New Approaches in Animal Sciences

Homepage: https://naias.uma.ac.ir

# Using Nonlinear Regression Functions to Growth Curve Description of Sanjabi Sheep

**Sajad Badbarin[1]✉, Mohammad Heydari[2], Javad Ahmadpanah[3]**

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

**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.

## ABSTRACT

**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 loss 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 quality of meat. 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. Model 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

یافته‌های نوین علوم دامی

# استفاده از توابع رگرسیون غیرخطی جهت توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی

سجاد بادبرین[1]✉، محمد حیدری[1]، جواد احمد پناه[2]

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**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۹/۳۰
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۰./۲۸
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۰./۲۹
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۱./۰۱

**کلیدواژه‌ها:**
مدل‌های غیرخطی،
منحنی رشد،
گوسفند سنجابی.

## چکیده

**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.

**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.

**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 آن‌که مدل گومپرتز بیشترین مقدار ضریب تعیین 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 غیرخطی جهت توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی. ***یافته‌های نوین علوم دامی***، ۱ (۱)، ۱-۱۲. http//doi.org/10.22098/naas.2026.19102.1010

**ناشر:** دانشگاه محقق اردبیلی.

© نویسندگان.

## 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 باارزش 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 داده‌شده 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 توسعهٔ اشتغال عشایری و روستایی منطقه و همچنین حفظ ذخایر ژنتیکی غنی کشور، یکی از ضرورت‌های حیاتی استان کرمانشاه به‌حساب 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 پروار در افزایش وزن دام، بازده غذایی و خصوصیات مختلف لاشه مؤثر است و با زیادشدن مدت پروار 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 درنتیجه به دست آوردن کیفیت بهتر لاشه و گوشت را فراهم می‌کنند. با استفاده از این منحنی‌ها به‌راحتی می‌توان نقطه کاهش رشد را در طول دوره پرواربندی شناسایی کرد (Paz و همکاران، ۲۰۱۸). (Paz et al., 2018). 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 به‌منظور اندازه‌گیری و پیش‌بینی در زمان‌های مختلف عمر حیوان و شناسایی پتانسیل‌های ژنتیکی متغیرهای تابع رشد و استفاده از آن در برنامه‌های اصلاحی به‌منظور افزایش عملکرد حیوان مفید خواهند بود.

منحنی‌های رشد را می‌توان با توابع یا مدل‌های غیرخطی ترسیم نمود. استفاده از توابع غیرخطی رشد به‌منظور اندازه‌گیری و پیش‌بینی در زمان‌های مختلف عمر حیوان و شناسایی پتانسیل‌های ژنتیکی متغیرهای تابع رشد و استفاده از آن در برنامه‌های اصلاحی به‌منظور افزایش عملکرد رشد حیوان مفید خواهند بود (Sharif و همکاران، ۲۰۲۱). مهم‌ترین توابع مورداستفاده شامل گومپرتز[1]، لجستیک[2]، وان برتالانفی[3] و برودی[4] 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 قابل‌استفاده 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 افزایش‌یافته 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 درنتیجه کاهش عملکرد تولید دام و درنهایت 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.

[1] - Gompertz
[2] - Logistic
[3] - Von Bertalanffy
[4] - Brody

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. داده‌های مورداستفاده

اطلاعات مورداستفاده 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 داده‌شده است. سیستم پرورش در گله گوسفندان موجود در این ایستگاه به‌صورت متمرکز بود. گوسفندان از اوایل اردیبهشت تا اواسط آبان از مراتع و پس‌چرهای زراعی ایستگاه به‌صورت آزاد تغذیه می‌کنند. سپس از اواسط آبان تا اردیبهشت‌ماه در داخل آغل و بهاربند و به‌صورت دستی تغذیه می‌شوند. جیره گوسفندان در این مرحله متناسب با سن، جنسیت و مراحل آبستنی تنظیم می‌شود. مواد خوراکی مورداستفاده 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 پلاک‌کوبی 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 رکوردها، 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.

**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 Sjajabi 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 مورداستفاده در جدول ۲ خلاصه‌شده است.

به‌منظور تخمین پارامترهای مدل‌های مختلف و بررسی نرخ رشد، ابتدا تمام حیوانات به همراه رکوردهای مربوط به وزن بدن در سنین موردبررسی 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 به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

معادله ۱ $R^2=1-(SSE/SST)$

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 مورداستفاده**

**Table 2- Equations of the nonlinear models used**

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

## 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 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 داده‌شده است.

**جدول ۳- مقادیر برآورد شده متغیرهای تابع‌های غیرخطی بررسی‌شده**

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

| | متغیرها Variables | مقدار برآورد شده Estimated value | انحراف استاندارد Standard division | فاصله اطمینان ۰/۹۵ Confidence Interval 0.95 | |
|---|---|---|---|---|---|
| گومپرتز Gompertz | A | 38.45 | 0.166 | 38.13 | 38.78 |
| | B | 1.85 | 0.017 | 1.82 | 1.89 |
| | K | 0.46 | 0.006 | 0.45 | 0.47 |
| لجستیک Logistic | A | 36.93 | 0.138 | 36.66 | 37.20 |
| | B | 4.28 | 0.077 | 4.13 | 4.43 |
| | K | 0.70 | 0.001 | 0.68 | 0.72 |
| وان برتالانفی Von Bertalanffy | A | 39.32 | 0.186 | 38.95 | 39.68 |
| | B | 0.48 | 0.003 | 0.47 | 0.49 |
| | K | 0.39 | 0.006 | 0.38 | 0.40 |
| برودی Brody | A | 42.77 | 0.288 | 42.21 | 43.33 |
| | B | 0.89 | 0.003 | 0.89 | 0.90 |
| | K | 0.23 | 0.004 | 0.23 | 0.24 |

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

(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 مراحل اولیه زندگی پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که مدل برودی رشد کندتر و تدریجی‌تری را توصیف می‌نماید.

ضرایب همبستگی بین پارامترهای مدل‌های رشد غیرخطی در جدول ۴ نشان داده‌شده 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 (۰/۹۲۴-) مشاهده گردید. وجود همبستگی منفی و نسبتاً بالا 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. ازاین‌رو پارامترهای منحنی رشد، به‌ویژه پارامتر K می‌توانند به‌عنوان صفات کمکی مؤثر در شاخص‌های انتخاب مورداستفاده قرار گیرند.

**جدول ٤- ضرایب همبستگی پارامترهای مدل‌های رشد غیرخطی موردبررسی در گوسفند سنجابی**

**Table 4- Correlation coefficients of parameters of nonlinear growth models studied in Sanjabi sheep**

| مدل‌ها **Models** | همبستگی بین پارامترهای مدل‌های رشد غیرخطی **Correlation of between parameters of nonlinear growth models** | | |
|---|---|---|---|
| | $r_{AB}$ | $r_{AK}$ | $r_{BK}$ |
| گومپرتز Gompertz | -0.173 | -0.744 | 0.647 |
| لجستیک Logistic | -0.087 | -0.554 | 0.754 |
| وان برتالانفی Von Bertalanffy | -0.191 | -0.808 | 0.587 |
| برودی Brody | -0.144 | -0.924 | 0.368 |

نتایج مربوط به معیارهای نیکویی برازش در جدول ۵ ارائه‌شده است. به‌منظور انتخاب بهترین مدل رشد، معیارهای ضریب تبیین ($R^2$)، معیار آکائیک (AIC) و میانگین مربعات خطا (MSE) مورداستفاده قرار گرفت. باوجوداینکه ازنظر معیارهای آماری مختلف تفاوت چندانی بین مدل‌های مورداستفاده وجود نداشته و همه آن‌ها به‌خوبی توانایی برازش منحنی رشد این داده‌ها را داشتند اما مدل گومپرتز بیشترین مقدار ضریب $R^2$ (۰/۹۱۷) و مدل برودی کمترین مقادیر AIC (۱۰۷۱۲/۱۷) و MSE (۱۱/۹۷) را نشان داد. نتایج نشان داد اگرچه مدل گومپرتز دارای بیشترین مقدار $R^2$ بود، اما مدل برودی نیز مقدار $R^2$ نسبتاً بالایی داشته و با داشتن کمترین مقادیر AIC و MSE، از برازش بهتری برخوردار بوده و به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی رشد گوسفند سنجابی انتخاب شد. درنتیجه استفاده از مدل برودی در برنامه‌های اصلاح نژادی، به‌کارگیری روش‌های تغذیه مناسب، تعیین سن مناسب برای کشتار و پیش بینی صحیحی از رشد در گوسفند سنجابی مناسب است.

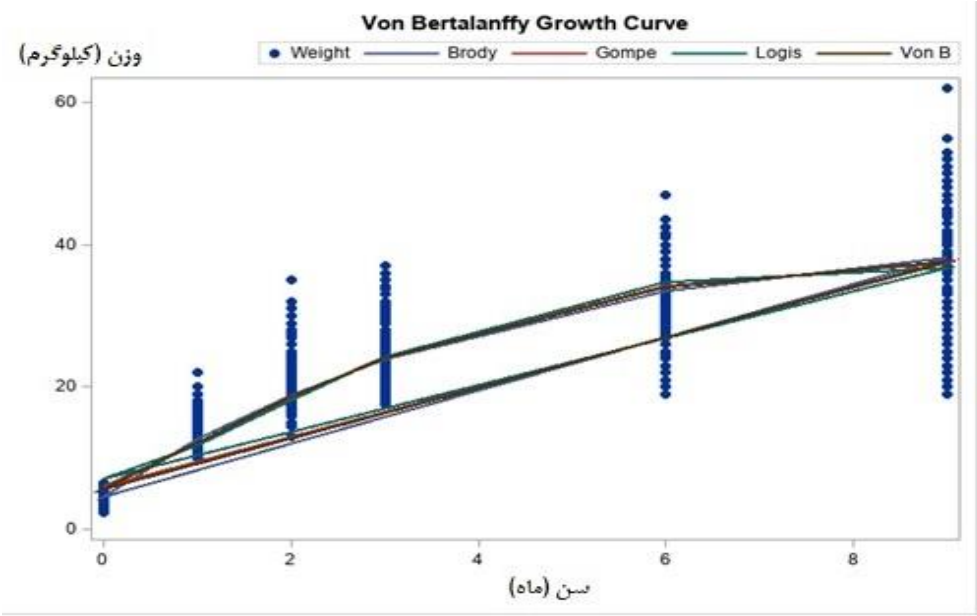
**جدول ۵- معیارهای ضریب تبیین، آکائیک و میانگین مربعات خطا**

**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 |

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. بااین‌وجود در تحقیقات دیگر مدل‌های متفاوتی نیز انتخاب‌شده است، ازجمله 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 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 سنجابی 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.




**شکل ۱- نمودار منحنی رشد بره‌های نژاد سنجابی 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**

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل برودی در مقایسه با سایر مدل‌های رشد غیرخطی، توانایی بیشتری در توصیف الگوی رشد بره‌های نژاد سنجابی 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 واقع‌بینانه 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 گزارش‌شده است. همبستگی منفی مشاهده‌شده بین پارامترهای A و K در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد که دام‌هایی با رشد سریع‌تر در مراحل اولیه، الزاماً به وزن بلوغ بالاتری دست نمی‌یابند. این یافته با گزارش‌های Ghavi Hoein Zadeh و Golshani (۲۰۱۶)، و Hojjati و Ghavi Hossein Zadeh (۲۰۱۸) مطابقت دارد و بر اهمیت توجه هم‌زمان به‌سرعت رشد و وزن نهایی در برنامه‌های اصلاح نژادی تأکید می‌کند.

مدل لجستیک باوجود 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 به‌تدریج رخ می‌دهد؛ ویژگی‌ای که به‌خوبی توسط مدل گومپرتز منعکس می‌شود (Lambe و همکاران، ۲۰۰۶). به‌طورکلی، 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 سنجابی باشد. هرچند بهترین تابع توصیف‌کننده 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 درنهایت موجب افزایش بهره‌وری تولید گوشت شود. همچنین مقادیر برآورد شده پارامترهای این مدل ازنظر 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 منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه‌شده 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*. ۸(۱۵)، ۱۶۰-۱۵۵. https://doi.org/10.29252/rap.8.15.155

خیرآبادی، خبات (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد برخی از توابع غیرخطی در توصیف منحنی رشد گوسفند نژاد زندی. *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 دامپروری. 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

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].

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/jas1976.4241 036x

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/20.1001.1.2251628.2021.11.3.16.2

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].

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