



# مقایسه برازش برخی از مدل‌های ریاضی به منظور توصیف کینتیک تخمیر شکمبه‌ای بر اساس آزمون تولید گاز برای علوفه یونجه

خلیل زابلی\*

استادیار گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بو علی سینا همدان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۱۷ - تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۸)

### چکیده

در این تحقیق از مدل‌های ریاضی برای بررسی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه استفاده شد. این مدل‌ها شامل مدل نمایی (EXP)، میکائیلیس-منتن (MIC)، میچرلینگ (MIT)، ویبول (WEB)، کورکمز-اوکاردس (KOR) و فرانس (FRC) بودند. آزمون تولید گاز در ۴ دوره جداگانه انجام شد. تعداد ۳ عدد سرنگ (۳ تکرار) حاوی نمونه خوراک برای هر دوره در نظر گرفته شد و حجم گاز تولید شده در هر دوره در زمان‌های مختلف آنکوباسیون (۱۴۴ ساعت) به وسیله این مدل‌ها برازش شد. از آماره‌های میانگین مربعات خطا (MSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین درصد خطا (MPE) برای نکویی برازش مدل‌ها استفاده شد. از آزمون‌های دوربین-واتسون، شاپیرو-ویلک، معیار اطلاعات بیزی (BIC)، معیار اطلاعات آکائیک (AIC) و فاکتور صحت (AF) برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار MSE در مدل‌های FRC (۰/۸۵۲) و MIC (۰/۹۱۷) نسبت به مدل EXP (۷/۴۳۷) کمتر بود ( $P < 0/05$ )، اما مقدار  $R^2$  در مدل‌های FRC و MIC (به ترتیب ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۷) در مقایسه با مدل EXP (۰/۹۷۳) بیشتر بود ( $P < 0/05$ ). آزمون شاپیرو-ویلک نشان داد به غیر از مدل EXP، مقدار خطا در همه مدل‌ها دارای توزیع نرمال بود. مقادیر کمتر BIC، AIC و AF در مدل FRC (به ترتیب -۶/۴۷، -۶/۱۸ و ۲/۲۰) و در مدل MIC (به ترتیب -۴/۳۲، -۳/۹۸ و ۲/۴۰) نشان داد که این مدل‌ها دارای نکویی برازش بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها بودند. به طور کلی مدل‌های FRC و MIC کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه را با دقت بیشتری برآورد کردند. لذا می‌توان برای توصیف پروفیل تولید گاز از مدل‌های فوق به جای مدل EXP استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آزمون تولید گاز، مدل‌های ریاضی، نکویی برازش، یونجه

## مقدمه

پیش‌بینی تولید گاز استفاده می‌شود. مدل فرانس<sup>۲</sup> (FRC) است. مدل دارای ساختار زیگموییدی بوده و انعطاف-پذیری زیادی در برازش داده‌های تولید گاز دارد. فرض مدل FRC بر آن است که سرعت تولید گاز مستقیماً با سرعت تجزیه خوراک ارتباط داشته و این وضعیت به مدت زمان تخمیر و زمان اتصال باکتری‌ها به اجزای خوراک وابسته است (France et al., 1993).

علاوه بر این، مدل‌هایی هم وجود دارند که به وسیله سایر محققین برای این منظور ارائه شده‌اند که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Tedeschi et al., 2008). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل میکائیلیس-منتن<sup>۳</sup> (MIC)، میچرلینگ<sup>۴</sup> (MIT)، ویبول<sup>۵</sup> (WEB) و کورکمز-اوکاردس<sup>۶</sup> (KOR) اشاره نمود. مدل MIC در ابتدا به منظور بررسی کینتیک آنزیمی ارائه شده بود. این مدل به منظور توصیف کینتیک تولید گاز در شکمبه پیشنهاد داده شد و بعدها مورد استفاده قرار گرفت (France et al., 1993). همچنین، مدل MIT که قبلاً در بیشتر مطالعات مربوط به رشد گیاه و تغذیه از آن استفاده شده است، جهت پیش‌بینی تولید گاز و تخمیر شکمبه مورد استفاده قرار گرفت (Uckardes, 2013; France et al., 2000). بر اساس نظر محققین، مدل‌های MIC و MIT به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد، توانایی ارائه هر دو ساختار زیگموییدی و غیر زیگموییدی را دارند (France et al., 2000). مدل WEB که در گذشته، در توصیف توابع رشد استفاده شده بود، جهت بررسی کینتیک تخمیر شکمبه مورد استفاده قرار گرفت (Huhtanen et al., 2008; Uckardes and Efe, 2014). همچنین، مدل KOR با یک ساختار لگاریتمی، جهت پیش‌بینی روند تجزیه‌پذیری علوفه یونجه در شکمبه ارائه شد (Korkmaz and Uckardes, 2014).

با توجه به اینکه مقایسه جامعی بین مدل‌های فوق از نظر قابلیت پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه در آزمون تولید گاز صورت نگرفته است و از آنجا که در بیشتر آزمایش‌های ارزشیابی مواد خوراکی، از علوفه یونجه به‌عنوان یک خوراک

آزمون تولید گاز، اطلاعات با ارزشی در مورد کینتیک هضم خوراک در شکمبه ارائه می‌دهد (Theodorou et al., 1994; Menke et al., 1979). در این روش مقدار مشخصی از خوراک در مایع شکمبه انکوباسیون شده و حجم گاز تولید شده در فواصل زمانی معین و متوالی که نشان‌دهنده سرعت هضم خوراک است، اندازه‌گیری می‌شود. توصیف داده‌های حاصل از آزمایش فوق عمدتاً از راه برازش آنها به وسیله تعدادی از مدل‌های غیرخطی صورت می‌گیرد (France et al., 2000; France et al., 1993). بنابراین، کارایی و قابلیت پیش‌بینی این مدل‌ها می‌تواند در انتخاب مدل ایده‌آل بسیار تأثیر گذار باشد. برخی از این تفاوت‌ها ممکن است مربوط به شرایط آزمایش و نوع خوراک باشد. اما برخی دیگر به توانایی مدل و انعطاف‌پذیری آن در پیش‌بینی و توصیف نتایج مربوط می‌شود (Peripolli et al., 2014).

از آنجا که منحنی تولید گاز ساختار غیرخطی دارد، مدل‌هایی که برای توصیف آن بکار می‌روند، باید چنین ساختاری داشته باشند (Uckardes et al., 2013). برخی از این مدل‌ها، ساختار زیگموییدی دارند که علت استفاده از این ساختار، وجود فعالیت میکروبی در شکمبه بیان شده است (Uckardes et al., 2013). اما برخی دیگر از این مدل‌ها، ساختار غیرزیگموییدی دارند. لذا امروزه برای برآورد بهتر نتایج آزمون تولید گاز، انواع مدل‌های با ساختار زیگموییدی و غیرزیگموییدی به کار برده شده است و در این رابطه، فرمول‌های متعدد ارائه شده است (Sahin et al., 2011; France et al., 2005).

در بیشتر مطالعات مربوط به کینتیک تخمیر شکمبه در آزمون تولید گاز از معادله نمایی<sup>۱</sup> (EXP) به‌صورت  $y=A.(1-e^{-ct})$  استفاده می‌شود (Orskov and McDonald, 1979). مدل EXP ساختار غیر زیگموییدی دارد و یکی از شناخته‌ترین مدل‌ها در پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه است. فرض این مدل بر آن است که سرعت تولید گاز در شکمبه فقط به در دسترس بودن خوراک بستگی دارد (Wang et al., 2011). یکی دیگر از مدل‌هایی که برای

2. France  
3. Michaelis-Menten  
4. Mitscherlich  
5. Weibull  
6. Korkmaz-Uckardes

1. Exponential

مجاورت آب گرم (۳۹ درجه سانتیگراد) در داخل فلاسک به آزمایشگاه منتقل شد (He et al., 2016).

بافر شامل ۴۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۰/۱ میلی‌لیتر محلول میکرو (۱۳/۲) گرم  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، ۱۰ گرم  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ، ۱ گرم  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، ۸ گرم  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر)، ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول بافر بی‌کربنات (۳۵) گرم  $\text{NaHCO}_3$  و ۴ گرم  $(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$  در یک لیتر آب مقطر)، ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول ماکرو (۵/۷) گرم  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ، ۶/۲ گرم  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  و ۰/۶ گرم  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  در یک لیتر آب مقطر)، ۱ میلی‌لیتر محلول رزاورین (۱۰۰ میلی‌گرم رزاورین در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) و ۴۰ میلی‌لیتر محلول احیاءکننده (۴) میلی‌لیتر  $\text{NaOH}$  یک نرمال و ۶۲۵ میلی‌گرم  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  که به ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد) بود (Menke and Steingass, 1988). مایع شکمبه از راه پارچه متقال چهار لایه صاف شد و سپس به نسبت ۲:۱ با محلول بافر آماده شده در مجاورت گاز دی‌اکسید کربن مخلوط شد و به عنوان مایع شکمبه بافری شده جهت استفاده بعدی در داخل حمام بن‌ماری در دمای ۳۹ درجه سانتیگراد و تحت شرایط بی‌هواری نگهداری شد.

آزمون تولید گاز در ۴ دوره ۱۴۴ ساعته (۴ اجرا) و بطور جداگانه انجام گرفت. برای این منظور، ۲۸ روز (۴ دوره ۷ روزه) متوالی در نظر گرفته شد. در هر دوره، ۱ روز برای آماده‌سازی سرنگ‌ها و ۶ روز (۱۴۴ ساعت) هم برای دوره اصلی آزمایش (ثبت داده‌ها) اختصاص یافت.

در هر دوره ۱۴۴ ساعته (هر اجرا)، تعداد ۳ عدد سرنگ حاوی نمونه خوراک در نظر گرفته شد و به هر کدام از این سرنگ‌ها (۳ تکرار)، مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم یونجه (خشک شده در آن ۶۵ درجه سانتیگراد) به همراه ۳۰ میلی‌لیتر مایع شکمبه بافری شده اضافه گردید. سرنگ‌ها از جنس شیشه و دارای حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر بودند. همچنین، به منظور تصحیح اثرات مایع شکمبه، تعداد ۲ عدد سرنگ به عنوان بلانک (سرنگ‌های حاوی مایع شکمبه بافری شده و فاقد نمونه خوراک) نیز در هر دوره در نظر گرفته شد (He et al., 2016).

استاندارد و با اهمیت در تغذیه نشخوارکنندگان استفاده می‌شود، لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا دقت هر کدام از مدل‌های فوق از نظر نکوبی برازش و برخی آزمون‌های مرتبط از قبیل آزمون دوربین-واتسون<sup>۱</sup>، شاپیرو-ویلک<sup>۲</sup>، معیار اطلاعات بیزی<sup>۳</sup>، معیار اطلاعات آکائیک<sup>۴</sup>، فاکتور صحت<sup>۵</sup> و تست اجرا<sup>۶</sup> روی علوفه یونجه مورد مقایسه قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

نمونه خوراک و نحوه آماده‌سازی آن: در این آزمایش از علوفه یونجه (*Medicago sativa*) خشک استفاده شد. علوفه ابتدا با استفاده از آسیاب مجهز به الک ۲ میلی‌متری آسیاب شد و از علوفه آسیاب شده برای تجزیه شیمیایی و انجام آزمون تولید گاز استفاده شد (Tedeschi et al., 2008). درصد ماده خشک و ترکیب شیمیایی علوفه (درصد ماده آلی، پروتئین خام، چربی خام، NDF، ADF و NFC) با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین شدند (AOAC, 1995; Vansoest et al., 1991). ترکیب شیمیایی علوفه یونجه در جدول ۱ ارائه شده است.

حیوانات و نحوه آماده‌سازی مایع شکمبه: برای گرفتن مایع شکمبه از تعداد ۳ رأس گوسفند نر و بالغ نژاد مهربان (با میانگین وزن زنده ۶۰ کیلوگرم) مجهز به فیستولای شکمبه-ای استفاده شد. گوسفندان به‌طور روزانه در دو وعده غذایی صبح و عصر با استفاده از علوفه یونجه (۶۰ درصد) و کنسانتره (۴۰ درصد) مطابق پیشنهاد (NRC 2007) تغذیه شدند. این حیوانات از ۱۰ روز قبل به جیره مورد نظر عادت-دهی شدند و در طول این مدت به آب آشامیدنی سالم، نمک و بلوک مواد معدنی دسترسی آزاد داشتند. دو ساعت بعد از تغذیه صبحگاهی، مایع شکمبه از گوسفندان در یک نوبت گرفته شد. سپس مایع شکمبه مربوط به هر ۳ رأس گوسفند روی هم ریخته شد و بلافاصله در شرایط بی‌هواری و در

1. Durbin-Watson
2. Shapiro-Wilk
3. Bayesian Information Criterion (BIC)
4. Akaike's Information Criterion (AIC)
5. Accuracy Factor
6. Run test

رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ محاسبه شدند (Korkmaz and Uckades, 2014):

$$RSS = \sum (y_i - \hat{y})^2 \quad \text{رابطه ۱:}$$

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

$$R^2 = 1 - \frac{MSE}{S_y^2} \quad \text{رابطه ۳:}$$

در رابطه‌های ۱، ۲ و ۳،  $y_i$  مقدار مشاهده شده (حجم گاز تولید شده در هر زمان)،  $\hat{y}$  مقدار پیش‌بینی شده (حجم گاز پیش‌بینی شده در زمان مربوطه)، RSS مجموع مربعات باقیمانده، n تعداد داده‌ها (تعداد نقاط زمانی اندازه‌گیری شده)، p تعداد پارامتر موجود در هر مدل و  $S_y^2$  به‌عنوان واریانس کل در مقادیر مشاهده شده هستند.

مقادیر RMAD و MPE نیز براساس رابطه‌های ۴ و ۵ به صورت زیر محاسبه شدند (Peripolli et al., 2014):

$$RMAD = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$MPE = \frac{1}{n} \sum \frac{(y_i - \hat{y}_i).100}{y_i} \quad \text{رابطه ۵:}$$

برای بررسی قابلیت مدل‌ها در برازش داده‌ها از برخی از آزمون‌های رایج استفاده شد. برای این منظور از آزمون دوربین-واتسون (Draper and Smith, 1981)، شاپرو-ویلک (West, 1999) و تست اجرا (Wang et al., 2011) استفاده شد.

در هر دوره، همه سرنگ‌های آماده شده (۳ عدد سرنگ حاوی نمونه خوراک و ۲ عدد سرنگ بلانک) به داخل حمام بن‌ماری با دمای ۳۹ درجه سانتیگراد منتقل شدند و حجم گاز تولید شده (بر حسب میلی‌لیتر) در ساعات صفر، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۳۲، ۳۶، ۴۰، ۴۸، ۶۱، ۷۲، ۸۰، ۹۶، ۱۲۰ و ۱۴۴ انکوباسیون یادداشت شد.

مقایسه مدل‌ها: در این مطالعه از ۶ مدل برای پیش‌بینی حجم گاز تولید شده در زمان‌های مختلف انکوباسیون استفاده شد. معادله مدل‌های مورد نظر در جدول ۲ ارائه شده است. برای این منظور از تعداد ۱۲ سری داده به‌دست آمده از آزمایش (۴ دوره جداگانه با ۳ تکرار در هر دوره) برای برازش داده‌ها استفاده شد. داده‌های به‌دست آمده (حجم گاز تولید شده در زمان‌های معین) با استفاده از رویه NLIN برنامه SAS (1999) به مدل‌های مورد نظر برازش شدند و نتایج به صورت میلی‌لیتر گاز تولید شده به ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک انکوباسیون شده بیان شد.

برای نكویی برازش مدل‌ها از مقادیر میانگین مربعات خطا (Mean Square Error = MSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، انحراف مطلق میانگین باقیمانده (Residual Mean Absolute Deviation = RMAD) و میانگین درصد خطا (Percentage Error = MPE) به‌دست آمده از هر مدل استفاده شدند. مقادیر MSE و  $R^2$  در هر مدل با استفاده از

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی (برحسب درصد ماده خشک) علوفه یونجه مورد آزمایش

Table 1. Chemical composition (based on DM %) of alfalfa hay used in the study

	DM	OM	CP	EE	NDF	ADF	NFC
Alfalfa	92.96	90.40	14.50	1.92	48.31	36.62	25.68

Dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein (CP), ether extract (EE), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and non-fiber carbohydrate (NFC).

جدول ۲- توصیف مدل‌های ریاضی غیرخطی استفاده شده در این مطالعه

Table 2. Description of candidate nonlinear mathematical models used in the study

Model	Equation <sup>1</sup>	Shape parameters	Domain
Exponential	$y = A.(1 - e^{-ct})$	-	$t \geq 0$
Michaelis-Menten	$y = \frac{A.t^b}{t^b + k^b}$	b	$t \geq 0$
Mitscherling	$y = A.(1 - b.e^{-ct})$	b	$t \geq 0$
Weibull	$y = A.(1 - e^{-ct})^b$	b	$t \geq 0$
Korkmaz-Uckardes	$y = A - b.ln(e^{-ct} + 1)$	b	$t \geq 0$
France	$y = A.(1 - e^{-c(t-L)-b(\sqrt{t}-\sqrt{L})})$	b	$t \geq L$

<sup>1</sup>y: volume of gas at time t, A: asymptotic gas volume, c: rate parameter, L: lag parameter, k: the time at A/2 and e: Napier's constant (2.7182818284...)

بیشتر از سایر مدل‌ها بود ( $P < 0.05$ ). در سایر مدل‌ها مقدار این پارامتر کمتر برآورد شد (بین ۶۱/۵۱۲ تا ۶۳/۶۶۳ میلی-لیتر) و تفاوت معنی‌داری بین این مدل‌ها مشاهده نشد. سرعت تولید گاز (c) در مدل FRC (۰/۰۱۱ درصد در ساعت) به طور معنی‌داری کمتر از سایر مدل‌ها بود ( $P < 0.05$ ) و بیشترین مقدار نیز به وسیله مدل EXP برآورد شد (۰/۱۰۵ درصد در ساعت).

گزارش شده است که اثر پارامتر b در مدل FRC از راه تصحیح شکل منحنی تولید گاز، باعث انعطاف‌پذیری مدل فوق در مقایسه با مدل EXP می‌شود و بر همین اساس مدل FRC دقت زیادی در این خصوص دارد (Huhtanen *et al.*, 2008). به هر حال، مدل‌های با تعداد پارامتر کمتر راحت‌تر حل و برازش می‌شوند زیرا با افزایش تعداد پارامترها، همبستگی بین آنها در مدل ممکن است افزایش یابد و لذا مدل سخت‌تر برازش شود (Ukardes and Efe, 2014). همانطور که از مدل MIT مشخص است (جدول ۲)، اگر در مدل فوق، مقدار  $b=1$  باشد، مدل MIT به مدل EXP تبدیل می‌شود و مشابه مدل EXP یک ساختار غیر زیگموئیدی پیدا می‌کند. در صورتی که  $b > 1$  باشد، نیز مدل فوق ساختار غیر زیگموئیدی پیدا می‌کند، اما اگر مقدار  $b > 1$  باشد، ساختار آن زیگموئیدی خواهد شد (France *et al.*, 2000). تفاوت دو ساختار غیر زیگموئیدی و زیگموئیدی در این است که در مدل غیر زیگموئیدی، سرعت تولید گاز در ابتدا به سرعت کاهش یافته و سپس در ادامه به آرامی کاهش می‌یابد.

همچنین، آماره معیار اطلاعات بی‌زی (Bayesian Information Criterion = BIC) و آماره معیار اطلاعات آکائیک (Akaike's Information Criterion = AIC) محاسبه شد (Wang *et al.*, 2011; Uckardes and Efe, 2014). برای محاسبه آماره فاکتور صحت (Accuracy Factor = AF) نیز از رابطه ۶ استفاده شد (Uckardes and Efe, 2014):

$$AF = \exp. \sqrt{\frac{RSS}{n}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه ۶، exp عدد نپر (۲/۷۱۸۲۸...)، RSS مجموع مربعات باقیمانده و n تعداد داده‌ها (تعداد نقاط زمانی اندازه‌گیری شده) بود.

تجزیه آماری داده‌ها: برای مقایسه فراسنجه‌های مدل‌های مورد مطالعه (شامل پارامترهای A و c) و آماره‌های مربوط به نکویی برازش ( $R^2$ , MSE, RMAD و MPE) از رویه GLM برنامه SAS (1999) استفاده شد. مدل آماری استفاده شده به صورت  $Y_{ij} = \mu + M_i + R_j + e_{ij}$  بود که در آن متغیر وابسته،  $\mu$  میانگین،  $M_i$  اثر مدل،  $R_j$  اثر اجرا و  $e_{ij}$  خطای باقیمانده بود. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون توکی و در سطح خطای ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

نتایج مربوط به پارامترهای پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌ها در جدول شماره ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پتانسیل تولید گاز (A) در مدل‌های MIC و FRC به ترتیب ۶۸/۸۸۷ و ۶۸/۲۰۴ میلی‌لیتر به ازای ۲۰۰ میلی-گرم ماده خشک یونجه پیش‌بینی شد که به طور معنی‌داری

جدول ۳- مقایسه مدل‌ها بر اساس پارامترهای برآورد شده آنها

Table 3. Comparisons of the models for their parameter estimates

Parameter estimates <sup>2</sup>	Model <sup>1</sup>						P-value
	EXP	MIC	MIT	WEB	KOR	FRC	
A	61.512 <sup>c</sup>	68.887 <sup>a</sup>	62.684 <sup>c</sup>	63.663 <sup>bc</sup>	62.317 <sup>c</sup>	68.204 <sup>ab</sup>	0.0005
c	0.105 <sup>a</sup>	-	0.085 <sup>ab</sup>	0.064 <sup>b</sup>	0.101 <sup>ab</sup>	0.011 <sup>c</sup>	<.0001
b	-	1.016	0.875	0.628	77.079	0.311	-
Lag	-	-	-	-	-	0.374	-

<sup>1</sup> EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France.

<sup>2</sup> A: asymptotic gas volume (ml/200mg DM), c: rate parameter (ml.h<sup>-1</sup>), b: shape parameter, Lag: lag time (h).

Means within rows followed by different superscripts are statistically different by Turkey's test.

کینتیک تولید گاز بهتر از سایر مدل‌ها عمل می‌کند که علت آن بهتر بودن پارامترهای نکویی برازش بیان شده است (Wang *et al.*, 2011).

در تحقیقی که روی مواد خوراکی مختلف انجام گرفت، مدل MIC بالاترین مقدار A را بین ۲۱ مدل مطالعه شده داشت (Huhtanen *et al.*, 2008). همچنین، در مطالعه روی سه نوع شبدر، مقدار c در مدل WEB (۰/۵۶ تا ۰/۶۹ درصد در ساعت) کمتر از مدل MIT (۰/۴۶ تا ۰/۵۷ درصد در ساعت) به دست آمد که مشابه نتایج حاضر بود (Uckardes and Efe, 2014). در مطالعه‌ای جهت پیش‌بینی کینتیک تخمیر شکمبه‌ای علوفه یونجه، با استفاده از مدل EXP، مقدار A و c در طول ۹۶ ساعت انکوباسیون به ترتیب ۶۶/۹۵ میلی‌لیتر به ازای ۲۰۰ میلی گرم ماده خشک و ۰/۶۵ درصد در ساعت به دست آمد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی داشت (Sahin *et al.*, 2011). نمودار مربوط به سرعت لحظه‌ای تولید گاز (c) در هر یک از زمان‌های انکوباسیون در شکل ۱ ارائه شده است.

مشق اول معادله هر مدل، سرعت لحظه‌ای تولید گاز را در طول زمان انکوباسیون ارائه می‌دهد (Uckardes *et al.*, 2013). سرعت تولید گاز می‌تواند افزایش و یا کاهش یابد. افزایش در سرعت تولید گاز در طول زمان ممکن است به دلیل افزایش سوبسترای در دسترس، اتصال میکروب‌ها به ذرات خوراک و یا افزایش تعداد جمعیت میکروب‌ها باشد (Huhtanen *et al.*, 2008). بیان شده است که با افزایش مدت زمان تخمیر، فاکتورهای متعددی (مانند ساخته شدن محصولات نهایی تخمیر و کاهش فاکتورهای رشد در دسترس) سبب کاهش سرعت تولید گاز می‌شود (France *et al.*, 2000). در مدل‌های غیر زیگموئیدی، سرعت تولید گاز در طول زمان انکوباسیون به مرور کاهش می‌یابد، اما در مدل‌های زیگموئیدی سرعت تولید گاز ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک سطح حداکثری، به مرور کاهش می‌یابد (France *et al.*, 2000).

اگر در یک مدل سرعت تجزیه‌پذیری در ابتدا افزایش و سپس کاهش یابد، منعکس‌کننده این واقعیت است که ابتدا جمعیت میکروب‌ها و در دسترس بودن سوبسترا و اتصال باکتری‌ها در شروع انکوباسیون افزایش یافته و سپس با

اما در ساختار زیگموئیدی، سرعت تولید گاز در ابتدا به سرعت افزایش یافته و سپس به یک مقدار حداکثری رسیده و در ادامه به‌مرور کاهش می‌یابد. در مدل MIC نیز تغییر مقدار b، ساختار مدل را تغییر می‌دهد و بر این اساس، اگر در مدل فوق، مقدار b به ترتیب  $b > 1$  و  $b < 1$  باشد، ساختار مدل به صورت زیگموئیدی و غیر زیگموئیدی خواهد شد (France *et al.*, 2000). در مدل WEB نیز پارامتر b الگوی منحنی تولید گاز و نیز سرعت تولید گاز را در طول زمان تغییر می‌دهد. در مدل WEB اگر  $b=1$  باشد، مدل فوق به مدل EXP تبدیل می‌شود. اما اگر مقدار b به ترتیب  $b > 1$  و  $b < 1$  باشد، ساختار مدل WEB به ترتیب زیگموئیدی و غیر زیگموئیدی خواهد شد. همچنین در صورتی که در مدل WEB،  $b = -1$  باشد، مدل فوق به مدل لجستیک<sup>۱</sup> تبدیل می‌شود (Huhtanen *et al.*, 2008). به‌طور کلی وجود پارامتر b در مدل WEB سبب افزایش انعطاف‌پذیری این مدل می‌شود و بیان شده است که اثر این پارامتر مشابه پارامتر b در مدل FRC است. اثر پارامتر b ممکن است به اتصال میکروب‌ها به اجزای خوراک، رشد میکروبی و یا تغییرات شیمیایی و ساختاری در اجزای خوراک در طول زمان تخمیر نسبت داده شود (Huhtanen *et al.*, 2008). در یک مطالعه مقدار A به ازای ۲۰۰ میلی‌گرم ماده خشک یونجه در طول ۴۸ ساعت انکوباسیون در مدل EXP (۴۱/۴ میلی‌لیتر) به طور معنی‌داری کمتر از مدل MIC (۶۰/۳ میلی‌لیتر) بود (Wang *et al.*, 2011). علت کمتر بودن مقدار A پیش‌بینی شده در این مطالعه در مقایسه با نتایج حاضر، می‌تواند با مدت زمان کمتر انکوباسیون مرتبط باشد (۴۸ ساعت در مقابل ۱۴۴ ساعت). همچنین، مشابه نتایج آزمایش حاضر، در مطالعه‌ای که روی ۳ نوع گیاه شبدر انجام گرفت، مقدار A در مدل WEB بیشتر از مدل MIT به دست آمد (Uckardes and Efe, 2014). لازم به ذکر است که مدل MIC برای اولین بار به وسیله میکائیلیس-منتن به منظور بررسی کینتیک آنزیمی ارائه شد. این مدل به وسیله گروت در سال ۱۹۹۶ در آزمون تولید گاز برای توصیف کینتیک تخمیر شکمبه مورد استفاده قرار گرفت (Groot *et al.*, 1996). گزارش شده است که مدل MIC در توصیف

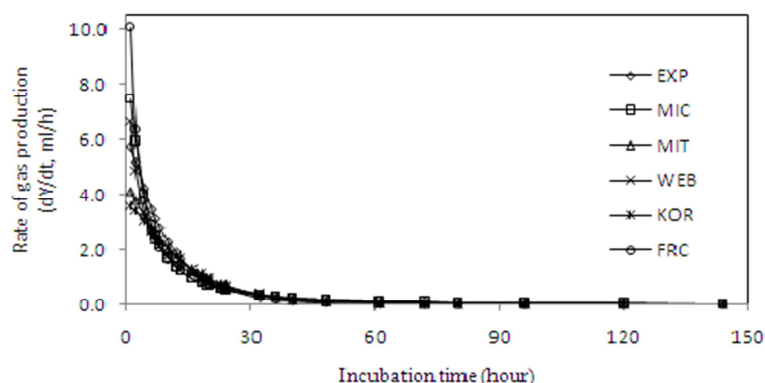


Fig. 1. Fractional rate of gas production during incubation times. Models were EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France

شکل ۱- سرعت لحظه ای تولید گاز در ساعت مختلف انکوباسیون. مدل ها عبارت بودند از اکسپونانشیال (EXP)، میکائلیس-منتن (MIC)، میچرلینگ (MIT)، ویبول (WEB)، کور کمز-یوکاردرس (KOR) و فرانس (FRC)

$R^2$  در مدل های توصیف کننده آزمون تولید گاز می تواند معیار مناسبی برای قضاوت و انتخاب مدل باشد (Uckardes *et al.*, 2013). مشابه نتایج بدست آمده، در تحقیقی که روی ۱۰ نوع علوفه از جمله یونجه انجام شد، مدل EXP در مقایسه با مدل MIC و FRC دارای MSE بیشتر و  $R^2$  کمتری بود (Wang *et al.*, 2011). در مدل های بررسی شده به وسیله سایر محققین نیز، مقدار MSE در مدل های EXP، FRC و MIC به ترتیب روند کاهشی نشان داد (Tedeschi *et al.*, 2008). همچنین، مدل WEB نسبت به مدل MIT (Uckardes and Efe, 2014) دارای MSE کمتر و  $R^2$  بالاتری بود. در سایر مطالعات انجام شده، در مدل EXP در مقایسه با مدل FRC مقدار MSE بیشتر (۲۴/۵) در مقابل (۱۲/۴) و مقدار  $R^2$  کمتر (۰/۹۷) در مقابل (۰/۹۸) بود (Peripolli *et al.*, 2014).

کاهش اینها، سرعت تولید گاز تا انتهای انکوباسیون کاهش یافته است (Huhtanen *et al.*, 2008) که چنین وضعیتی در مطالعه حاضر مشاهده نشد.

نتایج مربوط به پارامترهای نکویی برازش در جدول ۴ ارائه شده است. به طور کلی، منحنی تولید گاز شکل غیرخطی دارد. مقایسه مدل های غیرخطی از راه نکویی برازش و تجزیه مقدار باقیمانده (مقدار مشاهده شده منهای مقدار پیش بینی شده) صورت می گیرد (Lopez *et al.*, 2004). مقدار MSE در مدل EXP از نظر عددی در مقایسه با سایر مدل ها بیشترین مقدار بود (۷/۴۳۷) و تفاوت آن با مدل های MIC، WEB و FRC معنی دار شد ( $P < 0/05$ ). همچنین، مقدار  $R^2$  در مدل فوق از نظر عددی کمترین مقدار بود (۰/۹۷۳). هر دوی این مقادیر (مقادیر MSE و  $R^2$ ) نشان دهنده قابلیت ضعیف تر مدل EXP در پیش بینی دقیق کینتیک تولید گاز در مقایسه با سایر مدل ها بود. بر اساس نظر محققین، مقدار

جدول ۴- مقایسه مدل ها بر اساس پارامترهای نکویی برازش آنها

Table 4. Comparison of the models for their goodness of fit parameters

Statistical criteria <sup>2</sup>	Model <sup>1</sup>						P-value
	EXP	MIC	MIT	WEB	KOR	FRC	
MSE	7.437 <sup>a</sup>	0.917 <sup>c</sup>	3.996 <sup>abc</sup>	1.879 <sup>bc</sup>	5.528 <sup>ab</sup>	0.852 <sup>c</sup>	0.0005
$R^2$	0.973 <sup>c</sup>	0.997 <sup>a</sup>	0.986 <sup>ab</sup>	0.993 <sup>a</sup>	0.981 <sup>bc</sup>	0.997 <sup>a</sup>	<.0001
RMAD	2.262 <sup>a</sup>	0.635 <sup>c</sup>	1.544 <sup>ab</sup>	1.004 <sup>bc</sup>	1.863 <sup>a</sup>	0.588 <sup>c</sup>	<.0001
MPE	2.786 <sup>a</sup>	0.066 <sup>b</sup>	-1.394 <sup>c</sup>	-1.279 <sup>bc</sup>	-1.745 <sup>c</sup>	0.003 <sup>b</sup>	<.0001

<sup>1</sup>EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France.

<sup>2</sup>MSE: mean squares errors,  $R^2$ : coefficient of determination, RMAD: residual mean absolute deviation, MPE: mean prediction error.

Means within rows followed by different superscripts are statistically different by Turkey's test.

مدل‌های FRC و MIC مقدار MPE به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۶۶ بود که بسیار نزدیک به عدد صفر بود که نشان‌دهنده قابلیت بهتر دو مدل فوق در برازش داده‌ها بود. مشابه نتایج حاضر، در مطالعه‌ای که روی یک جیره حاوی ۶۰ درصد یونجه و با مدل‌های مختلف انجام شد، مدل EXP نسبت به مدل FRC دارای RMAD بزرگتری بود (۴/۰۳) در مقابل ۲/۵۳. همچنین مقدار MPE در مدل‌های فوق به ترتیب ۱۵/۴ و ۰/۲۲- به دست آمد که نشان داد مدل EXP در مقایسه با مدل FRC نکویی برازش ضعیف‌تری داشته است (Peripolli et al., 2014).

نمودار مربوط به پراکنش مقادیر باقیمانده‌ها که نشان‌دهنده نکویی برازش مربوط به مدل‌ها در طول زمان انکوباسیون است (Peripolli et al., 2014) در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس شکل ۲، بیشترین گستردگی مقادیر باقیمانده در ساعات اولیه انکوباسیون اتفاق افتاد، اما این گستردگی در مدل‌های WEB، MIC و FRC کمتر از سایر مدل‌ها بود که نشان‌دهنده نکویی برازش بهتر این مدل‌ها نسبت به سایر مدل‌ها بود. همچنین، از اواسط دوره انکوباسیون (از زمان ۶۰ ساعت به بعد) مدل‌های EXP، KOR، WEB و MIT مقادیر پیش‌بینی شده را بیشتر از مقادیر مشاهده شده برآورد کردند، اما در مدل‌های FRC و MIC مقادیر پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به مقادیر مشاهده شده بود که تأیید کننده نتایج قبلی حاصل از آزمایش حاضر است.

نتایج مربوط به آزمون دوربین-واتسون در جدول ۵ ارائه شده است. معنی‌دار شدن آماره دوربین-واتسون (DW) نشان‌دهنده آن است که خطاها (مقادیر باقیمانده) دارای پراکندگی مستقل نیستند و لذا بین خطاها یک نوع خود همبستگی وجود دارد. این وضعیت نشان‌دهنده ضعف مدل در برازش داده‌هاست. دامنه آماره دوربین-واتسون (DW) بین ۰ تا ۴ می‌باشد. هر چقدر مقدار DW به دست آمده به مرکز این دامنه (عدد ۲) نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده آن است که خطاها دارای پراکندگی مستقل هستند. همچنین، در اعداد نزدیک به مرز این دامنه (صفر و ۴) نوعی خود همبستگی بین خطاها وجود دارد.

گزارش شده است که مدل‌های با تعداد پارامتر بیشتر، معمولاً مقدار MSE کوچکتری دارند که در نتایج حاضر نیز چنین روندی مشاهده شد (Zwitering et al., 1990). اگر مقدار MSE و  $R^2$  در یک مدل به ترتیب زیاد و کم باشد، نشان‌دهنده این است که مدل دارای نکویی برازش خوبی نیست (Korkmaz et al., 2011; Lopez et al., 2004). لذا با توجه به مقادیر MSE و  $R^2$  به دست آمده، مشخص شد که مدل FRC و MIC به خاطر کمترین مقدار MSE و بیشترین مقدار  $R^2$  بهترین عملکرد را در بین همه مدل‌ها داشتند. گزارش شده است که مدل MIC قابلیت برازش خوبی دارد که علت آن انعطاف‌پذیری مدل فوق است که سبب می‌شود مقدار MSE در آن نسبت به سایر مدل‌ها کمتر باشد (France et al., 2005; Huhtanen et al., 2008). در این مطالعه نیز مدل MIC در مقایسه با سایر مدل‌ها دارای نکویی برازش خوبی بود.

مقدار RMAD به عنوان یک شاخصی از نکویی برازش است. هر چقدر مقدار RMAD به دست آمده از یک مدل، کوچکتر باشد (به صفر نزدیکتر باشد)، نشان‌دهنده آن است که مدل مورد نظر توانایی و قابلیت بهتری در برازش داده‌ها دارد (Peripolli et al., 2014). مطابق جدول ۴، مقدار RMAD در مدل EXP به طور معنی‌داری بیشتر از مدل‌های MIC، WEB و FRC بود ( $P < 0/05$ )، اما تفاوت آن با مدل MIT و KOR معنی‌دار نشد. در بین مدل‌های بررسی شده، کمترین مقدار RMAD در مدل‌های FRC و MIC مشاهده شد.

مقدار MPE نشان‌دهنده این است که آیا میانگین مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر مشاهده شده، بیش برآورد و یا کم برآورد شده است یا خیر. بر اساس MPE اگر مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل نسبت به مقادیر مشاهده شده بیشتر باشد (بیش برآورد باشد)، مقدار MPE منفی و در غیر این صورت مثبت است. همچنین، اگر مقدار این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده بهتر بودن نکویی برازش مدل است (Peripolli et al., 2014). در جدول ۴، در مدل EXP، مقدار MPE ۲/۷۸۶ به دست آمد و تفاوت آن با سایر مدل‌ها معنی‌دار شد ( $P < 0/05$ ). این وضعیت نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل EXP کمتر از مقادیر مشاهده شده است (کم برآورد شده است). بر خلاف مدل EXP، در



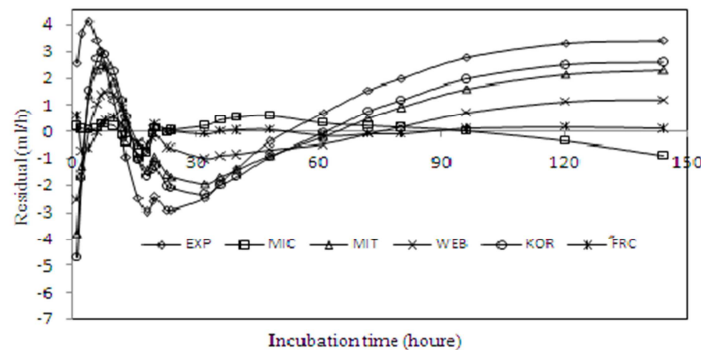


Fig. 2. Residual dispersion during incubation period. Models were EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France

شکل ۲- توزیع مقادیر باقیمانده بعد از برازش مدل ها در طول دوره انکوباسیون. مدل ها عبارت بودند از اکسپونانشیال (EXP)، میکائیلیس-منتن (MIC)، میچرلینگ (MIT)، ویبول (WEB)، کورکمز-یوکارکس (KOR) و فرانس (FRC)

(2011). سایر محققین نیز گزارش کردند که هر چند نوعی خود همبستگی بین مقادیر باقیمانده در مدل‌های مطالعه شده وجود داشت، اما این مدل‌ها قابلیت خوبی در برازش داده‌ها داشتند (Pineiro *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011). در تحقیق حاضر نیز با اینکه در مدل‌های FRC و MIC در مقادیر خطاها خود همبستگی مشاهده شد، اما مطابق نتایج مربوط به نکویی برازش، این دو مدل قابلیت خوبی در برازش داده‌ها داشتند.

مطابق جدول ۵ در تمامی مدل‌ها فرض  $H_0$  رد شد (مقادیر باقیمانده در مدل‌ها، پراکندگی مستقل نداشتند). اما از بین ۱۲ نمودار بررسی شده، مدل‌های FRC و MIC کارآیی بهتری داشتند (جدول ۵). در یک مطالعه، در بین ۲۳ نمودار مربوط به آزمون تولید گاز، آماره DW در مدل EXP در مقایسه با مدل MIC و FRC در تعداد نمودار بیشتری معنی‌دار شد (Wang *et al.*, 2011). همچنین، گزارش شده است که DW در مدل EXP در مقایسه با سایر مدل‌های بررسی شده در موارد بیشتری معنی‌دار بود (Wang *et al.*, )

جدول ۵- نتایج آزمون دوربین-واتسون در مورد خودهمبستگی بین خطاها

Table 5. Durbin Watson (DW) test results for autocorrelation of the errors

DW test results <sup>2</sup>	Model <sup>1</sup>					
	EXP	MIC	MIT	WEB	KOR	FRC
DW	0.170	0.975	0.404	0.546	0.360	1.026
Minimum	0.124	0.478	0.346	0.398	0.274	0.758
Maximum	0.279	2.161	0.563	0.788	0.483	1.863
n	25	25	25	25	25	25
k	2	3	3	3	3	4
$d_{lower}$ for $P<0.05$	1.206	1.123	1.123	1.123	1.123	1.038
$d_{upper}$ for $P<0.05$	1.550	1.654	1.654	1.654	1.654	1.767
$H_0$ Result <sup>#</sup>	Rejected	Rejected	Rejected	Rejected	Rejected	Rejected
Distribution of the curves according to the significant ( $P<0.05$ ) and non-significant ( $P>0.05$ ) DW values (total curve=12)						
significant	12	9	12	12	12	6
Non-significant	0	3	0	0	0	4
Inconclusive	0	0	0	0	0	2

<sup>1</sup>EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France.

<sup>2</sup>n: sample size, k: number of independent variable. If  $DW < d_{lower}$  bound, error terms are positively serially correlated, if  $d_{lower} < DW < d_{upper}$  bound, test is inconclusive, and if  $DW > d_{upper}$  bound; there is no evidence that the error terms are positively correlated.

<sup>#</sup> $H_0$ : There is not a significant positive autocorrelation among the errors.

در مطالعه‌ای که بدین منظور صورت گرفت، مقدار آماره AIC در مدل EXP بیشتر از مدل MIC بود که مشابه با نتایج مطالعه حاضر بود (Wang *et al.*, 2011).

آماره‌های BIC، AIC و AF یک شاخص مناسب برای انتخاب بین مدل‌ها از نظر نکویی برازش هستند و یک مدل با کمترین مقدار این آماره‌ها، نشان‌دهنده برتری مدل مورد نظر است (Uckardes and Efe, 2014; Wang *et al.*, 2011; Lopez *et al.*, 2004).

تست اجرا (Run test) نیز یک روش ساده است که تعیین می‌کند آیا داده‌ها (مقادیر باقیمانده) به‌طور سیستمیک در طول منحنی تغییر می‌کنند یا خیر (Lopez *et al.*, 1999). یک اجرا (Run)، تعداد اعداد پشت سرهم با علامت مشابه (مثلاً + یا -) در یک سری اعداد متوالی است. بر این اساس، اگر تعداد اجراهای موجود در مقادیر باقیمانده در یک مدل بیشتر باشد، احتمال نکویی برازش آن مدل بیشتر است (Wang *et al.*, 2011).

از آزمون شاپیرو-ویلک (W) به این دلیل استفاده می‌شود که آیا مقادیر خطاها دارای توزیع نرمال هستند یا خیر. مطابق جدول ۶، به غیر از مدل EXP در سایر مدل‌ها توزیع خطاها نرمال بود. مطابق نظر محققین، مدل‌هایی که دارای توزیع نرمال در مقادیر باقیمانده خود هستند، پراکنش سیستماتیک در مقادیر باقیمانده آنها وجود ندارد و این مدل‌ها عملکرد خوبی در برازش داده‌ها (نکویی برازش) دارند (Uckardes and Efe, 2014). بر اساس این آماره، تمامی مدل‌های بررسی شده به غیر از مدل EXP از عملکرد مناسبی برخوردار بودند. در یک تحقیق، مقدار آماره شاپیرو-ویلک در ۳ نوع شبدر در مدل WEB به ترتیب ۰/۹۰۱، ۰/۹۲۳ و ۰/۸۸۷ و در مدل MIT ۰/۸۹۵، ۰/۹۲۷ و ۰/۸۹۱ به‌دست آمد که بسیار نزدیک به مقادیر به‌دست آمده در تحقیق حاضر بود (Uckardes and Efe, 2014).

نتایج مربوط به BIC، AIC و AF در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق جدول فوق، مقدار آماره‌های فوق در مدل‌های MIC و FRC کمترین مقدار و در مدل EXP بیشترین بودند.

جدول ۶- نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای توزیع نرمال خطاها در مدل‌های مختلف

Table 6. Shapiro-Wilk test results for normal distributions of errors in different models

Shapiro-Wilk test results <sup>2</sup>	Model <sup>1</sup>					
	EXP	MIC	MIT	WEB	KOR	FRC
W-value	0.861	0.921	0.924	0.951	0.925	0.940
P-value	<0.0100	0.0833	0.0718	0.3436	0.0785	0.2017
H <sub>0</sub> Result <sup>#</sup>	Rejected	Accepted	Accepted	Accepted	Accepted	Accepted

<sup>1</sup> EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France.

<sup>#</sup>H<sub>0</sub>: Data are normally distributed.

<sup>2</sup>When sample size is 22 (n=22), in the Shapiro-Wilk Table, the W value for P-value =0.01, 0.05, 0.1, 0.5 and 0.9 are 0.878, 0.911, 0.926, 0.961 and 0.980, respectively.

جدول ۷- معیار اطلاعات بیزی و آکائیک، مقدار فاکتور صحت و تست اجرا بعد از برازش مدل‌ها

Table 7. Bayesian and Akaike's information criterions, accuracy factor values and run test after fitting models

Statistical criteria <sup>2</sup>	Model <sup>1</sup>					
	EXP	MIC	MIT	WEB	KOR	FRC
BIC	53.92	-4.32	40.08	20.54	48.53	-6.47
AIC	54.63	-3.98	40.42	20.89	48.87	-6.18
AF	16.94	2.40	7.25	3.67	10.35	2.20
Distribution of curves according to the number of runs of sign (total curve=12)						
≤ 4	10	0	10	6	11	0
5-6	2	5	2	5	1	2
7-8	0	5	0	0	0	8
≥ 9	0	2	0	1	0	2

<sup>1</sup>EXP: Exponential, MIC: Michaelis-Menten, MIT: Mitscherling, WEB: Weibull, KOR: Korkmaz-Uckardes and FRC: France.

<sup>2</sup>BIC (Bayesian Information Criterion), AIC (Akaike's Information Criterion) and AF (Accuracy Factor) calculated according to the formula proposed by Uckardes and Efe (2014), Wang *et al.* (2011) and Uckardes and Efe (2014), respectively.

منحنی‌هایی که تعداد اجرای کمتری دارند، خطای آنها دارای انحراف سیستماتیک است (Motulsky and Ransnas, 1987). بر این اساس، در مدل‌های FRC، MIT و KOR خطای سیستماتیک و خود همبستگی بیشتری در مقایسه با سایر مدل‌ها مشاهده شد.

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نکویی برازش انجام شده در بین مدل‌ها، به نظر می‌رسد که مدل‌های FRC و MIC در مقایسه با مدل معمول EXP، مدل بهتری برای توصیف کینتیک تولید گاز باشد. لذا با توجه به قدرت پیش‌بینی بیشتر مدل‌های FRC و MIC، استفاده از این مدل‌ها به جای مدل EXP جهت توصیف آزمون تولید گاز پیشنهاد می‌شود.

در مطالعه حاضر، مطابق جدول ۷ تعداد اجراهای به دست آمده از ۱۲ منحنی که برای برازش هر مدل استفاده شده بودند، در ۴ دسته تقسیم شدند. این دسته‌ها شامل تعداد اجراهای با تعداد  $\leq 4$ ، ۵-۶، ۷-۸ و  $\geq 9$  بودند. وقتی که مقادیر باقیمانده به‌طور تصادفی پراکنده نباشند، تعداد اجرای مشاهده شده کمتر خواهد بود و مدل نکویی برازش ضعیف‌تری خواهد داشت (Korkmaz and Uckades, 2014). بر این اساس، منحنی‌های مدل‌های FRC و MIC دارای بیشترین تعداد اجرا بودند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر این مدل‌ها در مقایسه با سایر مدل‌ها بود. مشابه نتایج مطالعه حاضر، در یک مطالعه از مجموع ۲۳ منحنی بررسی شده برای هر مدل، مدل EXP در مقایسه با مدل MIC و FRC از نظر آزمون اجرا عملکرد ضعیف‌تری داشتند (Wang et al., 2011).

### فهرست منابع

- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, V. A.
- Dhanoa M. S., Lopez S., Dijkstra J., Davies D. R., Sanderson R., Williams A. B., Zileshi Z. and France J. 2000. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: Comparison of models. *British Journal of Nutrition*, 83: 131-142.
- Draper N. R. and Smith H. 1981. *Applied Regression Analysis*. Wiley, New York, USA.
- France J., Dhanoa M. S., Theodorou M. K., Lister S. J., Davies D. R. and Isac D. 1993. A model to interpret gas accumulation profiles associated with *in vitro* degradation of ruminant feeds. *Journal of Theoretical Biology*, 163: 99-111.
- France J., Dijkstra J., Dhanoa M. S., Lopez S. and Bannink A. 2000. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed *in vitro*: Derivation of models and other mathematical considerations. *British Journal of Nutrition*, 83: 143-150.
- France J., Lopez S., Kebreab E., Bannink A., Dhanoa M. S. and Dijkstra J. 2005. A general compartmental model for interpreting gas production profiles. *Animal Feed Science and Technology*, 123-124: 473-485.
- Groot J. C. J., Cone J. W., Williams B. A., Debersaques F. M. A. and Lantinga E. A. 1996. Multiphasic analysis of gas production kinetics for *in vitro* fermentation of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 64: 77-89.
- He Z. X., Zhao Y. L., McAllister T. A. and Yang W. Z. 2016. Effect of *in vitro* techniques and exogenous feed enzymes on feed digestion. *Animal Feed Science and Technology*, 213: 148-152.
- Huhtanen P., Seppälä A., Ahvenjärvi S. and Rinne M. 2008. Prediction of *in vivo* neutral detergent fiber digestibility and digestion rate of potentially digestible neutral detergent fiber: comparison of models. *Journal of Animal Science*, 86: 2657-2669.
- Korkmaz M. and Uckades F. 2014. An alternative robust model for *in situ* degradation studies "Korkmaz-Uckades". *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 4(1): 45-51.
- Korkmaz M., Uckades F. and Kaygisiz A. 2011. Comparison of wood, gaines, parabolic, hayashi, dhanno and polynomial models for lactation season curve of Simmental cows. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 3: 448-458.
- López S., France J., Dhanoa M. S., Mould F. and Dijkstra J. 1999. Comparison of mathematical models to describe disappearance curves obtained using the polyester bag technique for incubating feeds in the rumen. *Journal of Animal Science*, 77: 1875-1888.
- López S., Prieto M., Dijkstra J., Dhanoa M. S. and France J. 2004. Statistical evaluation of mathematical models for microbial growth. *International Journal of Food Microbiology*, 96: 289-300.

- Menke K. H. and Steingass H. 1988. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28: 7-55.
- Menke K. H., Raab L., Salewski A., Steingass H., Fritz D. and Schneider W. 1979. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. *Journal of Agricultural Science*, 93: 217-222.
- Motulsky H. J. and Ransnas L. A. 1987. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and non-mathematical review. *FASEB Journal*, 1: 365-374.
- NRC. 2007. *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Ørskov E. R. and McDonald I. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rates of passage. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 92: 499-503.
- Peripolli V., Prates E. R., Barcellos J. O. J., McManus C. M., Wilbert C. A., Braccini Neto J., Camargo C. M. and Lopes R. B. 2014. Models for gas production adjustment in ruminant diets containing crude glycerol. *Livestock Research for Rural Development*, 26 (2), from <http://www.lrrd.org/lrrd26/2/peri26028.htm>.
- Pineiro G., Perelman S., Guerschman J. P. and Paruelo J. M. 2008. How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216: 316-322.
- Sahin M., Uckardes F., Canbolat O., Kamalak A. and Atalay A. I. 2011. Estimation of partial gas production times of some feedstuffs used in ruminant nutrition. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi Journal*, 17: 731-734.
- SAS. 1999. *The SAS System for Windows*. Release 8.0.1. SAS Institute Inc, Cary, USA.
- Tedeschi L. O., Schofield P. and Pell A. N. 2008. Determining feed quality for ruminants using *in vitro* gas production technique. 1. Building an anaerobic fermentation chamber. In: *The 4th Workshop on Modeling in Ruminant Nutrition: Application of the Gas Production Technique*, Juiz de Fora, MG, Brazil
- Theodorou M. K., Williams B. A., Dhanoa M. S., McAllan A. B. and France J. 1994. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48: 185-197.
- Ucardes F. and Efe E. 2014. Investigation on the usability of some mathematical models in *in vitro* gas production techniques. *Slovak Journal of Animal Science*, 47 (3): 172-179.
- Uckardes F. 2013. A modified Mitscherlich model and its degradation kinetics equations. *Archiv Tierzucht*, 56 (101): 1005-1013.
- Uckardes F., Korkmaz M. and Ocal P. 2013. Comparison of models and estimation of missing parameters of some mathematical models related to *in situ* dry matter degradation. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 23: 999-1007.
- Uckardes F., Korkmaz M. and Ocal P. 2013. Comparison of models and estimation of missing parameters of some mathematical models related to *in situ* dry matter degradation. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 23(4): 999-1007.
- Van Soest P. J., Robertson J. B. and Lewis B. A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74: 3583-3597.
- Wang M., Tang S. X. and Tan Z. L. 2011. Modeling *in vitro* gas production kinetics: Derivation of Logistic-Exponential (LE) equations and comparison of models. *Animal Feed Science and Technology*, 165: 137-150.
- West S. E. 1999. *Guidance for data quality assessment*. EPA Company, Washington. 1999, p. 4-6.
- Zwitering M. H., Jongenburger I., Rombouts F. M. and Van't Riet K. 1990. Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6): 1875-1881.



## **Comparison of fitting of some mathematical models to describe the ruminal fermentation kinetics according to gas production technique for alfalfa hay**

**Kh. Zaboli\***

Assistant professor, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(Received: 6-6-2016 – Accepted: 29-10-2016)

### **Abstract**

In this study, the mathematical models were used for evaluation of ruminal fermentation kinetic of alfalfa hay. These models included exponential (EXP), Michaelis-Menten (MIC), Mitscherling (MIT), Weibull (WEB), Korkmaz-Uckardes (KOR) and France (FRC). The in vitro gas production was carried out in 4 separate periods. Three syringes containing feed samples (3 replicates) were considered for each period and the volume of gas produced in each period at different incubation times (144 hours) was fitted for these models. Mean Square Error (MSE), coefficient determination ( $R^2$ ) and Mean Percentage Error (MPE) were used for models goodness of fit. Durbin-Watson and Shapiro-Wilk tests, Bayesian Information Criterion (BIC), Akaike's Information Criterion (AIC) and Accuracy Factor (AF) were used for selection of the best model. The results showed that MSE in FRC (0.852) and MIC (0.917) models was lower than that of EXP (7.437) model ( $P < 0.05$ ). However,  $R^2$  in FRC and MIC models (0.997 and 0.997, respectively) was significantly higher than that of EXP (0.973) model ( $P < 0.05$ ). Shapiro-Wilk test showed that all models, except EXP model, had normal distributions of the error values. Lower values of BIC, AIC and AF showed that FRC (-6.47, -6.18 and 2.20, respectively) and MIC (-4.32, -3.98 and 2.40, respectively) models had better goodness of fit compared to other models. Generally, the FRC and MIC models estimated ruminal fermentation kinetic of alfalfa hay more accurately. So, these models may be used to describe gas production profiles instead of EXP model.

**Keywords:** Gas production technique, Mathematical model, Goodness of fit, Alfalfa

---

\*Corresponding author: khzaboli@gmail.com