تولیدات دامی
دوره ۲۳ ■ شماره ٤ ■ زمستان ١٤٠٠
صفحه‌های ٥٠٠-٤٩١
DOI: 10.22059/jap.2021.326557.623626

مقاله پژوهشی

مقایسه برخی مدل‌های ریاضی غیرخطی برای توصیف منحنی رشد گوساله‌های سیستانی

نوراله شاهرودی[1]، محمد رکوعی[2و3*]، هادی فرجی آروق[4]، علی مقصودی[2]، مرتضی کیخا صابر[5]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲. دانشیار، گروه علوم دامی و بیوانفورماتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳. دانشیار، گروه علوم دام و طیور، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران.
۴. استادیار، پژوهشکده دام‌های خاص، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۵. استادیار، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، زابل، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

چکیده

هدف از این پژوهش، برازش مدل‌های غیرخطی مختلف برای توصیف منحنی رشد و انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده منحنی رشد برای گوساله‌های گاو سیستانی بود. از رکوردهای وزن بدن ٢٤١ گوساله (١١٨ رأس نر و ١٢٣ رأس ماده) که توسط ایستگاه تحقیقات گاو سیستانی زهک بین سال‌های ١٣٨٩ تا ١٣٩٦ جمع‌آوری شده بود، استفاده شد. چهار مدل غیرخطی (گمپرتز، لجستیک، ریچاردز، و ویبول) بر روری رکوردهای وزن بدن برازش و مناسب‌ترین مدل توسط معیارهای برازش نیکویی (جذر میانگین مربعات خطا، معیار اطلاعات بیزی، معیار اطلاعات آکائیک و ضریب تعیین تصحیح‌شده) مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس معیارهای برازش نکویی، مدل ریچاردز مناسب‌ترین تابع برای توصیف منحنی رشد در گوساله‌های نر و ماده بود. اثر جنس بر روی فراسنجه‌های منحنی‌ها در بسیاری از توابع معنی‌دار بود (P<٠/٠٥). مدل‌های لجستیک و ریچاردز به‌ترتیب بالاترین و پایین‌ترین مقدار فراسنجه مرتبط با وزن ابتدایی را داشتند. گوساله‌های نر در سن و وزن بالاتری نسبت به گوساله‌های ماده به نقطه عطف رسیدند. با توجه به نتایج حاصل برای مدیریت بهتر تغذیه‌ای و انتخاب برای رشد سریع با صحت بالا، می‌توان از مدل مناسب جهت بررسی الگوی رشد این نژاد استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: برازش نیکویی، گوساله سیستانی، مدل ریچاردز، وزن بدن، وزن در نقطه عطف.

Comparison of some non-linear mathematical models to describe the growth curve of Sistani calves

Noorolahe Shahroodi[1], Mohammad Rokouei[2,3*], Hadi Faraji-Arough[4], Ali Maghsoudi[2], Morteza Kykha Saber[5]
1. Former M.Sc. Student, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
2. Associate Professor, Department of Animal Science and Bioinformatics, Agriculture Faculty, University of Zabol, Zabol, Iran.
3. Associate Professor, Department of Animal and Poultry Science, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Iran.
4. Assistant Professor, Research Center of Special Domestic Animals, University of Zabol, Zabol, Iran
5. Assistant Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Zabol, Iran.
Received: July 17, 2021 Accepted: September 21, 2021

Abstract

The purpose of this study was to fit different nonlinear models to describe growth curve and selection the best model to describe a growth curve for calves of Sistani calves. Body weight records of 241 calves (118 males and 123 females) collected by the Sistani Dairy Cattle Research Station of Zahak from year 2010 to 2017 were used. Four nonlinear models (Gompertz, Logistic, Richards, and Weibull) were fitted to the body weight records and the best model was selected by the goodness-of-fit criteria (Mean square error, Bayesian information criterion, Akaike information criterion and corrected coefficient of determination). According to goodness-of-fit criteria, Richards model was the most appropriate model to describe the growth curve in male and female calves. The effect of sex on curve parameters was significant in many functions (P <0.05). Logistic and Richards models had the highest and the lowest initial weight parameter, respectively. Male calves reached to the inflection point in a higher age and weight compared to female calves. According to the results of this study, a proper model can be used to study the growth pattern of this breed in order to better nutritional management and selection for rapid growth with high accuracy.

Keywords: Body weight, Goodness of fit, Richards model, Sistani calve, Weight at inflection point.

* نویسنده مسئول Email: Rokouei@uoz.ac.ir

مقدمه

در علم بیولوژی، رشد تحت کنترل ژنتیک و محیط بوده و می‌تواند با تغییرات ایجادشده طی حیات، که همراه با استفاده از مواد غذایی است، تعریف شود. این فرایند منجر به افزایش حجم، اندازه یا شکل یک موجود می‌شود. این تغییرات را می‌توان با اندازه‌گیری وزن بدن در دوره‌های منظم پیگیری کرده و توسط مدل‌های ریاضی که برای منحنی رشد برازش می‌شود موردبررسی قرار داد. پارامترهای رشد که از لحاظ بیولوژیکی قابل تفسیر هستند، می‌توانند تغییر ناشی از محیط و وقایع تصادفی را از بین ببرند [۱].

رشد حیوان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های ارزیابی بهره‌وری در واحدهای گاوهای گوشتی است. راندمان رشد در گاو نسبت به سایر حیوانات تولیدکننده گوشت از اهمیت بیش‌تری برخوردار است، زیرا این گونه دارای نرخ پایین تولیدمثلی بوده و هزینه نگهداری مادری آن به‌ازای هر حیوانی که به بازار عرضه می‌شود بالاتر است [۳]. بنابراین برای مدت‌ها است که صنعت گاو گوشتی علاقه زیادی به مدل‌سازی رشد حیوانات دارد تا از خلاصه فراسنجه‌های ریاضی تکامل وزن نسبت به سن، برای مقایسه و پیش‌بینی عملکرد حیوان استفاده کند [۲۵]. علاوه بر این وزن گاو بالغ یک صفت مهم در برنامه‌های بهبود ژنتیکی می‌باشد، که به‌دلیل اثر آن بر صفات اقتصادی دیگر از جمله نیازهای نگهداری، تولیدمثل، و سایر صفات فیزیولوژیکی مورد توجه است [۸].

رشد در یک حیوان می‌تواند توسط منحنی‌های رشد مطالعه شود که ارتباط بین وزن و سن حیوان را توصیف می‌کند [۲٤]. مدل‌های غیرخطی که برای توصیف منحنی رشد استفاده می‌شود توانایی ارائه یک توصیف قابل اعتماد از رشد حیوان، به‌صورت توضیحات قابل درک برای تولیدکنندگان و گاوداران را دارد [۲۰]. آگاهی از ویژگی منحنی رشد برای یک نژاد گاو برای تصمیم‌گیری انتخاب با درجه اعتماد بالا برای پژوهش‌گران و گاوداران مهم می‌باشد تا بتوانند به‌واسطه پاسخ انتخابی، ویژگی منحنی رشد را تغییر دهد [۱٦]. الگوی رشد در گاو گوشتی و شیری می‌تواند مرتبط با راندمان سیستم تولیدی و طول عمر گاو باشد [۱۲]. پیش‌بینی رشد و تشخیص زمان بیشینه نرخ رشد و زمان آماده‌شدن حیوان برای فروش، متغیرهای مهمی هستند که به سودآوری سیستم‌های تولید حیوان کمک می‌کنند [۹].

مطالعه منحنی‌های رشد در گاو ضروری می‌باشد زیرا اطلاعات مناسب برای ایجاد برنامه‌های راهبردی تغذیه‌ای و اصلاح نژادی از جمله بهبود مدیریت، تعیین نیازمندی‌های تغذیه‌ای، دانش در مورد تنوّع ژنتیکی ویژگی‌های مرتبط با رشد، برآورد ظرفیت ژنتیکی حیوان برای رشد را فراهم کرده و در روند تصمیم‌گیری برای اتخاذ یک تکنولوژی خاص کمک می‌کند [۱۹]. وزن بدن در گاوهای گوشتی مهم‌ترین ویژگی اثرگذار بر عملکرد لاشه و در نهایت درآمد پرورش‌دهنده می‌باشد. بنابراین برآورد وزن گاو به‌صورت تابعی از زمان برای تولیدکنندگان گوشت مهم می‌باشد. هم‌چنین پیش‌بینی رشد می‌تواند به پرورش‌دهنده کمک کند تا در مورد بهترین زمان برای کشتار حیوان به‌منظور افزایش سود اقتصادی خود تصمیم بگیرد [۲]. گاو سیستانی به‌عنوان یکی از ظرفیت‌ها و سرمایه‌های دامی کشور است که دارای استعدادها و قابلیت‌های ژنتیکی ویژه‌ای از نظر تولید گوشت می‌باشد. هم‌چنین ویژگی‌هایی مانند مقاومت در برابر بیماری‌ها و شرایط نامناسب پرورش در کنار استعداد رشد، رشد جبرانی مناسب گوساله‌های نر سیستانی، قابلیت تولید گوشت، کمیت و کیفیت لاشه و بازده غذایی و قابلیّت پرواربندی مناسب در این نژاد قابل‌توجه می‌باشد [۷]. با توجه به این‌که گاو سیستانی یک گاو بومی منطقه سیستان بوده و از نظر تولید گوشت جزو دام‌های گوشتی می‌باشد. با وجود اهمیت صفات رشد در این نژاد، اطلاعاتی از الگوی

رشد این حیوان موجود نمی‌باشد. بنابراین این پژوهش با هدف تعیین مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده رشد و آگاهی از فراسنجه‌های منحنی رشد انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با استفاده از رکوردهای وزن بدن گاو سیستانی که توسط مرکز تحقیقات گاو سیستانی زهک جمع‌آوری شده بود، انجام شد. همه رکوردهای وزن بدن (وزن تولد، سه، شش، نه و ۱۲ ماهگی) گاوهای ماده و نر که توسط این مرکز بین سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۶ جمع‌آوری شده بود، در پژوهش حاضر مورداستفاده قرار گرفت. تنها اطلاعات وزن بدن گاوهایی که دارای حداقل چهار رکورد وزنی پشت سر هم بودند در پژوهش حاضر استفاده شد. پس از ویرایش رکوردهای موجود در مرکز، در مجموع از رکوردهای وزن بدن ۲۴۱ گوساله (۱۱۸ رأس نر و ۱۲۳ رأس ماده) برای برازش منحنی رشد استفاده شد. چهار مدل غیرخطی گمپرتز، ریچاردز، ویبول و لجستیک برای توصیف منحنی رشد بر روی داده‌های وزن بدن هر یک از گوساله‌ها در دو جنس نر و ماده مورد برازش قرار گرفت. جدول (۱) معادله مدل‌های غیرخطی مورداستفاده برای را نشان می‌دهد.

بعد از برازش مدل‌ها برای جنس نر و ماده، مناسب‌ترین مدل برای هر جنس با استفاده از معیارهای نیکویی برازش انجام گرفت. معیارهای مورداستفاده در پژوهش حاضر شامل ضریب تبیین تصحیح‌شده (رابطه ۱)، میانگین مربعات خطا (رابطه ۲)، معیار اطلاعات آکائیک (رابطه ۳) و معیار اطلاعات بیزی (رابطه ٤) بودند:

$$R^2_{Adj} = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-p}\right) * (1 - R^2_{model})\right] \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-p} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$AIC = n.\ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2p \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$BIC = n.\ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + p.\ln(n) \quad \text{(رابطه ٤)}$$

در روابط بالا، AIC معیار اطلاعات آکائیک، BIC معیار اطلاعات بیزی، MSE میانگین مربعات خطا، R^2_{Adj} ضریب تبیین تصحیح‌شده، R^2_{model} ضریب تبیین است که به‌صورت 1-(SSE/SST) محاسبه می‌شود، SSE جمع مربعات خطا، SST جمع مربعات کل، n تعداد مشاهدات و p تعداد فراسنجه‌های تابع می‌باشند. معیار اطلاعات آکائیک، بیزی و میانگین مربعات خطا کوچک‌تر [۱۱] و ضریب تبیین تصحیح‌شده بالا برای توابع نشان‌دهنده برازش بهتر آن تابع برای داده‌های موردنظر بود.

جدول ۱. معادلات مدل‌ها، سن و وزن در نقطه عطف مدل‌های استفاده‌شده

مدل[۱]	معادله	سن در نقطه عطف (t_i)	وزن در نقطه عطف (w_i)
گمپرتز	$W = W_0 \exp\left\{[1 - \exp(-k \times Age)]\ln\left(\frac{W_f}{W_0}\right)\right\}$	$\frac{1}{k}\left[\ln\left(\ln\left(\frac{W_f}{W_0}\right)\right)\right]$	$\frac{W_f}{e}$
ریچاردز	$W = \frac{W_0 W_f}{[W_0^m + (W_f^m - W_0^m)e^{-kt}]^{1/m}}$	$\frac{1}{k} \times \ln\left(\frac{m}{(W_f^m - W_0^m)/W_0^m}\right)$	$\frac{W_f}{\sqrt[m]{m+1}}$
لجستیک	$W = \frac{W_0 W_f}{[W_0 + (W_f - W_0)\exp(-k \times Age)]}$	$\frac{1}{k}\ln\left(\frac{W_f - W_0}{W_0}\right)$	$\frac{W_f}{2}$
ویبول	$W = W_f - (W_f - W_0)\exp[-(k \times Age)^m]$	$\frac{1}{k}\left(\left(\frac{m-1}{m}\right)^{1/m}\right)$	$W_f - (W_f - W_0)\exp\left(-\frac{m-1}{m}\right)$

۱. در همه مدل‌ها، w وزن بدن در سن t، w_0 وزن بدن برای روز اول، w_f وزن نهایی، k سن در زمانی که نصف حداکثر وزن را دارد (شاخص بلوغ)، m پارامتر شکل، t_i و wi به‌ترتیب سن و وزن در نقطه عطف می‌باشند.

در همه مدل‌ها، w وزن بدن در سن t، w_0 وزن بدن برای روز اول، w_f وزن نهایی، k سن در زمانی که نصف حداکثر وزن را دارد (شاخص بلوغ)، m پارامتر شکل، t_i و wi به‌ترتیب سن و وزن در نقطه عطف می‌باشند.

رکوردهای وزن بدن در سنین مختلف بین گوساله‌های نر و ماده با آزمون تی‌استیودنت مورد آزمون آماری قرار گرفت. مدل‌های مدنظر گرفته‌شده بر روی وزن بدن گوساله‌های نر و ماده با استفاده از بسته نرم‌افزاری nlme [۲۳] نرم‌افزار R (نسخه ٤/٠/٤) برازش شدند و فراسنجه‌های مدل‌های برازش‌شده برای دو جنس محاسبه شدند. بعد از به‌دست‌آوردن فراسنجه‌های مدل برای هر دو جنس، تفاوت فراسنجه‌ها بین دو جنس نر و ماده با استفاده از آزمون تی‌استیودنت مورد مقایسه قرار گرفت. با استفاده از فراسنجه‌های هر مدل، سن و وزن در نقطه عطف برای هر دو جنس در مدل‌های مختلف به‌دست آمد.

نتایج و بحث

میانگین و انحراف استاندارد داده‌های وزن بدن در سنین مختلف از تولد تا یک سالگی در جدول (۲) نشان داده شده است. از زمان تولد، گوساله‌های نر دارای وزن بدن بالاتری نسبت به گوساله‌های ماده بودند و تفاوت بین دو جنس در این صفت با افزایش سن گوساله‌ها افزایش یافته است. به‌طوری‌که گوساله‌های نر در هنگام تولد و یک سالگی به‌ترتیب ۷/۰۸ و ١٦/١٠ درصد وزن بیش‌تری نسبت به گوساله‌های ماده داشتند. تفاوت وزن بدن بین دو جنس در تمامی سنین از نظر آماری معنی‌دار بود (P<۰/۰۵).

جدول ۲. میانگین و انحراف استاندارد وزن بدن گوساله‌های نر و ماده سیستانی در سنین مختلف

سن (ماه)	وزن بدن (کیلوگرم)	
	ماده	نر
تولد	٢٤/١٨٠ ± ٤/١١٨^{b}	٢٥/٨٩٣ ± ٤/٤٣٥^{a}
سه ماهگی	٥٤/٠٠٨ ± ٩/٩٧٣^{b}	٥٧/١٢٦ ± ١٠/٤٩٨^{a}
شش ماهگی	٨٣/٨٩٨ ± ١٥/٠٠٥^{b}	٨٧/٥٧٨ ± ١٥/٩٢٢^{a}
نه ماهگی	١٠٦/٨٨٦ ± ١٨/٣٠١^{b}	١١٦/٧٢٧ ± ٢٣/٣٤٢^{a}
یکسالگی	١٣٤/٦١٧ ± ٢٤/٨٠١^{b}	١٥٦/٢٩٢ ± ٣٧/٧٩٦^{a}

a-b: تفاوت میانگین‌ها در هر ردیف با حروف نامشابه معنی‌دار است (P<۰/۰۵).

با توجه به وزن تولد و وزن یکسالگی در دو جنس می‌توان گفت که گوساله‌های ماده و نر به‌ترتیب دارای متوسط افزایش وزن ۰/۳۰۳ و ۰/۳۵۷ کیلوگرم در هر روز را برای مدت زمان مورد مطالعه داشتند که نسبت به ۰/۲٤١ کیلوگرم افزایش وزن در گاوهای کاراکو برزیل بالاتر می‌باشد [۲۲]، اما با این‌حال وزن تولد برای گوساله‌های سیستانی نسبت به گوساله‌های کاراکو [۲۲] و براهمن [۲۱] پایین‌تر بوده و نسبت به وزن تولد گله‌های دهوفاری عمان (۱۷/۸ کیلوگرم) بالاتر می‌باشد [٤]. با وجود بالاتربودن وزن تولد گوساله‌های سیستانی نسبت به گله‌های دهوفاری، وزن یک سالگی برای گله‌های دهوفاری (۱۷۳ کیلوگرم) بیش‌تر از گوساله‌های سیستانی گزارش شده است که می‌تواند به‌دلیل بالابودن متوسط افزایش وزن روزانه این نژاد نسبت به گله‌های سیستانی در این مدت زمانی باشد.

جدول (۳) مقادیر فراسنجه‌های مدل‌های برازش‌شده برای دو جنس نر و ماده نشان می‌دهد. فراسنجه‌های مدل‌های گمپرتز، لجستیک و ریچاردز (به‌استثنای فراسنجه شاخص بلوغ) بین گوساله‌های نر و ماده تفاوت معنی‌دار داشتند (P<۰/۰۵)، اما برای مدل ویبول، تفاوت معنی‌دار بین دو جنس از لحاظ فراسنجه‌های مدل (به‌استثنای فراسنجه وزن نهایی یک‌سالگی) مشاهده نشد (P>۰/۰۵). بالاترین و پایین‌ترین مقدار فراسنجه وزن اولیه به‌ترتیب توسط مدل‌های لجستیک و ریچاردز برای گوساله‌های نر و ماده برآورد شد، اما وزن نهایی در یک‌سالگی برآوردشده توسط مدل‌های لجستیک و ریچاردز برعکس فراسنجه وزن ابتدایی بود. پایین‌ترین مقدار فراسنجه k (شاخص بلوغ) مشابه وزن ابتدایی در تابع لجستیک مشاهده شد، اما بالاترین مقدار فراسنجه k با استفاده از مدل ویبول برای هر دو جنس برآورد شد. چنانچه در جدول (۳) مشاهده می‌شود در هر دو جنس، پایین‌ترین مقدار فراسنجه k در گوساله‌های نر و ماده با بالاترین مقدار فراسنجه وزن نهایی در یک‌سالگی همراه بود.

جدول ۳. فراسنجه‌های مدل‌های مختلف برازش‌شده برای گوساله‌های نر و ماده سیستانی

جنس	مدل[1]	W_0±SE	k±SE	W_t±SE	m±SE
ماده	گمپرتز	۱۹/۵۲٤ ± ۱/۳۰۳*	۰/۱۸۹ ± ۰/۰۱۳*	۱٦٤/۵۱۲ ± ٦/٤٤۱*	–
	لجستیک	۲۳/٤۵۲ ± ۱/۱٤۷*	۰/۳۱٤ ± ۰/۰۱۵*	۱٤۷/۷۸۷ ± ۳/۸۰٦*	–
	ریچاردز	۱۷/۰۰۰ ± ۱/۲٤۲*	۰/۱۰۲ ± ۰/۰۱۳ns	۲۰۰/۰۰۰ ± ۷/۵۸٤*	−۰/٦٤۲ ± ۰/۰٦۸*
	ویبول	۲۰/۰۰۰ ± ۱/۱۸۲ns	۰/۰۷٦ ± ۰/۰۱۲ns	۲۱۰/۱٦٦ ± ۱۰/۰٦۹*	۱/۱۷۷ ± ۰/۲۰۳ns
نر	گمپرتز	۲۳/۰۳۱ ± ۱/۵۷۸	۰/۱۳٦ ± ۰/۰۱۳	۲٤٤/۵٤۳ ± ۱۰/۲۷۵	–
	لجستیک	۲٦/۵۲۹ ± ۱/۳۸۵	۰/۲٦۳ ± ۰/۰۱۵	۱۹۵/۸٦٤ ± ۹/۱٤۲	–
	ریچاردز	۱۹/۳۸۹ ± ۱/۱۸۷	۰/۱۰۹ ± ۰/۰۲۱	۲۵۰/۰۰۰ ± ۱٤/۰۵۹	−۰/۳٦۱ ± ۰/۰٦۵
	ویبول	۲۱/۲۳۱ ± ۱/۰۰۲	۰/۰۸۲ ± ۰/۰۱۷	۲۳۰/۰۰۰ ± ۷/۵۰۷	۱/۳۳۱ ± ۰/۲۱۱

۱. W_0 (گرم)، W_t (گرم)، k (کیلوگرم به‌ازای هر روز) و m به‌ترتیب وزن اولیه (وزن تولد)، وزن نهایی در یک‌سالگی، ضریب رشد نسبی یا شاخص بلوغ و فراسنجه شکل می‌باشد.

*: معنی‌داری بین جنس نر و ماده (P<۰/۰۵)، ns غیرمعنی‌دار بین جنس نر و ماده.

برخلاف سایر فراسنجه‌های مدل‌ها که در گوساله‌های ماده کم‌تر از گوساله‌های نر بود مقدار فراسنجه شکل (m) در دو مدل ریچاردز و ویبول برای گوساله‌های ماده بالاتر از گوساله‌های نر به‌دست آمد.

مشابه یافته‌های پژوهش حاضر، برآورد بالاتر برای فراسنجه k مدل لجستیک نسبت به سایر مدل‌های موردمطالعه در پژوهش بر روی منحنی رشد گاوهای کاراکو برزیل نیز گزارش شده است [۲۲]. هم‌چنین مقدار فراسنجه شاخص بلوغ با استفاده از مدل‌های مختلف در پژوهش حاضر بزرگ‌تر از مقدار آن برای گله‌های نیلور بود [۱۹]. دامنه ۰/۰۸۷− ۰/۱۲۷ برای فراسنجه شاخص بلوغ برای گله‌های دهوفاری [٤] توسط مدل‌های گمپرتز، وان برتالانفی و لجستیک در دامنه به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر است که نشان‌دهنده توانایی بالای نژادهای حاضر برای رسیدن سریع به وزن بلوغ است. مشابه پژوهش حاضر، بالاترین شاخص بلوغ و متناسب با آن پایین‌ترین وزن نهایی برای نژاد براهمن نیز با مدل لجستیک گزارش شده است [۲۱].

مشابه یافته‌های پژوهش حاضر، پیش بینی بالاتر وزن تولد نسبت به مقدار واقعی توسط مدل‌های برازش‌شده در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است [۲۲ و ۲٤]. در برخی مطالعات [۱۵] گزارش شده است که مدل‌های گمپرتز، لجستیک، و وان برتالانفی وزن در سنین مختلف را بالاتر یا پایین‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. هم‌چنین گزارش شده است که مدل برودی پیش‌بینی بهتری برای وزن بدن از ۱۸ ماهگی تا بلوغ را ارائه می‌دهد، اما وزن‌های اولیه را تا حدی بالاتر پیش‌بینی می‌کند [۵].

جدول (٤) سن و وزن در نقطه عطف محاسبه‌شده با استفاده از فراسنجه‌های مدل‌های مختلف برای گوساله-های نر و ماده را نشان می‌دهد. به‌طورکلی مقادیر سن و وزن در نقطه عطف محاسبه‌شده توسط مدل‌های مختلف برای گوساله‌های نر بالاتر از گوساله‌های ماده بود. بالاترین مقادیر سن و وزن در نقطه عطف برای هر دو جنس نر و ماده توسط مدل لجستیک به‌دست آمد، درحالی‌که پایین‌ترین مقدار فراسنجه سن و وزن در نقطه عطف برای گوساله‌های ماده و نر به‌ترتیب با استفاده از مدل‌های ریچاردز و ویبول بودند. مقادیر به‌دست‌آمده

برای سن و وزن در نقطه عطف توسط مدل‌های ریچاردز و ویبول در گوساله‌های نر و ماده نسبت به دو مدل دیگر به مقدار واقعی در دو جنس نزدیک‌تر بود و برآوردهای صحیح‌تری داشتند. با این‌حال، مدل ریچاردز مقادیر صحیح‌تری نسبت به ویبول داشت.

نرخ رشد مطلق به‌دست‌آمده توسط تمامی مدل‌ها در ماه اول و ماه سوم در مدل‌های لجستیک و گمپرتز در گوساله‌های ماده بالاتر از گوساله‌های نر بود (جدول ٤). درحالی‌که در بقیه سنین مقدار نرخ رشد مطلق در گوساله‌های نر بالاتر از ماده‌ها به‌دست آمد. نرخ رشد مطلق محاسبه‌شده توسط مدل‌های مختلف برای ماه سوم تا یک‌سالگی توسط مدل ریچاردز به مقدار واقعی آن در گوساله‌های نر و ماده نسبت به مدل‌های دیگر نزدیک‌تر و صحیح‌تر بود. بالاترین نرخ رشد مطلق برای گوساله‌های ماده در ماه سوم و برای نرها مربوط به ماه ششم بوده و بعد از این سنین روند کاهشی داشت، که نشان‌دهنده زودتر رسیدن گوساله ماده به نقطه عطف در مقایسه با گوساله‌های نر می‌باشد.

براساس مدل مناسب برای توصیف منحنی رشد برای گله‌های دهوفاری (مدل وان برتالانفی)، سن و وزن در نقطه عطف به‌ترتیب ٥ ماه و ٩٥/٤ کیلوگرم گزارش شده است [٤] که نسبت به وزن و سن در نقطه عطف با مدل ریچاردز در این پژوهش بالاتر می‌باشد. این نشان‌دهنده زودتر رسیدن به سن بلوغ در گاوهای سیستانی نسبت به گله‌های دهوفاری بوده و می‌تواند با توجه به همبستگی منفی [٦] بین شاخص بلوغ و وزن نهایی، پایین بودن وزن بدن گاوهای سیستانی در یک‌سالگی نسبت به گله‌های دهوفاری (١٧٣ کیلوگرم) را توضیح دهد. مشابه یافته‌های پژوهش حاضر، افزایش نرخ رشد مطلق تا ماه سوم در بررسی منحنی رشد گاوهای برواون سوئیس و آیرشایر و متعاقب آن روند کاهشی گزارش شده است. هم‌چنین در نژادهای گرنزی، و شورت هورن شیری روند افزایشی به‌ترتیب تا ماه ٧ و ٩ ادامه یافته و سپس روند کاهشی مشاهده شد [١٠].

معیارهای برازش نیکویی مدل‌های برازش‌شده در گوساله‌های نر و ماده در جدول (٥) آورده شده است. در گوساله‌های نر و ماده، تابع لجستیک دارای مقادیر بالای سه معیار MSE، AIC و BIC و مقدار پایین معیار R^2_{Adj} نسبت به سه مدل دیگر بوده از اینرو این مدل نسبت به مدل‌های دیگر، مدل نامناسب‌تری برای توصیف الگوی رشد در طول یکسال برای گوساله‌های نر و ماده سیستانی می‌باشد.

جدول ٤. سن (t_i) و وزن (w_i) در نقطه عطف برآورد شده و نرخ رشد مطلق (AGR) در ماه‌های ١، ٣، ٦، ٩ و ١٢ توسط مدل‌های مختلف رشد

جنس	مدل	t_i (ماه)	w_i (کیلوگرم)	AGR (١، کیلوگرم/ماه)	AGR (٣، کیلوگرم/ماه)	AGR (٦، کیلوگرم/ماه)	AGR (٩، کیلوگرم/ماه)	AGR (١٢، کیلوگرم/ماه)
ماده	گمپرتز	٤/٠٠٤	٦٠/٥٢١	٨/٧٦٢	١١/٣٧٠	١٠/٦٧٨	٨/٧١١	٥/١٠٣
	لجستیک	٥/٣١٢	٧٣/٨٩٣	٦/٣٥٠	١٠/٧٦١	١١/٣٨٩	٩/٢٨٨	٣/٧٦٨
	ریچاردز	٢/٠٩٠	٤٠/٣٧٨	١١/٠٧٣	١١/٣٠٥	٩/٩٥٢	٨/٤٠٩	٦/١٨٩
	ویبول	٢/٦٣٠	٤٦/٥٥١	١٠/٢٧٣	١٠/٩٨٦	٩/٩٥٥	٨/٣٩٠	٦/٨٢٣
نر	گمپرتز	٦/٣٢٢	٨٩/٩٦٢	٧/٩٠٧	١١/٢٩٧	١٢/٢٣٠	١١/٧٤٠	٩/٥١٥
	لجستیک	٧/٠٤٨	٩٧/٩٣٢	٥/٩١٠	١٠/٦٤٢	١٢/٧٣٤	١٢/٤٠٤	٨/٣٠٥
	ریچاردز	٤/٧٠٢	٧٢/٣٠٤	٩/٩٠٧	١٢/١٤١	١٢/١٧٣	١١/١٥٣	٨/٧٢١
	ویبول	٤/٢٨٧	٦٧/١٩٧	٩/٦٠٧	١٢/٢٧١	١٢/٢١٠	١٠/٥٧١	٨/٥١٧

مدل‌های چهار فراسنجه‌ی (ریچاردز و ویبول) نسبت به مدل‌های سه فراسنجه لجستیک و گمپرتز از لحاظ معیارهای برازش نیکویی وضعیت بهتری از لحاظ برازش داشتند. مقدار معیارهای برازش نکویی دو مدل چهار فراسنجه از لحاظ مقدار خیلی نزدیک به هم بود، اما با این حال مدل ریچاردز برای گوساله‌های نر و ماده با توجه به چهار معیار برازش نکویی نسبت به مدل ویبول به‌طور مناسب‌تری الگوی رشد را توانسته، توصیف کند. بنابراین با توجه به چهار معیار برازش نکویی می‌توان گفت که مدل ریچاردز تابع مناسبی برای توصیف الگوی رشد تا یکسالگی در گوساله‌های نر و ماده سیستانی نسبت به مدل‌های دیگر بررسی شده می‌باشد.

در پژوهش بر روی رکوردهای وزن بدن گاوهای کاراکو برزیل [۲۲] و نژاد لاگونا [۱۳]، مدل برودی و متعاقب آن مدل گمپرتز براساس دو معیار میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین تصحیح‌شده به‌عنوان مدل مناسب برای توصیف الگوی رشد در این نژادها گزارش شد. هم‌چنین مدل گمپرتز به‌عنوان تابع مناسب برای توصیف الگوی رشد در نژاد براهما معرفی شده است [۲۱]. براساس معیار نکویی برازش، مدل وان برتالانفی نسبت به سایر مدل‌های موردمطالعه توصیف مناسب‌تری از منحنی رشد در گله‌های دهوفاری عمان و سه ژنوتیپ گله‌های شیری ایرلند را نشان داد [٤ و ٦]. در بررسی الگوی رشد گاوهای آنگوس در شرایط پرورشی مرتعی، مدل ریچاردز مناسبترین مدل برای توصیف الگوی رشد این نژاد معرفی شد [۱۵]. اگرچه مدل برودی به‌خاطر محاسبه و تفسیر آسان آن و در نظرگرفتن داده‌های گم‌شده و برازش نکویی آسان در مطالعات گاوهای گوشتی استفاده می‌شود، اما این مدل وزن بلوغ را در فاز رشد خیلی بالاتر برآورد می‌کند که می‌تواند یکی از معایب این مدل باشد [١٤]. در برخی مطالعات گزارش شده است که مدل ریچاردز نسبت به مدل برودی بر روی داده‌ها بهتر برازش شده و دارای این مزیت است که نقطه عطفی را ارائه کرده که می‌تواند در هنگام ارزیابی اثرات محیطی بر رشد مفید باشد [۵].

در برازش مدل‌های مختلف بر روی رکوردهای وزن بدن نژادهای مختلف گاو، مدل سینوسی مناسب‌ترین مدل برای توصیف منحنی رشد در نژادهای براون سویس، گرنزی و شورت هورن شیری معرفی شد هم‌چنین برای نژاد آیرشایر مدل ریچاردز و نژادهای هلشتاین و جرزی، مدل مونومولکولار به‌عنوان مدل مناسب گزارش شد [۱۰].

جدول ۵. معیارهای برازش نیکویی مدل‌های برازش‌شده برای گوساله های نر و ماده

جنس	مدل	MSE[1]	AIC	BIC	R^2_{Adj}
ماده	گمپرتز	۲٦۸/۰۵۰	۵۵۸۵/۰۲۳	۵٦۰۳/۰۰٤	۸٤/٦۷
	لجستیک	۲۷۷/٤۲۳	۵٦۰۷/۷۷۸	۵٦۲۵/۷۵۹	۸٤/۱٤
	ریچاردز	۲٦۳/۱۷۰	۵۵۷۳/۸۵۷	۵۵۹٦/۳۳٤	۸٤/۹۵
	ویبول	۲٦٤/٤٤۵	۵۵۷۷/۰۵۵	۵۵۹۹/۵۳۱	۸٤/۸۸
نر	گمپرتز	٤۸۸/۰۸۷	٦۹۹۲/۹۵۳	۷۰۱۱/۵۵۹	۸۰/۹۰
	لجستیک	٤۹۷/۵۰۳	۷۰۰۷/۷٤۲	۷۰۲٦/۳٤۸	۸۰/۵۳
	ریچاردز	٤۸٦/۵۳۰	٦۹۹۱/٤۷۵	۷۰۱٤/۷۳۳	۸۰/۹٦
	ویبول	٤۸۸/۷۹۸	٦۹۹۵/۰۷٦	۷۰۱۸/۳۳۳	۸۰/۸۷

۱. MSE ریشه میانگین مربعات خطا، AIC معیار اطلاعات آکائیک، BIC معیار اطلاعات بیزین، R^2_{Adj} ضریب تبیین تصحیح‌شده.

مدل ریچاردز بهترین برازش را در میان مدل‌های غیرخطی مختلف برای توصیف منحنی رشد در ماده‌های یک نژاد گوشتی نشان داد [۱۳]. در بررسی الگوی رشد گله‌های براکماس مالزی گزارش شد که مدل گمپرتز مدل مناسب برای توصیف منحنی رشد و الگوی رشد گله‌های براکماس مالزی است [۱۷]. چنان‌چه دیده می‌شود مدل‌های مختلفی در پژوهش‌های گوناگون به‌عنوان مدل مناسب برای الگوی رشد حیوانات گزارش شده است دلیل تفاوت بین مطالعات می‌تواند تا اندازه‌ای مرتبط با تفاوت نرخ بلوغ نژادهای موردمطالعه و اثر مدیریت تغذیه‌ای که مؤثر در شکل منحنی رشد باشد.

همبستگی بین فراسنجه‌های مدل‌های برازش در گوساله-های نر و ماده در جدول (٦) آورده شده است. همه همبستگی‌های بین فراسنجه‌های مدل‌ها در مدل‌های مختلف بالاتر از ۰/٦ بوده و برخی از همبستگی‌ها منفی و برخی مثبت بودند. در مدل‌های لجستیک و گمپرتز همبستگی بین فراسنجه وزن ابتدایی با وزن نهایی در هر دو جنس مثبت، اما همبستگی بین شاخص بلوغ با وزن ابتدایی و وزن نهایی منفی بود. در مدل‌های چهار فراسنجه برخلاف مدل‌های سه فراسنجه‌ی همبستگی بین فراسنجه وزن ابتدایی با وزن نهایی و شاخص بلوغ به‌ترتیب منفی و مثبت برآورد شد. همبستگی بین وزن نهایی در یک‌سالگی و فراسنجه‌های m و k منفی و بالاتر از ۰/۹۵ بود و همبستگی بین دو فراسنجه m و k مثبت به‌دست آمد. همبستگی مثبت بین فراسنجه وزن ابتدایی و شاخص بلوغ نشان‌دهنده این است که گوساله‌هایی با وزن ابتدایی پایین دارای شاخص بلوغ پایینی بوده و شاخص بلوغ پایین نشان‌دهنده زود به بلوغ رسیدن حیوان می‌باشد اگر حیوان زود به بلوغ برسد فرصت کافی برای به‌دست‌آوردن وزن نهایی نخواهد داشت و دارای وزن نهایی پایین‌تری خواهد بود که خود دلیلی بر همبستگی منفی وزن ابتدایی و نهایی می‌باشد. در جدول (۳) مشاهده شد که مقدار پایین‌تر فراسنجه k با مقدار بالاتری از وزن نهایی همراه بود و در جدول (٦) همبستگی بین این دو فراسنجه بالا و منفی به‌دست آمده است که نشان‌دهنده این است که حیوانات با شاخص بلوغ کم‌تر دیرتر به بلوغ رسیده و وزن نهایی بالایی خواهند داشت.

مشابه یافته‌های پژوهش حاضر، همبستگی منفی بین فراسنجه وزن نهایی و شاخص بلوغ در سایر گزارش‌ها نیز مشاهده شده است [۱۷، ۱۸، ۲۲]، که نشان می‌دهد حیواناتی که نرخ رشد بالایی دارند دارای وزن بلوغ و نهایی کم‌تری در مقایسه با حیواناتی هستند که نرخ رشد پایین دارند. فراسنجه k نرخ رشد حیوان تا رسیدن به وزن بدن نهایی را نشان می‌دهد. حیوانات با برآورد بالای k نسبت به حیوانات با k پایین‌تر، زودتر به وزن بلوغ خواهند رسید [۱۸].

جدول ٦. همبستگی بین فراسنجه‌های مدل برای گوساله‌های نر و ماده

جنس	مدل	r_{W0-Wf}	r_{W0-k}	r_{W0-m}	r_{Wf-k}	r_{Wf-m}	r_{k-m}
ماده	گمپرتز	۰/٦٦	−۰/۸۲	–	−۰/۹۵	–	–
	لجستیک	۰/٦۰	−۰/۸٦	–	−۰/۸۷	–	–
	ریچاردز	−۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۸۷	−۰/۹۹	−۰/۹۵	۰/۹۸
	ویبول	−۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۹۲	−۰/۹۹	−۰/۹٦	۰/۹٦
نر	گمپرتز	۰/۷۱	−۰/۸۲	–	−۰/۹۸	–	–
	لجستیک	۰/٦٦	−۰/۸۷	–	−۰/۹۲	–	–
	ریچاردز	−۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۸۵	−۰/۹۹	−۰/۹٦	۰/۹۹
	ویبول	−۰/۷۵	۰/۷٤	۰/۸۸	−۰/۹۹	−۰/۹۵	۰/۹۵

در مجموع، بر اساس چهار معیار برازش نکویی، مدل ریچاردز نسبت به سه مدل دیگر برازش مناسب‌تری بر روی داده‌های وزن بدن گوساله‌های سیستانی داشت. تفاوت معنی‌دار بین فراسنجه‌های مدل‌ها بین گوساله‌های نر و ماده مشاهده شد که بسیاری از آن‌ها دارای تفاوت معنی‌داری بودند. گوساله‌ها ماده نسبت به گوساله‌های نر زودتر به نقطه عطف رسیده و دارای وزن در نقطه عطف پایین‌تری بودند. نرخ رشد مطلق در سنین مختلف برای گوساله‌های ماده پایین‌تر از ماده‌ها بوده و روند افزایشی و سپس کاهشی را نشان دادند. همبستگی بین فراسنجه‌های مدل‌ها در مناسب‌ترین مدل (مدل ریچاردز) بالاتر و بین برخی فراسنجه‌ها مثبت و برخی دیگر منفی به‌دست آمد. نتایج مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقدار واقعی وزن بدن در سنین مختلف توسط مدل‌های مختلف در دو جنس نشان داد که مدل ریچاردز در هر دو جنس با صحت بالایی مقادیر وزن بدن را پیش‌بینی می‌کند. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در طراحی راهبردهای مدیریتی و ارتقای عملکرد گله بر مبنای منحنی رشد آنها کمک کند.

تشکر و قدر دانی

از همکاری و مساعدت مرکز تحقیقات گاو سیستانی زهک جهت در اختیار قراردادن داده‌ها، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع مورد استفاده

1. Aggrey SE, Ankra-Badu GA and Marks HL (2003) Effect of long-term divergent selection on growth characteristics in Japanese quail. Poultry Science, 82: 538-542.
2. Alonso J, Díez J, Luaces O and Bahamonde A (2018) A new method to learn growth curves of beef cattle using a factorization approach. Computers and Electronics in Agriculture, 151: 77-83.
3. Arango JA and Van Vleck LD (2002) Size of beef cows: Early ideas, new developments. Genetic Molecular Research, 1: 51-63.
4. Bahashwan S, Alrawas AS, Alfadli S and Johnson ES (2015) Dhofari cattle growth curve prediction by different non-linear model functions. Livestock Research for Rural Development, 27: 236.
5. Beltran JJ, Buttts WT, Olson TA and Koger M (1992) Growth patterns of two lines of Angus cattle selected using predicted growth parameters. Journal of Animal Science, 70: 734-741.
6. Berry DP, Horan B and Dillon P (2005) Comparison of growth curves of three strains of female dairy cattle. Animal Science, 80: 151–160.
7. Birjandi M and Torkaman- Zehi A (2008) Study of milk production capability and milk characteristics of Sistani cow in Sistan region. The first national conference of Sistani cattle research, University of Zabol. 202-208. (In Persian)
8. Costa RB, Misztal I, Elzo MA, Bertrand JK, Silva LOC and Lukaszewicz LOC (2011) Estimation of genetic parameters for mature weight in Angus cattle. Journal Animal Science, 89: 2680- 2686.
9. Darmani Kuhi H, Porter T, López S, Kebreab E, Strathe AB, Dumas A, Dijkstra J and France J (2010) A review of mathematical functions for the analysis of growth in poultry. World's Poultry Science Journal, 66: 227-240.
10. Darmani Kuhi HD, Hossein-Zadeh NG, López S, Falahi S and France J (2018) Sinusoidal function to describe the growth curve of dairy heifers. Animal Production Science, 59(6): 1039-1047.
11. Dogan N, Emer K, Mehmet Z and Tulin A (2010) Comparison of non-linear growth functions to describe the growth in Japanese quails. Journal of Animal Veterinary Advances, 9: 1961-1966.
12. Engelken TJ (2008) Developing replacement beef heifers. Theriogenology, 70: 569-572.
13. Gano G, Blanco M, Casasús I, Cortés-Lacruz X and Villalba D (2016) Comparison of B-splines and non-linear functions to describe growth patterns and predict mature weight of female beef cattle. Animal Production Science, 56: 1787-1796.
14. Gbangboche AB, Alkoiret TI, Toukourou Y, Kagbo A and Mensah GA (2011) Growth curves for different body traits of Lagune cattle. Journal of Animal Science, 5(2): 1724.
15. Goldberg V and Ravagnolo O (2015) Description of the growth curve for Angus pasture-fed cows under extensive systems. Journal of Animal Science, 93(9): 4285-4290.
16. Gwaza DP, Bridgwater FE and Williams CG (2002) Genetic analysis of growth curves for a woody perennial species. Pinus taeda, 105: 526-531.
17. Hafiz AWM, Mohamad Hifzan R, Izuan Bahtiar AJ and Ariff OM (2015) Describing growth pattern of Brakmas cows using non-linear regression models. Malaysian Journal of Animal Science, 18: 37-45.

18. Lopes FB, Silva MC, Marques EG and Ferreria JL (2011) Ajuste de curvas de crescimento em bovinos Nelore da região Norte do Brasil. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, 12(3): 607-617.
19. Marinho KNS, Freitas AR, Falcão AJS and Dias FEF (2013) Nonlinear models for fitting growth curves of Nellore cows reared in the Amazon Biome. Revista Brasileira de Zootecnia, 42: 645-650.
20. Menchaca MA, Chase CC, Olson TA and Hammond AC (1996) Evaluation of growth curves of Brahman cattle of various frame sizes. Journal of Animal Science, 74: 2140-2151.
21. Miguel JA, Melendez SJ, Asenjo B, Bonilla LM and Ciria J (2012) Growth modeling of castrated Brahman males raised in tropical conditions and born in different seasons. Ciencia e Investigación Agraria, Santiago, 39(2): 279-288.
22. Moreira RP, Mercadante MEZ, Pedrosa VB, Cyrillo JNDSG and Henrique W (2016) Growth curves on females of the Caracu breed. Semina: Ciências Agrárias, 37(4Supl1): 2749-2758.
23. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, Heisterkamp S and Van Willigen B (2016) R Core Team. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-128. Available at http://CRAN.R-project.org/package=nlme/ (accessed 15 May 2021).
24. Silva FL, Alencar MM, Freitas AR, Packer IU and Mourão GB (2011) Growth curves in beef cows of different biological types. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 46: 262-271.
25. Venot E, Piles M, Renand G and Jaffrézic F (2004) Genetic analysis of growth curve parameters for beef cattle using Markov chain Monte Carlo estimation methods. 55th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Bled, Slovenia. 1-8.