmadpanah, Javad. (2026). Using Nonlinear Regression Functions to Describe the Growth Curve of Sanjabi Sheep. *New Approaches in Animal Sciences*, 1 (1), 1-12. <http://doi.org/10.22098/naas.2026.19102.1010>

© The Author(s).

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili.

DOI: <http://doi.org/10.22098/naas.2026.19102.1010>



Introduction

Growth traits are among the most critical components determining productivity and economic efficiency in sheep production systems. Body weight gain over time directly influences feed conversion efficiency, carcass yield, meat quality, and profitability. Accurate characterization of growth patterns enables producers and researchers to optimize management practices, improve feeding strategies, and design effective breeding programs. Growth curve analysis provides a comprehensive approach to describe longitudinal body weight changes by fitting mathematical models with biologically interpretable parameters. These models allow prediction of body weight at different ages, identification of growth acceleration and deceleration phases, and estimation of mature body weight and growth rate. However, the suitability and performance of growth models may vary depending on breed, environmental conditions, management system, and data structure. Therefore, it is essential to evaluate breed-specific growth models to obtain reliable and applicable results.

Sanjabi sheep is a native fat-tailed breed predominantly raised in Kermanshah province, located in western Iran. This breed is known for its large body size, adaptability to harsh environmental conditions, acceptable growth performance, and high market preference due to meat quality. Sanjabi sheep play a significant role in regional red meat production and rural livelihoods. Despite its economic and genetic importance, limited information is available about growth pattern characterization and appropriate nonlinear growth models for this breed. A clear understanding of growth dynamics in Sanjabi sheep is essential to improve production efficiency and support sustainable breeding strategies.

The primary objective of this study was to describe the growth curve of Sanjabi lambs using different nonlinear regression models and to compare their performance in predicting body weight changes from birth to nine months of age. An additional objective was to identify the most appropriate model based on goodness-of-fit criteria, which could be applied in breeding, nutritional planning, and management decision-making for Sanjabi sheep.

Method

The data used in this study consisted of body weight records of Sanjabi lambs measured at birth and at 1, 2, 3, 6, and 9 months of age. Records were collected from lambs raised at the Mehrgan Research Station located in Kermanshah province during the period 2018 to 2024. The flock was managed under a semi-intensive production system. Animals grazed on natural rangelands and cultivated pastures from spring to early autumn, while indoor feeding was practiced during late autumn and winter. Diets were formulated according to age, sex, and physiological status, and lambs were weaned at approximately three months of age.

All lambs were identified and ear-tagged at birth, and body weights were recorded at predetermined intervals. Prior to statistical analysis, data editing was performed to remove incomplete records and biologically implausible weight changes between consecutive ages, ensuring data reliability. Four nonlinear growth models, including Gompertz, Logistic, Von

Bertalanffy, and Brody models, were fitted to the body weight data using nonlinear regression procedures in SAS software.

Each model included three parameters: A, representing asymptotic or mature body weight; B, an integration constant related to initial body weight; and K, the maturity or growth rate parameter indicating the growth rate of animals to mature weight. Models were compared and selected using multiple goodness-of-fit criteria, including the coefficient of determination (R^2), mean square error (MSE), and Akaike information criterion (AIC). Models with higher R^2 values and lower MSE and AIC values were considered to provide a better fit to the observed data.

Results

Descriptive statistics indicated a steady increase in mean body weight from birth to nine months of age, accompanied by an increase in standard deviation and coefficient of variation at later stages of growth. This pattern reflects increasing phenotypic variability among animals as growth progresses, likely due to cumulative effects of genetic differences and environmental factors.

Estimated values of the mature weight parameter (A) varied among the evaluated models. The highest estimate of mature weight was obtained from the Brody model, while the lowest estimate was observed in the Logistic model. The differences in mature weight estimates reflect structural differences among models and their sensitivity to data from later stages of growth. The maturity rate parameter (K) also differed considerably among models. The Logistic model produced the highest K value, indicating a faster growth rate during early life. In contrast, the Brody model showed the lowest K value, suggesting a slower but more gradual growth rate.

Correlation analysis between growth curve parameters revealed a consistent negative relationship between mature weight (A) and maturity rate (K) across all models. This inverse relationship suggests that animals exhibiting faster early growth do not necessarily achieve higher mature weights. Such relationships have important implications for breeding programs, as selection solely for rapid early growth may result in reduced mature body size.

In terms of model performance, the Gompertz model exhibited the highest coefficient of determination, indicating strong explanatory power. However, the Brody model showed the lowest AIC and MSE values, reflecting superior overall goodness-of-fit and lower prediction error. Considering all evaluation criteria simultaneously, the Brody model was identified as the most appropriate model for describing the growth curve of Sanjabi lambs.

Conclusions

The results of this study demonstrate that nonlinear growth models are practical tools for describing and analyzing growth patterns in Sanjabi sheep. Although all evaluated models were capable of fitting body weight data reasonably well, the Brody model provided the best overall fit based on information criteria and prediction accuracy. The superiority of the Brody model suggests that it more accurately reflects the biological growth pattern of Sanjabi lambs,

characterized by rapid growth during early life followed by a gradual reduction in growth rate at later stages.

The findings of this research have practical implications for sheep production systems. The selected growth model can be used to predict body weight at different ages, identify growth slowdown points, optimize feeding and management strategies, and determine appropriate slaughter age. Furthermore, growth curve parameters derived from the Brody model may serve as valuable auxiliary traits in selection indices, enabling simultaneous improvement of growth performance and economic efficiency in Sanjabi sheep breeding programs.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all the staff and workers of the Mehrgan Sanjabi Sheep Research Station for their sincere cooperation in collecting, recording, and maintaining the data used in this study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

استفاده از توابع رگرسیون غیر خطی جهت توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی

سجاد بادبرین^۱✉، محمد حیدری^۱، جواد احمد پناه^۲

۱. استادیار بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.

رایانامه: s.badbarin@areeo.ac.ir

۱. استادیار بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.

رایانامه: m_heydari@areeo.ac.ir

۲. استادیار بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه:

j.ahmadpanah@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

هدف: به دلیل اهمیت اقتصادی صفات رشد در گوسفند، چگونگی تغییرات وزن بدن در سنین مختلف از نظر طراحی برنامه‌های اصلاح نژادی اهمیت زیادی دارد. بهترین تابع توصیف کننده منحنی رشد بسته به نژاد و جمعیت تحت بررسی می‌تواند متفاوت باشد. هدف این پروژه توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی برای صفات وزن بدن در سنین مختلف با استفاده از مدل‌های غیر خطی رشد بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

روش پژوهش: اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل رکوردهای کامل وزن تولد، ۱، ۲، ۳، ۶ و ۹ ماهگی وزن بدن ۷۱۹ رأس بره سنجابی (۳۶۹ رأس بره ماده و ۳۵۰ رأس بره نر) بود که در طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۳ در ایستگاه تحقیقات مهرگان واقع در استان کرمانشاه جمع‌آوری شده بود. برای توصیف منحنی رشد از چهار مدل تابعیت غیرخطی شامل مدل‌های گومپرتز، لجستیک، ون برتالانفی و برودی استفاده شد. مدل‌ها با رویه NLIN نرم‌افزار SAS (۹/۴) برازش شد. بهترین مدل یا استفاده از معیارهای ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا و شاخص اطلاعات آکائیک تعیین شد.

کلیدواژه‌ها:

مدل‌های غیرخطی،

منحنی رشد،

گوسفند سنجابی.

یافته‌ها: مقدار پارامتر A در مدل‌های گومپرتز، لجستیک، وان برتالانفی و برودی به ترتیب برابر با ۳۸/۵۴، ۳۶/۹۳، ۳۹/۳۲ و ۴۲/۷۷ کیلوگرم محاسبه شد. همچنین مقدار پارامتر K در این مدل‌ها به ترتیب برابر با ۰/۴۶، ۰/۷۰، ۰/۳۹ و ۰/۲۳ محاسبه شد. بر اساس معیارهای نیکویی برازش، با وجود آن که مدل گومپرتز بیشترین مقدار ضریب تبیین را نشان داد، ولی مدل برودی با کمترین مقادیر شاخص اطلاعات آکائیک و میانگین مربعات خطا، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی رشد بره‌های نژاد سنجابی انتخاب شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های آماری بررسی شده با دقت بسیار بالایی توانایی توصیف چگونگی رشد گوسفند سنجابی را دارند و از میان آن‌ها مدل برودی بهترین برازش و انطباق را نشان داد. بنابراین از این منحنی می‌توان در بررسی مشکلات مدیریتی، تنظیم برنامه‌های تغذیه‌ای و شناسایی نقطه کاهش رشد گوسفند سنجابی استفاده نمود.

استناد: بادبرین، سجاد؛ حیدری، محمد و احمدپناه، جواد (۱۴۰۵). استفاده از توابع رگرسیون غیر خطی جهت توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی. *یافته‌های نوین*

علوم دامی، ۱(۱)، ۱-۱۲. <http://doi.org/10.22098/naas.2026.19102.1010>



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی.

۱. مقدمه

گوسفند سنجابی از گوسفندان نژاد پشمی-گوشتی ایران است. منشأ این گوسفند در منطقه سنجابی در استان کرمانشاه بوده و از گوشت و پشم باکیفیتی برخوردار است. گوسفند سنجابی یکی از نژادهای بارزش کشور است که خصوصیات مطلوب زیادی مانند جثه درشت، افزایش وزن روزانه مطلوب و کیفیت گوشت بالا دارد که در کنار این مزایا یک سری معایب هم دارد که مهم‌ترین آن‌ها نرخ تولیدمثل پایین و فصلی بودن تولیدمثل است (mohammadi و همکاران، ۲۰۱۰). این نژاد با جمعیتی بیش از یک ۱/۲ میلیون رأس، عمدتاً در استان کرمانشاه و تحت سیستم عشایری و روستایی پرورش داده شده و نقش مهمی در تولید گوشت قرمز استان دارد. پرورش آن به دلیل ذائقه مردم، آیین‌های مذهبی و سنتی، تأمین پشم موردنیاز صنعت قالیبافی، حفظ و توسعه اشتغال عشایری و روستایی منطقه و همچنین حفظ ذخایر ژنتیکی غنی کشور، یکی از ضرورت‌های حیاتی استان کرمانشاه به حساب می‌آید (فراستی، ۱۳۹۹). گوسفند سنجابی از برترین نژادهای دامی در ایران محسوب می‌شود و افزون بر ۵۰ درصد جمعیت گوسفندان استان کرمانشاه را تشکیل می‌دهد که برتری این نژاد سبب شده تا گوسفندان سنجابی کرمانشاه در مناطق سردسیر همچون شمال شرق پرورش داده شوند و از پشم آن در صنعت بافندگی و فرش‌بافی به دلیل قابلیت بالای رنگ‌پذیری و کیفیت بالا استفاده شود.

طول دوره پرور در افزایش وزن دام، بازده غذایی و خصوصیات مختلف لاشه مؤثر است و با زیادشدن مدت پرور راندمان آن کم می‌گردد. بهترین سن برای کشتار گوسفندان و تصمیم برای انتخاب گوسفندانی که برای کشتار مناسب هستند از مسائلی هست که با استفاده از توابع منحنی رشد می‌توان پیش‌بینی نمود (Deribe و همکاران، ۲۰۲۳). منحنی‌های رشد می‌توانند داده‌های وزن برحسب سن دام را در قالب پارامترهای قابل تفسیر بیولوژیکی قرار دهند و منحنی رشد را برای نظارت بر رشد حیوانات فراهم کنند. این منحنی‌ها امکان تعیین سن بهینه در زمان کشتار و در نتیجه به دست آوردن کیفیت بهتر لاشه و گوشت را فراهم می‌کنند. با استفاده از این منحنی‌ها به راحتی می‌توان نقطه کاهش رشد را در طول دوره پروربندی شناسایی کرد (Paz و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که متغیرهای منحنی رشد در گونه‌های مختلف وراثت پذیر هستند (Ghavi Hossein-Zadeh و همکاران، ۲۰۱۷)، بنابراین امکان تغییر شکل منحنی رشد از طریق انتخاب بر اساس متغیرهای

منحنی رشد وجود دارد. لذا استفاده از توابع غیرخطی رشد به منظور اندازه‌گیری و پیش‌بینی در زمان‌های مختلف عمر حیوان و شناسایی پتانسیل‌های ژنتیکی متغیرهای تابع رشد و استفاده از آن در برنامه‌های اصلاحی به منظور افزایش عملکرد حیوان مفید خواهند بود.

منحنی‌های رشد را می‌توان با توابع یا مدل‌های غیرخطی ترسیم نمود. استفاده از توابع غیرخطی رشد به منظور اندازه‌گیری و پیش‌بینی در زمان‌های مختلف عمر حیوان و شناسایی پتانسیل‌های ژنتیکی متغیرهای تابع رشد و استفاده از آن در برنامه‌های اصلاحی به منظور افزایش عملکرد رشد حیوان مفید خواهند بود (Sharif و همکاران، ۲۰۲۱). مهم‌ترین توابع مورد استفاده شامل گومپرتز^۱، لجستیک^۲، وان برتالانفی^۳ و برودی^۴ است. با این توابع می‌توان اطلاعات مختلف مانند وزن بدن در سنین مختلف را بررسی کرد (Gautam و همکاران، ۲۰۱۸). اطلاعات مربوط به الگوی رشد دام‌ها یکی از موارد ضروری است که برای تعیین طرح‌های تغذیه‌ای و مدیریتی و طراحی استراتژی‌های اصلاح نژادی جهت بهبود فرایند رشد قابل استفاده است. همچنین برای پیش‌بینی وزن زنده در سنین بالاتر از رکوردهای وزن زنده سنین پایین‌تر نیز می‌توان از این مدل‌ها استفاده کرد (بحرینی و همکاران، ۱۳۹۴، Deribe و همکاران، ۲۰۲۳).

با افزایش سن دام، میزان ضریب تبدیل خوراک افزایش یافته و به دلیل شروع ساخت چربی در بافت‌های بدن، سرعت رشد دام نیز کاهش می‌یابد. افزایش خوراک مصرفی و کاهش سرعت رشد، سبب نامطلوب شدن ضریب تبدیل خوراک و در نتیجه کاهش عملکرد تولید دام و در نهایت کاهش عملکرد اقتصادی پرورش گوسفند خواهد شد (حسین‌پور مشهدی و همکاران، ۱۳۹۶). منحنی رشد حیوانات را می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف توصیف نمود. مؤلفه‌های منحنی رشد در گونه‌های مختلف دام توارث پذیر هستند. بنابراین می‌توان ظرفیت ژنتیکی حیوانات را برای مؤلفه‌های منحنی رشد پیش‌بینی نمود (Topal و همکاران، ۲۰۰۴). بدین ترتیب امکان تغییر شکل منحنی رشد در جمعیت، از طریق انتخاب دام‌ها بر اساس مؤلفه‌های منحنی رشد در برنامه‌های اصلاح نژادی وجود دارد. بهترین تابع توصیف‌کننده منحنی رشد بسته به نژاد و جمعیت تحت بررسی می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین پروژه حاضر باهدف معرفی بهترین تابع توصیف‌کننده رشد و معرفی زمان بهینه کشتار بره‌های نر سنجابی انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

³ - Von Bertalanffy

⁴ - Brody

¹ - Gompertz

² - Logistic

۱-۲. داده‌های مورد استفاده

مواد خوراکی مورد استفاده برای تغذیه در فصل زمستان شامل کاه گندم، یونجه خردشده، و اقلام کنسانتره شامل جو، ذرت، گندم، کنجاله سویا، سبوس گندم و افزودنی‌های معدنی و ویتامینی است. بره‌های تازه متولدشده در روز تولد پلاک کوبی شده و در فواصل زمانی منظم وزن گیری می‌شوند. بره‌ها از هفته دوم از تغذیه کمکی استفاده کرده و در سن سه‌ماهگی شیرگیری می‌شوند. فایل داده‌ها شامل شماره گوش، جنسیت، سال تولد، ماه تولد، تیپ تولد، سن دام و وزن دام در زمان تولد، یک‌ماهگی، دوماهگی، سه‌ماهگی، شش‌ماهگی، نه‌ماهگی و دوازده‌ماهگی بود. جهت ویرایش اولیه داده‌ها از نرم‌افزار Excel (۲۰۲۴) استفاده شد. پس از آماده‌سازی فایل رکورد، اوزان بدن برای سنین مختلف هر حیوان بررسی و رکورد دام‌هایی که افزایش و یا کاهش غیرمنطقی بین سنین مختلف حیوان نشان دادند، حذف شد.

اطلاعات مورد استفاده در این پروژه شامل اطلاعات شجره و رکوردهای اوزان بدن ۷۱۹ رأس گوسفند سنجابی شامل ۳۶۹ رأس بره ماده و ۳۵۰ رأس بره نر بود که طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۳ در ایستگاه مهرگان جمع‌آوری شد. اطلاعات مربوط به میانگین وزن بدن گوسفند سنجابی در سن‌های مختلف از تولد تا ۹ ماهگی به همراه پارامترهای انحراف معیار، ضریب تغییرات، حداقل و حداکثر مقدار وزن بدن در جدول ۱ نشان داده شده است. سیستم پرورش در گله گوسفندان موجود در این ایستگاه به صورت متمرکز بود. گوسفندان از اوایل اردیبهشت تا اواسط آبان از مراتع و پس‌چرهای زراعی ایستگاه به صورت آزاد تغذیه می‌کنند. سپس از اواسط آبان تا اردیبهشت‌ماه در داخل آغل و بهار بند و به صورت دستی تغذیه می‌شوند. جیره گوسفندان در این مرحله متناسب با سن، جنسیت و مراحل آبستنی تنظیم می‌شود.

جدول ۱- آمار توصیفی صفات وزن بدن در زمان‌های تولد، ۱، ۲، ۳، ۶ و ۹ ماهگی گوسفند سنجابی

Table 1- Descriptive statistics of body weight traits at birth, 1, 2, 3, 6 and 9 months of age of Sjažabi sheep

متغیرها Variables	تعداد number	میانگین mean	انحراف استاندارد Standard division	حداقل minimum	حداکثر maximum
وزن تولد Weight of birth	719	3.99	0.59	2.30	6.60
وزن ۱ ماهگی weight 1 month	719	12.91	2.12	10.00	22.00
وزن ۲ ماهگی weight 2 months	719	20.03	2.67	13.00	35.00
وزن ۳ ماهگی weight 3 months	719	23.77	3.59	17.50	37.00
وزن ۶ ماهگی weight 6 months	719	31.59	3.28	19.00	47.00
وزن ۹ ماهگی weight 9 months	719	39.23	5.47	19.00	62.00

۲-۲. برازش منحنی رشد

با استفاده از چهار مدل غیرخطی شامل مدل‌های برودی، لجستیک، گومپرتز و ون برتالانفی برای توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی استفاده شد. برازش مدل‌ها روی داده‌های فردی انجام شد. کلیه مدل‌ها با استفاده از رویه غیرخطی NLIN نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ بر روی رکوردهای وزن بدن دام‌ها در سنین مختلف برازش گشته و پارامترهای مدل‌های مذکور (A, B و K) برای همه دام‌ها برآورد گردید. پارامتر A وزن بلوغ، پارامتر B نرخ رشد و پارامتر K نرخ بلوغ را نشان می‌دهد. معادلات مدل‌های غیرخطی مورد استفاده در جدول ۲ خلاصه شده است. به منظور تخمین پارامترهای مدل‌های مختلف و بررسی نرخ رشد، ابتدا تمام حیوانات به همراه رکوردهای مربوط به وزن بدن در سنین

مورد بررسی در نرم‌افزار اکسل (۲۰۲۴) مرتب و سپس در نرم‌افزار SAS (۹/۴) مورد آنالیز قرار گرفت.

۲-۳. تعیین بهترین مدل

پس از برازش مدل‌های مختلف از شاخص‌های نیکوئی برازش شامل ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE) و شاخص اطلاعات آکائیک (AIC) جهت انتخاب بهترین مدل استفاده شد (معادله‌های ۱، ۲ و ۳). مدلی که بیشترین ضریب تبیین و یا کمترین مقادیر شاخص اطلاعات آکائیک و میانگین مربعات خطا را تولید کرد به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

$$\text{معادله ۱} \quad R^2 = 1 - (SSE/SST)$$

در این معادله SSE مجموع مربعات باقیمانده و SST مجموع مربعات کل می‌باشد.

معادله ۲ $AIC=2K-2\ln(L)$ در این معادله K شمار فراسنجه‌های مدل و L معرف حداکثر تابع درست‌نمایی است.

معادله ۳ $MSE=SSE/(n-p)$ در این رابطه SSE مجموع مربعات باقیمانده، n تعداد داده‌ها و p تعداد پارامتر است.

جدول ۲- معادلات مدل‌های غیرخطی مورد استفاده

تعداد پارامترها No. parameters	رابطه Equations	مدل‌ها Models
3	$W_t=A(1-Be^{-kt})^3+\varepsilon$	وان برتالانفی Von Bertalanffy
3	$W_t=Ae^{-(Be^{-kt})}+\varepsilon$	گومپرتز Gompertz
3	$W_t=A(1-Be^{-kt})^{-1}+\varepsilon$	برودی Brody
3	$W_t=A(1+Be^{-kt})+\varepsilon$	لجستیک Logistic

افزایش تنوع فنوتیپی در مراحل بعدی رشد است که می‌تواند ناشی از اثرات تجمعی عوامل ژنتیکی، تغذیه‌ای و مدیریتی باشد. بیشترین ضریب تغییرات مربوط به سن ۹ ماهگی بود که بیانگر تفاوت پاسخ دام‌ها به شرایط محیطی در سنین بالاتر است. نتایج برآورد متغیرهای توابع غیرخطی شامل گومپرتز، لجستیک، وان برتالانفی و برودی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳. نتایج و بحث

میانگین وزن تولد، ۱، ۲، ۳، ۶ و ۹ ماهگی بره‌های سنجابی در بازه زمانی رکورد برداری برابر با ۳/۹۹، ۱۲/۹۱، ۲۰/۰۳، ۲۳/۷۷، ۳۱/۵۹ و ۳۹/۳۳ کیلوگرم محاسبه شد. افزایش تدریجی انحراف معیار و دامنه تغییرات وزن با افزایش سن نشان‌دهنده

جدول ۳- مقادیر برآورد شده متغیرهای تابع‌های غیرخطی بررسی شده

Table 3- Descriptive statistics of body weight traits at birth, 1, 2, 3, 6 and 9 months of age of Sjababi sheep

فاصله اطمینان ۰/۹۵ Confidence Interval 0.95	انحراف استاندارد Standard division	مقدار برآورد شده Estimated value	متغیرها Variables
38.78	38.13	0.166	A
1.89	1.82	0.017	B
0.47	0.45	0.006	K
37.20	36.66	0.138	A
4.43	4.13	0.077	B
0.72	0.68	0.001	K
39.68	38.95	0.186	A
0.49	0.47	0.003	B
0.40	0.38	0.006	K
43.33	42.21	0.288	A
0.90	0.89	0.003	B
0.24	0.23	0.004	K

Ozturk و همکاران، ۲۰۲۳). در مدل لجستیک بیشترین مقدار (۰/۷۰) و در مدل برودی کمترین مقدار (۰/۲۳) را نشان داد. این موضوع بیانگر آن است که مدل لجستیک رشد سریع‌تری را در

در بین مدل‌های بررسی‌شده، مقدار پارامتر وزن بلوغ (A) در مدل برودی بیشترین مقدار (۴۲/۷۷ کیلوگرم) و در مدل لجستیک کمترین مقدار (۳۶/۹۳ کیلوگرم) را داشت. پارامتر K که نشان‌دهنده نرخ بلوغ و سرعت رسیدن به وزن نهایی است

بین پارامترهای رشد نشان می‌دهد که انتخاب دام‌ها برای افزایش سرعت رشد اولیه می‌تواند منجر به کاهش وزن نهایی بلوغ شود (Hizli و Yazgan, ۲۰۲۱). بنابراین، در برنامه‌های اصلاح نژادی گوسفند سنجابی، توجه هم‌زمان به هر دو مؤلفه سرعت رشد و وزن نهایی ضروری است. از این رو پارامترهای منحنی رشد، به ویژه پارامتر K می‌تواند به‌عنوان صفات کمکی مؤثر در شاخص‌های انتخاب مورد استفاده قرار گیرند.

مراحل اولیه زندگی پیش‌بینی می‌کند، در حالی که مدل برودی رشد کندتر و تدریجی‌تری را توصیف می‌نماید.

ضرایب همبستگی بین پارامترهای مدل‌های رشد غیرخطی در جدول ۴ نشان داده شده است. همبستگی‌های ژنتیکی و فنوتیپی متوسط و منفی در مدل‌ها، بیانگر ارتباط منفی بین سرعت رسیدن به بلوغ و وزن بلوغ است. بیشترین همبستگی منفی بین این دو پارامتر در مدل برودی (۰/۹۳۴-) مشاهده گردید. وجود همبستگی منفی و نسبتاً بالا

جدول ۴- ضرایب همبستگی پارامترهای مدل‌های رشد غیرخطی مورد بررسی در گوسفند سنجابی
Table 4- Correlation coefficients of parameters of nonlinear growth models studied in Sanjabi sheep

Correlation of between parameters of nonlinear growth models			مدل‌ها Models
FBK	FAK	FAB	
0.647	-0.744	-0.173	گومپرتز Gompertz
0.754	-0.554	-0.087	لجستیک Logistic
0.587	-0.808	-0.191	وان برتالانفی Von Bertalanffy
0.368	-0.924	-0.144	برودی Brody

بیشترین مقدار R^2 بود، اما مدل برودی نیز مقدار R^2 نسبتاً بالایی داشته و با داشتن کمترین مقادیر AIC و MSE، از برآزش بهتری برخوردار بوده و به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی انتخاب شد. در نتیجه استفاده از مدل برودی در برنامه‌های اصلاح نژادی، به‌کارگیری روش‌های تغذیه مناسب، تعیین سن مناسب برای کشتار و پیش‌بینی صحیحی از رشد در گوسفند سنجابی مناسب است.

نتایج مربوط به معیارهای نیکویی برآزش در جدول ۵ ارائه شده است. به‌منظور انتخاب بهترین مدل رشد، معیارهای ضریب تبیین (R^2)، معیار آکائیک (AIC) و میانگین مربعات خطا (MSE) مورد استفاده قرار گرفت. با وجود اینکه از نظر معیارهای آماری مختلف تفاوت چندانی بین مدل‌های مورد استفاده وجود نداشته و همه آن‌ها به‌خوبی توانایی برآزش منحنی رشد این داده‌ها را داشتند اما مدل گومپرتز بیشترین مقدار ضریب تبیین (R^2 ۰/۹۱۷) و مدل برودی کمترین مقادیر AIC (۱۰۷۱۲/۱۷) و MSE (۱۱/۹۷) را نشان داد. نتایج نشان داد اگرچه مدل گومپرتز دارای

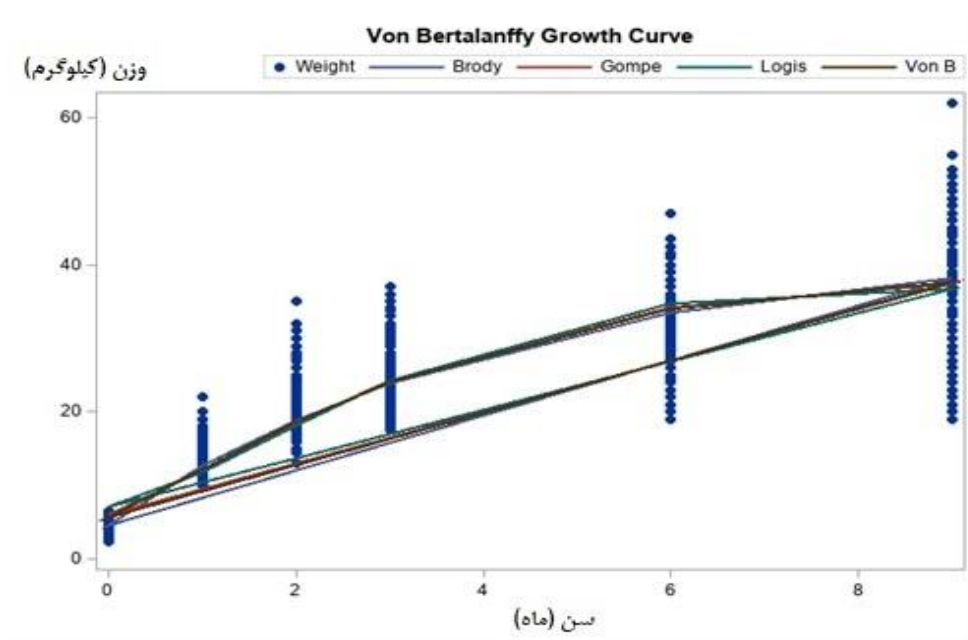
جدول ۵- معیارهای ضریب تبیین، آکائیک و میانگین مربعات خطا
Table 5- Coefficient of determination, AIC and mean square error

مدل Model	ضریب تبیین R^2	آکائیک AIC	میانگین مربعات خطا MSE
گومپرتز Gompertz	0.917	11379.81	13.97
لجستیک Logistic	0.904	11989.01	16.09
وان برتالانفی Von Bertalanffy	0.890	11147.44	13.24
برودی Brody	0.909	10712.17	11.97

گزارش‌های مختلف در انتخاب بهترین مدل، ضرورت مدل‌سازی رشد به‌طور جداگانه برای هر نژاد را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، روند تغییرات وزن مشاهده‌شده بره‌های نژاد سنجایی با افزایش سن، الگوی افزایشی غیرخطی را نشان می‌دهد. در این میان، منحنی برآورد شده توسط مدل برودی تطابق بیشتری با داده‌های واقعی داشته و به‌ویژه در سنین بالاتر توانسته است کاهش تدریجی سرعت رشد را دقیق‌تر توصیف کند.

نتایج این تحقیق مطابق با نتایج Bathaei و Leroy (۱۹۹۶) بود که مدل برودی را به‌عنوان مدل مناسب برای بررسی رشد گوسفند مهربان پیشنهاد کردند. با این وجود در تحقیقات دیگر مدل‌های متفاوتی نیز انتخاب شده است، از جمله Ghavi Hosein Zadeh (۲۰۱۷) در گوسفند گیلانی مدل ریچاردز و بحرینی بهزادی و همکاران (۱۳۹۴) در گوسفند لری بختیاری مدل وان برتالانفی را پیشنهاد دادند. لذا تفاوت



شکل ۱- نمودار منحنی رشد بره‌های نژاد سنجایی بر اساس چهار مدل برودی، گومپرتز، لجستیک و وان برتالانفی

Figure 1- Growth curve diagram of Squirrel breed lambs based on the four Brody, Gompertz, Logistic and Von Bertalanffy models

مراحل اولیه، الزاماً به وزن بلوغ بالاتری دست نمی‌یابند. این یافته با گزارش‌های Ghavi Hoesin Zadeh و Golshani (۲۰۱۶)، و Hojjati و Ghavi Hossein Zadeh (۲۰۱۸) مطابقت دارد و بر اهمیت توجه هم‌زمان به سرعت رشد و وزن نهایی در برنامه‌های اصلاح نژادی تأکید می‌کند.

مدل لجستیک با وجود پیش‌بینی نرخ رشد بالا در سنین ابتدایی، در توصیف روند رشد در مراحل بعدی دچار محدودیت بود که می‌تواند به ساختار متقارن این مدل مربوط باشد. درحالی‌که رشد واقعی دام‌ها اغلب نامتقارن بوده و کاهش سرعت رشد پس از نقطه عطف به تدریج رخ می‌دهد؛ ویژگی‌ای که به‌خوبی توسط مدل گومپرتز منعکس می‌شود (Lambe و همکاران، ۲۰۰۶). به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از مدل گومپرتز می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی وزن بدن، تعیین سن بهینه کشتار و طراحی برنامه‌های تغذیه‌ای و اصلاح نژادی در گوسفند سنجایی باشد. هرچند بهترین تابع توصیف‌کننده

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل برودی در مقایسه با سایر مدل‌های رشد غیرخطی، توانایی بیشتری در توصیف الگوی رشد بره‌های نژاد سنجایی دارد. برتری این مدل را می‌توان به انعطاف‌پذیری مناسب آن در توصیف رشد سریع اولیه و کاهش تدریجی سرعت رشد در سنین بالاتر نسبت داد (Fitzhugh, 1957)؛ ویژگی‌ای که با الگوی زیستی رشد نشخوارکنندگان تطابق بالایی دارد. برآورد وزن بلوغ در مدل گومپرتز در محدوده‌ای واقع بینانه قرار داشت و با میانگین وزن‌های مشاهده‌شده در سنین پایانی دوره رشد هم‌خوانی مناسبی نشان داد. در مقابل، مدل برودی وزن بلوغ بسیار بالاتری را برآورد کرد که می‌تواند ناشی از حساسیت این مدل به داده‌های انتهایی و تمایل آن به بیش برآورد وزن نهایی باشد. نتایج مشابهی توسط بحرینی بهزادی و همکاران (۲۰۱۴) در گوسفند بلوچی و خیرآبادی (۱۳۹۵) در گوسفند زندی گزارش شده است. همبستگی منفی مشاهده‌شده بین پارامترهای K و A در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد که دام‌هایی با رشد سریع‌تر در

منحنی رشد بسته به نژاد و جمعیت تحت بررسی می‌تواند متفاوت باشد، اما احتمالاً پارامترهای این مدل می‌توانند به‌عنوان صفات کمکی در شاخص‌های انتخاب مورداستفاده قرار گیرند تا ضمن بهبود سرعت رشد، عملکرد اقتصادی گله نیز افزایش یابد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل‌های رشد غیرخطی ابزار مناسبی برای توصیف و تحلیل الگوی رشد بره‌های نژاد سنجابی است. بررسی چهار مدل گومپرتز، لجستیک، وان‌برتالانفی و برودی نشان داد که هرچند تمامی مدل‌ها توانایی قابل قبولی در برازش داده‌های وزن بدن در سنین مختلف داشتند، اما بر اساس معیارهای نیکویی برازش، مدل برودی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی انتخاب شد. برتری مدل برودی بیانگر توانایی بیشتر این مدل در انعکاس الگوی زیستی رشد بره‌ها، به‌ویژه رشد سریع اولیه و کاهش تدریجی سرعت رشد در سنین بالاتر است. این ویژگی باعث می‌شود که پیش‌بینی وزن بدن در سنین مختلف، به‌ویژه در دوره‌های حساس مدیریتی مانند زمان از شیرگیری و پرواربندی، با دقت بالاتری انجام شود. این یافته می‌تواند به اصلاح برنامه‌های پرورشی و تغذیه‌ای این نژاد کمک کند و در نهایت موجب افزایش بهره‌وری تولید گوشت شود. همچنین مقادیر برآورد شده پارامترهای این مدل از نظر زیستی واقع‌بینانه بوده و با داده‌های مشاهده‌شده هم‌خوانی مناسبی داشتند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از کلیه کارکنان و کارگران ایستگاه تحقیقات گوسفند سنجابی مهرگان، به دلیل همکاری صمیمانه در جمع‌آوری، ثبت و نگهداری داده‌های مورداستفاده در این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

«نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند»

دسترسی به داده‌ها

«همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است»

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آنالیز داده‌ها، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: جمع‌آوری و واردکردن داده‌ها در نرم‌افزار، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

منابع

بحرینی بهزادی، محمدرضا (۱۳۹۴). مقایسه مدل‌های مختلف رشد و شبکه‌های عصبی مصنوعی در برازش منحنی رشد در گوسفند لری بختیاری. پژوهش در نشخوارکنندگان ۳(۲)، ۸۵-۷۸.

حسین‌پور مشهدی، مجتبی؛ الهی ترشیزی، مهدی، و احتشام قرایی، شهاب (۱۳۹۶). توصیف منحنی رشد در بره‌های نر و ماده نژاد بلوچی با مدل‌های غیرخطی رشد. پژوهش‌های تولیدات دامی، ۱۵(۸)، ۱۵۵-۱۶۰. <https://doi.org/10.29252/rap.155-160>.
8.15.155

خیرآبادی، خبات (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد برخی از توابع غیرخطی در توصیف منحنی رشد گوسفند نژاد زندگی. علوم دامی/ایران، ۴۷(۴)، ۶۱۹-۶۰۹.

<https://doi.org/10.22059/ijas.2017.203271.653432>

فراستی، سیروس (۱۳۹۹). ارزیابی و پایش ویژگی‌های فنوتیپی و تولیدی گوسفند سنجابی. علوم و فنون دامپرووری، ۱۰(۳۹)، ۲۴-۱۳.

<https://doi.org/10.22092/aasrj.2021.353899.1221>

References

Bahreini Behzadi, M. R., Aslaminejad, A. A., Sharifi, A. R., & Simianer, H. (2014). Comparison of mathematical models for describing the growth of Baluchi sheep. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 57-68.

Bathaei, S.S., & Leroy P. (1996) Growth and mature weight of Mehraban Iranian fat-tailed sheep. *Small Ruminant Research*, 22(2), 155-162. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(96\)00888-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(96)00888-7)

Deribe, B., Tesema, Z., Lakew, M., Zegeye, A., Kefale, A., Shibesh, M., & Belayneh, N. (2023). Growth and growth curve analysis in Dorper × Tumele crossbred sheep under a smallholder management system. *Translational Animal Science*, 7(1), txad034. <https://doi.org/10.1093/tas/txad034>

Ferasati, S. (2021). Evaluation of Phenotypic and generative characteristics of Sanjabi sheep. *Applied Animal Science Research Journal*, 39, 13-24. <https://doi.org/10.22092/aasrj.2021.353899.1221> [in Persian].

- Lambe, N.R., Navajas, E.A., Simm, G., & Bunger, L.A. (2006). A genetic investigation of various growth models to describe growth of lambs of two contrasting breeds. *Journal of Animal Science*, 84(10), 2642–2654. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-041>
- Kheirabadi, Kh. (2016). Performance comparisons of some nonlinear functions in describing the growth curve of Zandi sheep breed. *Iranian Journal of Animal Science*, 47(4), 609-619. <https://doi.org/10.22059/ijas.2017.203271.653432> [in Persian].
- Mohammadi, Y., Rashidi, A., Mokhtari, M.S., & Esmailzadeh, A.K. (2010). Quantitative genetic analysis of growth traits and kleiber ratios in Sanjabi sheep. *Small Ruminant Research*, 93(2), <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.05.005>
- Ozturk, N., Dilara Kecici, P., Serva, L., Ekiz, B., & Magrin, L. (2023). Comparison of Nonlinear Growth Models to Estimate Growth Curves in Kivircik Sheep under a Semi-Intensive Production System. *Animals*, 13(14), 2-17. <https://doi.org/10.3390/ani13142379>
- Paz, C.C.P., Venturini, G.C., Contini, E., Costa, R.L.D., Lameirinha, L.P., & Quirino, C.R. (2018). Nonlinear models of Brazilian sheep in adjustment of growth curves. *Czech journal of animal science*, 63(1), 331-338. <https://doi.org/10.17221/87/2017-CJAS>
- Sharif, N., Ali, A., Mohsin, I., & Ahmad, N. (2021). Evaluation of nonlinear models to define growth curve in Lohi sheep. *Small ruminant research*, 205, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106564>
- Topal, M., Ozdermir, M., Aksakal, V., Yildiz, N., & Dogru, U. (2004). Determination of best Non-linear function in order to estimate growth in Morkaraman and Awassi Lambs. *Small Ruminant Research*, 55, 229-232. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2004.01.007>
- Fitzhugh, H.A. (1976). Analysis of growth-curves and strategies for altering their shape. *Journal of Animal Science*, 42(4), 1036-1051. <https://doi.org/10.2527/jas1976.4241036x>
- Gautam, L., Kumar, V., Waiz, H.A., & Nagda, R.K. (2018). Estimation of Growth Curve Parameters Using Non-Linear Growth Curve Models in Sonadi Sheep. *International Journal of Livestock Research*, 8(9), 104-113. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20180131044656>
- Ghavi Hossein-Zadeh, N., & Golshani, M. (2016). Comparison of non-linear models to describe growth of Iranian Guilan sheep. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 29(3), 199-209. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v29n3a05>
- Ghavi Hossein-Zadeh, N. (2017). Modelling growth curve in Moghani sheep: comparison of non-linear mixed growth models and estimation of genetic relationship between growth curve parameters. *Journal of Agricultural Science*, 155(7), 1-10. <https://doi.org/10.1017/S0021859617000326>
- Hizli, H., & Yazgan, E. (2021). Comparison of the growth curve models on live weights in terms of different environmental factors in Awassi lambs. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 11(3), 577-586. <https://doi.org/10.1001.1.2251628.2021.11.3.16.2>
- Hojjati, F., & Ghavi Hossein Zadeh, N. (2018). Comparison of non-linear growth models to describe the growth curve of Mehraban sheep. *Journal of applied animal research*, 46(1), 499-504. <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1348949>
- Hosseinpour Mashhadi, M., Elahi Torshizi, M., & Ehtesham Gharaee, SH. (2017). Description of Growth Curve in Male and Female Lambs of Baluchi Breed by Application of Nonlinear Growth Models. *Research on Animal Production*, 8(15), 155-160. <https://doi.org/10.29252/rap.8.15.155> [in Persian].