

## تجزیه داده‌های جوانه‌زنی با استفاده از مدل چهار پارامتره هیل

سیدمجید عالیمقام<sup>۱\*</sup>، فرشید قادری فر<sup>۲</sup>، ریحانه ربانی محمدیه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد آگرواکولوژی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

<sup>۲</sup> استادیار گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۲۴

### چکیده

امروزه در مطالعات از مدل‌های رگرسیون غیر خطی برای برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی استفاده می‌شود. در این مطالعه از مدل چهار پارامتری هیل (4-PHM) برای برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی استفاده شد. برای این منظور از داده‌های جوانه‌زنی ۳ محموله بذری مختلف گندم (*Triticum aestivum*) در پتانسیل آب صفر و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، جوانه‌زنی چاودار (*Secale cereale*) در سه سطح پتانسیل آب ۰، -۱۰ و -۱۸ بار و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین جوانه‌زنی شاه‌افسر (*Melilotus officinalis*) در پتانسیل آب صفر و در ۴ دمای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. جهت تعیین قدرت بذر در هر یک از محموله‌های بذری گندم، حداکثر درصد سبز شدن این بذرها در مزرعه اندازه‌گیری شد. در هر یک از تیمارها شاخص‌های جوانه‌زنی حداکثر درصد، سرعت، یکنواختی و زمان تا شروع جوانه‌زنی با استفاده از 4-PHM به دست آمدند. نتایج درصد سبز شدن در مزرعه برای گندم اختلاف قدرت بذری در محموله‌ها را نشان داد. شاخص اختلاف زمان تا شروع جوانه‌زنی با مدت زمانی که طول کشید ۵۰ درصد از حداکثر جوانه‌زنی رخ دهد، اختلاف قدرت محموله‌ها بذری را تعیین کرد. ضرایب 4-PHM نشان داد در گیاه چاودار با کاهش پتانسیل آب، شاخص‌های جوانه‌زنی حداکثر درصد، سرعت و زمان تا شروع جوانه‌زنی به صورت معنی‌داری کاهش یافت. با توجه به ضرایب 4-PHM برای گیاه شاه‌افسر بیشترین مقدار حداکثر درصد، سرعت و زمان تا شروع جوانه‌زنی در دماهای نزدیک به دمای مطلوب این گیاه اتفاق افتاد. نتایج این مطالعه نشان داد 4-PHM برای برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی در شرایط مختلف جوانه‌زنی و در گیاهان مختلف از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است. همچنین تمامی ضرایب این مدل دارای مفهوم بیولوژیکی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون غیر خطی، شاخص‌های جوانه‌زنی مدل، چهار پارامتری هیل

### مقدمه

استفاده از مدل‌های رگرسیون غیر خطی و برآورد پارامترهای این معادلات برای محاسبه شاخص‌های جوانه‌زنی (درصد، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی) برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ در تحقیقات مربوط به جوانه‌زنی بذور به کار گرفته شد (Goodchild and Walker, 1971; ; Bonner and Dell, 1976; Brown and Mayer, 1988). در این

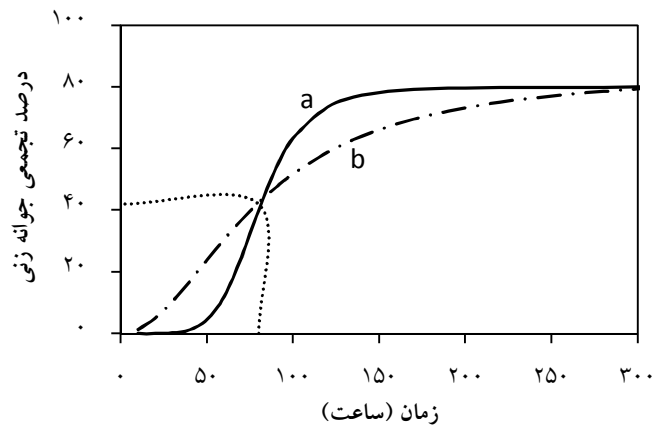
\*مسئول مکاتبه: m\_alimaghani@yahoo.com

روش‌ها با تخمین دو یا سه پارامتر معادله غیر خطی برازش داده شده به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان، ویژگی‌های کلیدی جوانه‌زنی تخمین زده می‌شود. این نوع تجزیه برای داده‌های جوانه‌زنی در اوایل دهه ۱۹۸۰ روشی عمومی و پرکاربرد محسوب می‌شد که تا به امروز نیز برای گزارش تحقیقات مربوط به جوانه‌زنی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Onofri et al, 2010; Ranal and De Santana, 2006).

پارامترهای مدل‌هایی که در تجزیه داده‌های جوانه‌زنی به کار گرفته می‌شوند باید از نظر فیزیولوژیکی یا بیولوژیکی دارای مفهوم باشند (El-Kassaby et al, 2008). در غیر این صورت با وجود اینکه مدل برازش خوبی به داده‌های جوانه‌زنی داشته باشد باز هم اهمیتی نخواهد داشت و هدف از استفاده از مدل‌های رگرسیون‌های غیر خطی تنها نشان دادن روند درصد جوانه‌زنی در مقابل زمان نیست.

شاخص‌های جوانه‌زنی توده‌های بذری به کمک پارامترهایی مانند زمان تا شروع جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و حداکثر درصد جوانه‌زنی قابل توصیف است. برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی برای پیش‌بینی درصد استقرار گیاهچه در مزرعه بسیار کارآمد هستند. محاسبه شاخص‌های جوانه‌زنی برای تعیین تیمارهایی که منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی می‌شوند نیز بسیار کارآمد می‌باشند (Kolotelo et al, 2001).

سرعت جوانه‌زنی یکی از شاخص‌های جوانه‌زنی می‌باشد. در بسیاری از موارد برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی عکس زمان تا رسیدن به نصف بیشترین درصد جوانه‌زنی (که در مدل‌های مانند کمپرتز، ویوبل و سایر مدل‌های لجستیک که یکی از پارامترهای معادله است) را به عنوان سرعت جوانه‌زنی در نظر می‌گیرند. ممکن است در برخی موارد استفاده از این رابطه برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی باعث گمراه شدن محققان شود. به عنوان مثال در شکل ۱ منحنی درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برای دو توده  $a$  و  $b$  نشان داده شده است. در هر دو منحنی از طریق برازش رگرسیون زمان تا نصف بیشترین درصد جوانه‌زنی ( $D_{50}$ ) مقدار برابری برآورد شده است در نتیجه مقدار سرعت جوانه‌زنی ( $R_{50}$ ) برای این دو توده که حالات مختلفی از جوانه‌زنی هستند برابر شده است. در صورتیکه در توده  $a$  نسبت به توده  $b$  مدت زمان کمتری سپری شده است تا جوانه‌زنی از زمان شروع به بیشترین مقدار خود برسد. در توده  $a$  یکنواختی جوانه‌زنی نسبت به توده  $b$  بیشتر است و در این توده در مدت زمان کمتری بیشترین درصد جوانه‌زنی حاصل شده است. در این روش چون محاسبه  $R_{50}$  فقط تابعی از زمان است و سایر شاخص‌های جوانه‌زنی مانند یکنواختی جوانه‌زنی تأثیری بر روی سرعت ندارد باعث بروز این مشکل می‌شود (El-Kassaby et al, 2008). برای رفع این مشکل برخی از محققان مدل‌هایی را اریه داده‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل چهار پارامتری هیل می‌باشد که علاوه بر رفع این مشکل، از روی ضرایب این مدل می‌توان، حداکثر درصد جوانه‌زنی، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را به دست آورد.



شکل ۱. منحنی درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برای دو توده بذری a و b؛ نقطه مشخص شده توسط نقطه چین، نقطه‌ای است که درصد جوانه‌زنی نصف بیشترین درصد جوانه‌زنی بر روی نمودارهای a و b می‌باشد.

هدف از این مقاله معرفی مدل رگرسیونی غیر خطی چهار پارامتری هیل است که در آن برای محاسبه سرعت علاوه بر زمان، یکنواختی جوانه‌زنی نیز مد نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مطالعه با استفاده از مقایسه قدرت سه توده بذری گندم، مقایسه شاخص‌های جوانه‌زنی گیاه چاودار در پتانسیل‌های مختلف خشکی و مقایسه شاخص‌های جوانه‌زنی گیاه شاه‌افسر در دماهای مختلف نشان داده می‌شود که پارامترهای مدل چهار پارامتری هیل دارای تعریف بیولوژیک می‌باشند و این مدل می‌تواند در گزارش کارهای مربوط به جوانه‌زنی کاربردهای موثری داشته باشد.

#### مواد و روش‌ها

این مطالعه در آزمایشگاه تحقیقات بذر و مزرعه تحقیقاتی شماره ۱ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. به منظور تهیه بذور گندم با قدرت‌های مختلف، ۳ توده گندم (*Triticum aestivum*) رقم N-80-19 از سه منطقه مختلف گرگان جمع‌آوری شد و آزمون‌های مربوطه بر روی آنها انجام شد. بذور گیاه شاه‌افسر (*Melilotus officinalis*) از مزارع کلزا واقع در شهرستان آق‌قلا جمع‌آوری شد و بذورهای چاودار (*Secale cereale*) زراعی از مزارع گندم شهرستان تربت حیدریه جمع‌آوری شد.

**آزمون جوانه‌زنی:** در گیاه گندم توده‌ها به عنوان تیمار در نظر گرفته شد. در گیاه چاودار برای ایجاد پتانسیل‌های مختلف خشکی از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (Michel and Kaufmann, 1973) و برای شاهد از آب مقطر استفاده شد. تیمارهای خشکی به ترتیب ۰، ۱۰- و ۱۸- بار بود. در دو گیاه گندم و چاودار ۳ تکرار ۵۰ تایی برای هر تیمار شمارش و در حوله‌های کاغذی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. برای گیاه شاه‌افسر آزمون جوانه‌زنی در ۴ دمای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد با ۳ تکرار ۵۰ تایی بذر انجام شد. با شروع جوانه‌زنی در تیمارهای مختلف در هر روز در ۳ نوبت با فاصله زمانی ۴ ساعت و با کاهش سرعت جوانه‌زنی ۲ نوبت در صبح و عصر بذور جوانه‌زده شمارش شدند. بذور جوانه‌زده پس از شمارش دور ریخته شدند. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به طول ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

آزمون درصد سبز شدن در مزرعه: به منظور بررسی درصد سبز شدن توده‌های گندم در مزرعه تحقیقاتی شماره ۱ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و در تاریخ کشت ۲ دی ۱۳۹۰ در سه تکرار انجام شد. در هر کرت ۳ ردیف با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر ردیف ۱۰۰ عدد بذر و در عمق ۳ سانتی‌متر توسط دست کشت شد. شمارش درصد ظهور گیاهچه‌ها به صورت روزانه تا زمانیکه افزایشی در تعداد آنها مشاهده نشد، ادامه داشت.

**مدل چهار پارامتری هیل:** مدل چهار پارامتری هیل مشتق شده از مدل سه پارامتری هیل می‌باشد (Goutelle et al, 2008). معادله و پارامترهای مدل هیل چهار پارامتری به شرح زیر است:

$$y = y_0 + \frac{ax^b}{c^b + x^b} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $y$ : درصد تجمعی جوانه‌زنی؛  $y_0$ : عرض از مبدا مدل (نقطه‌ای که نمودار محور  $y$  را قطع می‌کند)؛  $y_0 + a$ : خط مجانب نمودار (این شاخص نشان‌دهنده بیشترین درصد جوانه‌زنی است)؛  $b$ : ضریب معادله که تعیین کننده شکل منحنی می‌باشد (هر چه مقدار  $b$  بیشتر باشد، اختلاف بین شروع جوانه‌زنی و زمانی که بیشترین درصد جوانه‌زنی اتفاق می‌افتد کمتر خواهد بود. در واقع این ضریب می‌تواند مقدار یکنواختی جوانه‌زنی را نشان دهد)؛  $c$ : مدت زمانی است طول می‌کشد ۵۰ درصد از حداکثر جوانه‌زنی رخ دهد.

با توجه به اینکه عرض از مبدا رابطه (۱) مقداری منفی است می‌توان با مساوی قرار دادن مدل چهار پارامتری هیل با مقدار صفر، زمان تا شروع جوانه‌زنی (محل برخورد نمودار با محور زمان) را با کمک رابطه (۲) محاسبه کرد:

$$\text{lag} = \frac{b \sqrt{-y_0 c^b}}{a + y_0} \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $\text{lag}$ : زمان تا شروع جوانه‌زنی می‌باشد. سایر ضرایب در رابطه (۱) توضیح داده شده است.

در نهایت مدل چهار پارامتری هیل برای داده‌های جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برازش داده شد و پارامترهای مربوط به مدل برای هر تیمارهای مختلف به صورت جداگانه برآورد شد. برای برازش مدل از نرم‌افزار SAS استفاده شد (Soltani, 2007).

## نتایج و بحث

در ۳ توده مورد مطالعه درصد جوانه‌زنی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۱). بر طبق درصد جوانه‌زنی توده ۱ به‌عنوان توده قوی و توده ۲ به‌عنوان توده ضعیف تفکیک شد (جدول ۱). اما نتایج بررسی درصد سبز شدن برای تعیین قدرت واقعی توده‌ها مورد مطالعه نشان داد توده ۳ با ۸۳ درصد سبز شدن در مزرعه به‌عنوان توده قوی و توده ۱ با ۶۵ درصد سبز شدن در مزرعه توده ضعیف بود. درصد سبز شدن در مزرعه برای توده ۲ مقدار ۷۱ درصد به‌دست آمد. اختلاف بین درصد سبز شدن در مزرعه برای بذور توده‌هایی که در آزمایشگاه درصد جوانه‌زنی یکسان داشتند بیانگر این مطلب است که صرفاً استفاده از حداکثر درصد جوانه‌زنی، معیار مناسبی برای پیش‌بینی سبز شدن توده‌های بذری نمی‌باشد. عدم توانایی پیش‌بینی سبز شدن بذور در مزرعه از طریق درصد جوانه‌زنی بیشینه با نتایج بدست آمده توسط Ghaderi-Far et al (2010 a) و Khavari et al (2009) همخوانی داشت.

Hampton and Coolbear (1990) گزارش کردند در صورتی که درصد جوانه‌زنی استاندارد توده‌ای کمتر از ۹۰ درصد باشد می‌توان بیان کرد توده مورد نظر ضعیف است. درحالی که درصد جوانه‌زنی توده‌ها بالای ۹۰ درصد باشد نمی‌توان به طور قطعی بیان کرد این توده بذری دارای قدرت بالایی می‌باشند (Roberts, 1984) به نقل از Hampton and Hill, 1990).

به منظور تعیین قدرت بذر توده‌ها استفاده از شاخص‌های جوانه‌زنی مانند سرعت و یکنواختی می‌تواند نتیجه بهتری نسبت به درصد جوانه‌زنی در تفکیک توده‌های ضعیف و قوی داشته باشد. از ضرایب مدل چهار پارامتری هیل می‌توان سرعت ( $R_{50}$ ) که معکوس ضریب  $c$  در مدل چهار پارامتری هیل می‌باشد) و یکنواختی (ضریب  $b$ ) جوانه‌زنی را به راحتی به دست آورد. هر چه مقدار ضریب  $c$  کوچک‌تر باشد سرعت جوانه‌زنی بیشتر خواهد بود. در مورد ضریب  $b$  هر چه مقدار عددی این ضریب بزرگ‌تر باشد یکنواختی جوانه‌زنی بیشتر خواهد بود (Goutelle et al, 2008; El-Kassaby et al, 2008). با استفاده از ضرایب مدل چهار پارامتری هیل می‌توان شاخصی ( $c$ -lag) را محاسبه کرد که هم‌زمان نشان دهنده سرعت و درصد جوانه‌زنی می‌باشد (El-Kassaby et al, 2008).

جدول ۱. مقایسه میانگین ضرایب مدل چهار پارامتری هیل (ضرایب  $a$ ,  $b$ ,  $c$  و  $y_0$ ) و پارامترهای محاسبه شده از ضرایب این مدل ( $c$ -lag): زمان تا شروع جوانه‌زنی بر حسب ساعت؛ ( $y_0+a$ ): حداکثر درصد جوانه‌زنی؛ ( $c$ -lag): اختلاف بین زمان تا پنجاه درصد جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی بر حسب ساعت؛  $R_{50}$ : سرعت جوانه‌زنی که برابر معکوس زمان تا پنجاه درصد جوانه‌زنی است بر حسب ساعت و EM: حداکثر درصد سبز شدن در مزرعه برای تیمارهای مختلف در سه گیاه گندم، چاودار و شاه‌افسر

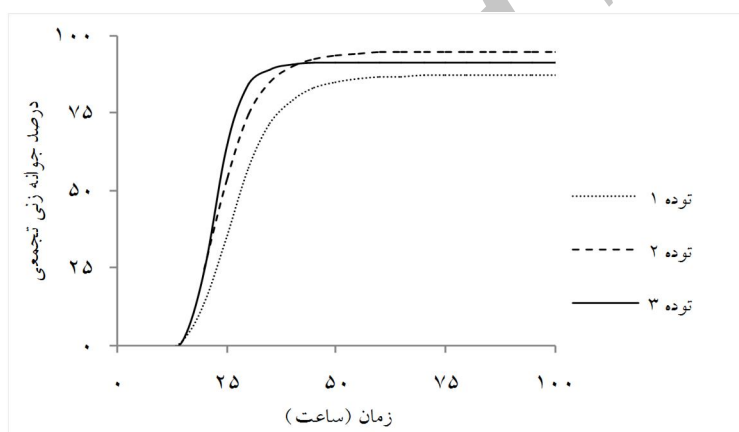
EM	$R_{50}$	$c$ -lag	lag	$a+y_0$	$y_0$	$c$	$b$	$a$	تیمار	گیاه
										گندم
۶۵b	۰/۰۳۸b	۱۳/۲a	۱۳/۳ab	۸۷/۶c	-۱/۹۵a	۲۶/۵a	۵/۶b	۸۹/۵c	۱	توده ۱
۷۱ab	۰/۰۴۲a	۱۰/۶b	۱۳/۱b	۹۵/۲a	-۱/۴۹a	۲۳/۷b	۵/۷b	۹۹/۰a	۲	توده ۲
۸۳a	۰/۰۴۸a	۸/۷c	۱۳/۸a	۹۱/۵b	-۳/۷۹b	۲۲/۴b	۸/۶a	۹۸/۰b	۳	توده ۳
										چاودار
-	۰/۰۲۸a	۲۱/۹c	۱۴/۴b	۷۳/۲a	-۳/۱a	۳۶/۳c	۳/۹a	۷۶/۳a	۰	پتانسیل
-	۰/۰۱۶b	۳۲/۵b	۲۹/۹a	۶۸/۰a	-۳/۱a	۶۲/۵b	۴/۵a	۷۱/۱a	۱۰-	پتانسیل ۱۰-بار
-	۰/۰۱۰b	۵۷/۵a	۴۳/۷a	۲۸/۶b	-۰/۴a	۱۰۱/۲a	۵/۲a	۲۸/۹b	۱۸-	پتانسیل ۱۸-بار
										شاه‌افسر
-	۰/۰۱۴c	۱۶/۷c	۵۶/۴a	۹۹/۴a	-۲۰/۶b	۷۳/۲b	۷/۳a	۱۲۰/۰a	۵°	دمای ۵° C
-	۰/۰۳۷a	۹/۷c	۱۷/۴c	۹۶/۷a	-۸/۹ab	۲۷/۱d	۸/۳a	۱۰۵/۷ab	۱۵°	دمای ۱۵° C
-	۰/۰۲۶b	۳۲/۴b	۸/۸c	۹۳/۷a	-۳/۲a	۴۱/۲c	۲/۴b	۹۶/۸b	۲۵°	دمای ۲۵° C
-	۰/۰۱۰c	۶۲/۱a	۳۶/۳b	۸۴/۹b	-۳/۲a	۹۸/۵a	۳/۴b	۸۸/۱b	۳۰°	دمای ۳۰° C

نتایج مقایسه مقدار  $R_{50}$  برای تعیین قدرت توده‌های بذری مورد مطالعه گندم نشان داد توده‌های ۲ و ۳ به‌عنوان توده قوی و توده ۱ به‌عنوان توده ضعیف شناخته شدند. مقادیر یکنواختی جوانه‌زنی نیز همانند نتایج سرعت جوانه‌زنی توده‌های ۲ و ۳ را به‌عنوان توده قوی و توده ۱ را به‌عنوان توده ضعیف تعیین کرد (جدول ۱). اما نتایج حاصل از

تعیین قدرت بذر از طریق شاخص‌های سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی با نتایج درصد سبز شدن در مزرعه به صورت کامل هم‌خوانی نداشت. بر اساس مقدار شاخص  $c-lag$  که ترکیبی از شاخص‌های سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی است توده ۱ به‌عنوان توده ضعیف و توده ۳ به‌عنوان توده قوی شناخته شد که با نتایج درصد سبز شدن در مزرعه کاملاً هم‌خوانی داشت (جدول ۱).

برآورد شاخص  $c-lag$  در صورتی امکان‌پذیر است که بتوان زمان شروع جوانه‌زنی ( $lag$ ) را برآورد کرد. از ویژگی‌های مدل چهار پارامتری هیل علاوه بر برآورد ضرایب سرعت، درصد و یکنواختی جوانه‌زنی، توانایی محاسبه زمان شروع جوانه‌زنی برای جمعیت بذری است (جدول ۱)؛ نحوه محاسبه مقدار  $lag$  در قسمت مواد و روش با استفاده از رابطه (۲) توضیح داده شده است.

در شکل ۲ مدل چهار پارامتری هیل به داده‌های جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان هر یک از توده‌های مورد مطالعه گندم برازش داده شده است. مقدار  $R^2$  نمودار برای توده‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۹ به دست آمد. مقدار  $RMSE$  نمودار برازش داده شده برای داده‌های جوانه‌زنی سه توده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲/۳، ۵/۶ و ۳/۷ به دست آمد. بالا بودن مقدار  $R^2$  و پایین بودن مقدار شاخص  $RMSE$  برای نمودارهای برازش داده شده نشان می‌دهد مدل چهار پارامتری هیل توانسته است روند درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برای هر سه توده گندم مورد مطالعه را به خوبی پیش‌بینی کند.



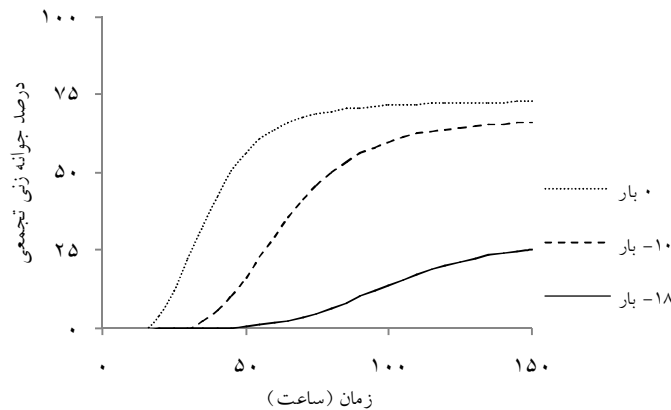
شکل ۲. برازش مدل چهار پارامتری هیل برای درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در هر یک از توده‌های مورد مطالعه برای گندم

در این مطالعه جهت نشان دادن انعطاف‌پذیری هیل در تعیین شاخص‌های جوانه‌زنی، اثر تیمارهای پتانسیل بستر بذر و اثر دما بر روی شاخص‌های جوانه‌زنی مورد بررسی قرار گرفت. پتانسیل آب بستر بذر و دمای محیط می‌توانند باعث تغییر شاخص‌های جوانه‌زنی شوند. افزایش پتانسیل محیط بذر و افزایش و کاهش دما نسبت به دمای مطلوب جوانه‌زنی باعث کاهش درصد جوانه‌زنی، کاهش یکنواختی و سرعت جوانه‌زنی بذور می‌شود (Ghaderi-Far et al, 2010 b).

نتایج بررسی اثر پتانسیل بستر بذر در گیاه چاودار نشان داد با تغییر پتانسیل آب، ضرایب مدل چهار پارامتری هیل و شاخص‌های جوانه‌زنی برآورد شده از طریق این ضرایب به صورت معنی‌داری تغییر کردند. با افزایش پتانسیل آب حداکثر درصد جوانه‌زنی به صورت معنی‌داری کاهش داشت (جدول ۱). بیشترین درصد جوانه‌زنی برآورد شده با مقدار ۷۳ و ۶۸ درصد به ترتیب برای پتانسیل ۰ و ۱۰- بار و کمترین درصد جوانه‌زنی برآورد شده با مقدار ۲۹ درصد

در پتانسیل ۱۸- بار مشاهده شد (جدول ۱). با تغییر پتانسیل آب مقدار یکنواختی جوانه‌زنی (ضریب b) در گیاه چاودار تفاوت معنی‌داری نداشت اما سرعت جوانه‌زنی ( $R_{50}$ ) در این گیاه با کاهش پتانسیل بذریه صورت معنی‌دار کاهش داشت (جدول ۱). شاخص c-lag نیز با کاهش پتانسیل بستر بذریه چاودار به صورت معنی‌داری کاهش داشت (جدول ۱).

در شکل ۳ روند تغییرات درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برای بذریه گیاه چاودار در سه پتانسیل بستر ۰، ۱۰- و ۱۸- بار نشان داده شده است. مقدار ضریب  $R^2$  نمودار برای پتانسیل ۰، ۱۰- و ۱۸- بار به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۰/۸۷ به دست آمد. مقدار شاخص RMSE نمودار برای پتانسیل ۰، ۱۰- و ۱۸- بار به ترتیب ۳، ۵/۶ و ۴/۴ به دست آمد. مقادیر  $R^2$  و RMSE به دست آمده برای نمودارها نشان می‌دهد مدل چهار پارامتری هیل می‌تواند در پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی تجمعی در طول زمان برای پتانسیل‌های مختلف بستر بذریه به راحتی مورد استفاده قرار گیرد. در تعیین شاخص‌های جوانه‌زنی توسط مدل‌ها، مدلی دارای ارزش بیشتری است که توانایی تعیین اثر تیمارهای مختلف محیطی بر روی شاخص‌های جوانه‌زنی را دارا باشد. گوتله و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند از ویژگی‌های هیل انعطاف‌پذیر بودن این مدل برای انواع مختلف داده‌ها است.

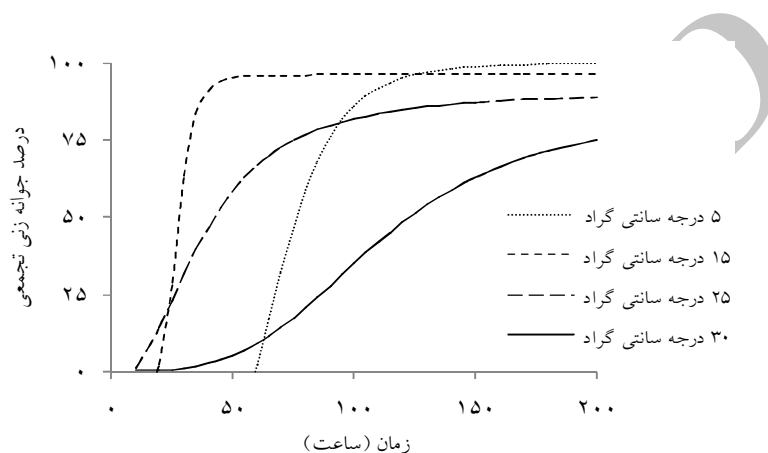


شکل ۳. برازش مدل چهار پارامتری هیل برای درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در هر یک از سطوح خشکی مورد مطالعه برای گیاه چاودار

جهت بررسی تاثیر دما بر روی شاخص‌های جوانه‌زنی حاصل شده از ضرایب مدل هیل، از داده‌های جوانه‌زنی بذریه گیاه شاه‌افسر در چهار دمای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. نتایج مقایسه ضرایب و شاخص‌های جوانه‌زنی در دماهای مختلف نشان داد با تغییر دما مقادیر این شاخص‌ها نیز به صورت معنی‌داری تغییر کرد (جدول ۱). کمترین مقدار حداکثر درصد جوانه‌زنی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که با سایر دماها اختلاف معنی‌داری داشت. این شاخص در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۱). با افزایش و کاهش دما نسبت به دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار  $R_{50}$  به صورت معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۱). Ghaderi-Far et al (2010 b) دمای مطلوب برای گیاه شاه‌افسر را ۱۸/۴۷ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده‌اند. با توجه به این که در این مطالعه نزدیک‌ترین دما به دمای مطلوب گیاه شاه‌افسر دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد بود کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش و افزایش دما نسبت به دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد امری منطقی است. این موضوع نشان می‌دهد ضرایب مدل چهار پارامتری هیل به خوبی می‌تواند روند تغییرات سرعت جوانه‌زنی در دماهای مختلف را پیش‌بینی

کند. مقدار lag برای دماهای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد از نظر آماری کمتر از دمای ۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). شروع سریع‌تر جوانه‌زنی در دماهای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای ۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل نزدیک‌تر بودن این دماها به دمای مطلوب گیاه شاه‌افسر بود.

روند تغییرات درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در گیاه شاه‌افسر برای دماهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار  $R^2$  نمودار برای دماهای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۷، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ به دست آمد. مقدار شاخص RMSE برای نمودارهای در دماهای ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۶/۳، ۶/۹، ۸/۶ و ۸/۱ محاسبه شد. با توجه به مقادیر  $R^2$  و RMSE نمودارها در تیمار دمایی مدل چهار پارامتری هیل در برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی در این شرایط نیز به خوبی عمل کرد و توانست نتایج قابل قبولی را حاصل نماید.



شکل ۴. برازش مدل چهار پارامتری هیل برای درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در هر یک از دماهای مورد مطالعه برای گیاه شاه‌افسر

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه به معرفی مدل چهار پارامتری هیل جهت استفاده در برآورد شاخص‌های جوانه‌زنی پرداخته شد. با توجه به نتایج این مطالعه از ویژگی‌های این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تمامی ضرایب مدل چهار پارامتری هیل از نظر بیولوژیکی قابل تعریف هستند.
۲. مدل چهار پارامتری هیل انعطاف‌پذیری بالایی در برازش به انواع داده‌های جوانه‌زنی دارد.
۳. با استفاده از ضرایب این مدل می‌توان زمان تا شروع جوانه‌زنی را برآورد کرد.
۴. با تغییر شرایط محیطی برای جوانه‌زنی بذور، مقادیر ضرایب مدل چهار پارامتری هیل به صورت معنی‌داری تغییر می‌کند که این تغییرات در ضرایب مدل می‌تواند در برآورد میزان اثر شرایط محیطی بر روی جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گیرد.
۵. از طریق ضرایب مدل چهار پارامتری هیل می‌توان شاخص یکنواختی و سرعت جوانه‌زنی از اختلاف زمان تا شروع جوانه‌زنی تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی را به دست آورد. این شاخص ترکیبی از سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی محسوب می‌شود، در مواردی که شاخص‌های سرعت جوانه‌زنی و یکنواختی به صورت جداگانه باعث گمراه شدن محقق شود، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



## References

- Bonner, F.T. and Dell, T.R. 1976. The Weibull function: a new method of comparing seed vigor. *J. Seed Technol.* 1: 96–103.
- Brown, R.F. and Mayer, D.G. 1988. Representing cumulative germination. The use of Weibull and other empirically derived curves. *Ann. Bot.* 61: 127–138.
- El-Kassaby, Y.A., Moss, I., Kolotelo, D. and Stoehr, M. 2008. Seed Germination: Mathematical Representation and Parameters Extraction. *Forest Science* 54: 220-227.
- Ghaderi-Far, F., Bakhshandeh, E. and Ghadirian, R. 2010 a. Evaluating seed quality in sesame (*Sesamum indicum* L.) by the accelerated ageing test. *Seed technol.* 32: 69-72.
- Ghaderi-far, F., Gherekhloo, J. and Alimaghham, M. 2010 b. Influence of environmental factors on seed germination and seedling emergence of yellow sweet clover. *Planta Daninha.* 28: 463-469.
- Ghaderi-far, F., Alimaghham, S.M., Rezaei moghadam, H. and Haghghi, M. 2012. Influence of environmental factors on seed germination and seedling emergence of rye (*Secale cereale* L.) as a volunteer plant in wheat fields. *J. crop product.* 5: 121-133. (In Persian).
- Goodchild, N.A. and Walker, M.G. 1971. A method of measuring seed germination in physiological studies. *Ann. Bot.* 35: 615–621.
- Goutelle, S., Maurin, M., Rougier, F., Barbaut, X., Bourguignon, L., Ducher, M. and Maire, P. 2008. The Hill equation: a review of its capabilities in pharmacological modeling. *Fund. Clinical Pharmacology.* 22: 633-648.
- Hampton, J.G. and Coolbear, P. 1990. Potential versus actual seed performance - can vigour testing provide an answer?. *Seed Sci. technol.* 18: 215-228.
- Hampton, J.G. and Hill, M.J. 1990. Herbage seed lots: are germination data sufficient?. *Proc. New Zealand Grass Assoc.* 52: 59-64.
- Khavari, F., Ghaderi-Far, F. and Soltani, E. 2009. Laboratory tests for predicting seedling emergence of safflower (*Carthamus tinctorius*, L.) cultivars. *Seed Technol*, 31: 189-193.
- Kolotelo, D., Van Steenis, E., Peterson, M., Bennett, R., Trotter, D. and Dennis, J. 2001. Seed handling guidebook. BC Ministry of Forests, Tree Improvement Branch, Victoria, BC, Canada. 106 pp.
- Michel, B.E. and Kaufmann, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant physiol.* 51: 914-916.
- Onofri, A., Gresta, F. and Tei, F. 2010. A new method for the analysis of germination and emergence data of weed species. *Weed Res.* 50: 187–198.
- Ranal, M.A. and De Santana, D.G. 2006. How and why to measure the germination process?. *Rev bras Bot.* 29: 1–11.
- Roberts, E.H. 1984. The control of seed quality and its relationship to seed productivity. *Proceedings of the Australian Seed Research Conference:* 1: 1-25.
- Soltani, A. 2007. Application of SAS in statistical analysis. JDM Press, Mashhad, Iran. 182 p. (In Persian, Programs in English).