

مقاله پژوهشی

گلفیتو، مدل پیش‌آگاهی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی در گرگان

محمدعلی آفاجانی✉

بخش تحقیقات گیاه‌پزشکی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
(تاریخ دریافت: مرداد ۱۳۹۹؛ تاریخ پذیرش: آبان ۱۳۹۹)

چکیده

بادزدگی فیتوفترایی ناشی از *Phytophthora infestans*، مهم‌ترین بیماری سیب‌زمینی در دنیا و ایران است که برای پیش‌آگاهی آن تاکنون ۱۶ مدل معرفی شده است. شهرستان گرگان دارای بیشترین سطح زیر کشت این محصول در استان است و طی ۱۷ سال گذشته، در ۱۱ سال بیماری با شدت‌های مختلف در آن ظاهر شده است. به منظور ساختن یک مدل پیش‌آگاهی مبتنی بر مفهوم «روز مساعد برای بادزدگی»، داده‌های آب و هوایی روزانه به صورت متغیرهای دوره‌ای و شرطی تبدیل شده، در نهایت سه متغیر پیشگو ساخته شد. بهترین متغیر پیشگو FTR بود که حاصل ترکیب سه متغیر دما و دو متغیر بارش بود و نمره‌ی روزانه‌ی آن از ۲- تا ۴ در تغییر بود. مقدار تجمعی FTR از ابتدای فروردین ماه تا شروع بیماری ۶۴ و در سال‌های بدون بیماری ۴ بود. میزان درستی پیش‌بینی مدل بر اساس رگرسیون لجستیک و تابع تشخیص به ترتیب ۷۵ و ۸۹ درصد بود و حساسیت و اختصاصیت مدل نهایی به ترتیب حدود ۹۲ و ۱۰۰ درصد بود.
واژه‌های کلیدی: سیب‌زمینی، بادزدگی، فیتوفترا، مدل‌سازی، پیش‌آگاهی، استان گلستان

GolPhyto, forecasting model of potato late blight in Gorgan

M. A. AGHAJANI✉

Plant Protection Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Gorgan, Iran

Abstract

Late blight (PLB), caused by *Phytophthora infestans*, is the most important diseases of potato in the world and Iran that 16 models have been developed for forecasting so far. Gorgan county had the largest potato cultivated area in the province and during recent 17 years, PLB appeared in 11 years with different severities. In order to developing a forecasting model based on “blight favorable day” concept, daily weather data converted to periodic and conditional variables, at last three predictor variables were developed. FTP was the best predictor variable which composed of three temperature variables and two precipitation variables and its daily score was -2 to 4. Accumulated FTR from 21 March to disease appearance was 64 and in no-disease years was 4. Prediction accuracy of the model was 75% and 89% based on logistic regression and discriminant analysis, respectively and sensitivity and specificity of final model was 92 and 100%, respectively.

Keywords: potato, late blight, *Phytophthora infestans*, modeling, forecasting, Golestan province

مقدمه

بیماری) و شرط اصلی تعیین کننده در بروز بیماری، مساعد بودن شرایط محیطی است (Campbell and Madden, 1990).

داده‌های دما، رطوبت نسبی و ریزش باران طی هر فصل زراعی، برای پیش‌بینی طغیان و ساختن مدل‌های پیش‌آگاهی برای بیماری مورد استفاده قرار گرفته است. در وب سایت مدیریت تلفیقی آفات (IPM) دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، ۱۶ مدل پیش‌آگاهی برای بیماری بادزدگی سیب‌زمینی شرح داده شده است که دما و رطوبت نسبی هوا و مقدار بارش، مهم‌ترین متغیرهای استفاده شده در آن‌ها بوده است (Anonymous, 2012). تحقیقات اولیه در ایالات متحده توسط محققان سرویس تحقیقات کشاورزی وزارت کشاورزی آمریکا به عنوان بخشی از «سرویس اخباری سفیدک داخلی» به دنبال طغیان شدید بادزدگی گوجه فرنگی در سال ۱۹۴۶ انجام شد. به دنبال این طغیان، روشی برای پیش‌بینی بیماری در شرق ویرجینیا توسعه یافت و در سال ۱۹۴۷، به صورت عملی مورد استفاده قرار گرفت (Cook, 1949). هایر (Hyre, 1954) با بررسی دقیق روش کوک، ایرادهای آن را رفع کرد و ادعا کرد که با استفاده از نمودار جمع بارش متحرک می‌توان نتایج بهتری به دست آورد. در سیستم هایر، یک روز در صورتی به عنوان «روز مساعد برای بادزدگی» (blight favorable day = BFD) در نظر گرفته می‌شود که دمای میانگین ۵ روز قبل کمتر از ۲۵/۶ درجه و جمع بارش ۱۰ روز قبل بیش از ۳ سانتی‌متر باشد. روزهایی که دمای کمینه، کمتر از ۷/۲ درجه بود، به عنوان نامساعد در نظر گرفته می‌شوند. هفت تا ۱۰ روز بعد از وقوع ۱۰ روز مساعد متوالی، ظهور علائم بیماری پیش‌بینی می‌شود. با استفاده از این سیستم، صحت پیش‌بینی وقوع بادزدگی در ایالت Connecticut طی یک دوره ۵۲ ساله (۱۹۰۲ تا ۱۹۵۳) معادل ۸۳ درصد بود.

هایر (Hyre, 1955) با مقایسه سه روش ۱۰ ساعته (Wallin et al., 1954)، روش ۴۸ ساعته (Beaumont, 1947) و روش نمودارهای متحرک (Hyre, 1954) برای پیش‌بینی

گیاه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) مهم‌ترین کالای غذایی غیر غله‌ی دنیاست. در سال ۲۰۱۷ سطح زیر کشت و تولید سیب‌زمینی دنیا به ترتیب بیش از ۱۹/۳ میلیون هکتار و ۳۸۸/۲ میلیون تن بوده و در همین سال (۱۳۹۶)، سطح زیر کشت و تولید سیب‌زمینی ایران به ترتیب بیش از ۱۴۶/۵ هزار هکتار و ۵/۱ میلیون تن (معادل ۰/۸ و ۱/۳ درصد دنیا) بوده است (FAOSTAT). سطح زیر کشت و تولید سیب‌زمینی استان گلستان نیز به ترتیب بیش از ۶/۵ هزار هکتار و ۲۱۲ هزار تن بوده است که در هر دو مورد، معادل بیش از ۴ درصد کشور بوده است. در استان گلستان، شهرستان گرگان همواره رتبه‌ی اول تولید سیب‌زمینی را دارا بوده، به طوری که در همان سال، سطح زیر کشت و تولید سیب‌زمینی این شهرستان به ترتیب بیش از ۸۵ و ۸۶ درصد سهم استان را به خود اختصاص داده است (Ahmadi et al., 2018).

بیماری بادزدگی، ناشی از شبه‌قارچ *Phytophthora infestans* مهم‌ترین بیماری سیب‌زمینی در دنیا، به ویژه در مناطق خنک و مرطوب است. در مورد اهمیت این بیماری، تنها کافی است که به قحطی ایرلند اشاره شود. طغیان بیماری بادزدگی در دهه ۱۸۴۰، قحطی سیب‌زمینی در ایرلند را به وجود آورد که بر اثر آن حدود ۱/۵ میلیون نفر از مردم این کشور از بین رفتند و همین تعداد نیز کشور را (غالباً به مقصد آمریکا) ترک کردند (Agris, 2005; Schumann et al., 2005).

بیش‌ترین تلاش برای پیش‌آگاهی بیماری‌های گیاهی، در مورد بیماری بادزدگی سیب‌زمینی انجام شده است. این بیماری دارای اهمیت معاصر و تاریخی است و سیستم‌های پیش‌آگاهی متعددی در هلند، فرانسه، آلمان، روسیه، انگلستان، اسکاتلند، ایرلند، استرالیا، آمریکا و کانادا توسعه یافته است. یک فرض مقدماتی و هنوز عمومی در پیش‌آگاهی این بیماری این است که زادمایه‌ی *P. infestans* به اندازه‌ی کافی برای آغاز بیماری وجود دارد (یکی از اجزای مثلث

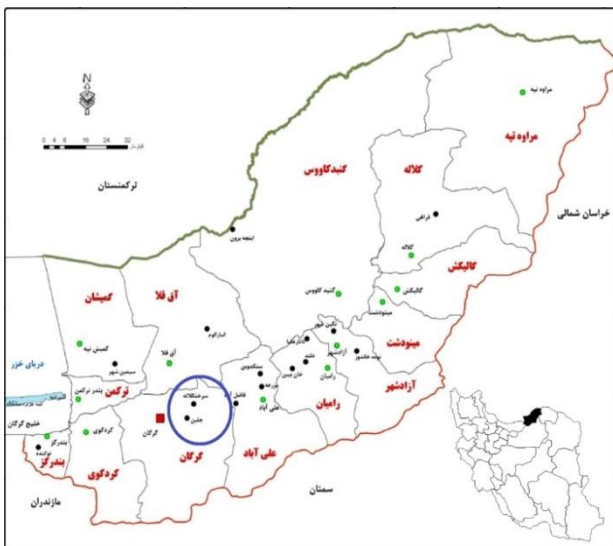
مواد و روش‌ها

۱- محل انجام تحقیق و رقم مورد بررسی

منطقه‌ی سرخنکلاته در دهستان استرآباد شمالی، بخش بهاران در شرق شهرستان گرگان واقع شده است و هر سال، حدود ۴۰۰۰ هکتار از اراضی این منطقه، به کشت سیب‌زمینی اختصاص پیدا می‌کند (شکل ۱). از آنجایی که رقم غالب منطقه در حال حاضر سانته می‌باشد که یک رقم نیمه حساس در برابر بیماری است؛ لذا مدل‌سازی و محاسبات آماری براساس آن انجام شده است.

۲- تعریف متغیرها

متغیرهای مورد استفاده برای ساختن مدل پیش‌آگاهی، داده‌های آب و هوایی روزانه‌ی ثبت شده در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک هاشم آباد گرگان واقع در فاصله‌ی ۶ کیلومتری غرب گرگان) شامل دما و رطوبت نسبی (کمینه، بیشینه و میانگین) و باران (به‌صورت جمع بارش و روز بارانی) بود (جدول ۱). این هشت داده، متغیرهای ساده (سطح یک) را تشکیل می‌دادند که در ادامه،



شکل ۱- محل اجرای تحقیق در منطقه‌ی سرخنکلاته در شرق شهرستان گرگان (دایره‌ی آبی رنگ).

Fig. 1. Place of research in Sorkhankalateh region in east of Gorgan (blue circle).

بیماری بادزدگی سیب‌زمینی در ایالت‌های شمال شرقی آمریکا (مناطق ماین، پنسیلوانیا، نیویورک، مریلند و اوهایو)، نتیجه گرفت که مدل مبتنی بر دما و بارش (مدلی که خود در سال ۱۹۵۴ ساخته بود)، از کارایی بالاتری برخوردار بود.

از زمان ورود بیماری به کشور و میزان خسارت آن، گزارش دقیقی وجود ندارد، اما در برخی مناطق سیب‌زمینی کاری کشور، نظیر استان‌های شمالی، آذربایجان غربی، اردبیل و دزفول، که شرایط محیطی برای توسعه‌ی بیماری مساعد است، از دیرباز طغیان‌های بیماری دیده شده و یک یا چندبار سمپاشی برای مهار بیماری، به یک رسم و عرف تبدیل شده است (Soheili Moghadam *et al.*, 2016). زرگزاده و محمدی (Zargarzadeh and Mohammadi, 2016) با بررسی داده‌های هواشناسی دوره‌ی ده ساله‌ی ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۰، توانستند با استفاده از دو متغیر آب و هوایی، سال طغیانی ۱۳۷۶ را از سایر سال‌ها تفکیک نمایند. آفاجانی (Aghajani, 2012) برای بررسی احتمال وقوع بیماری، متغیرهای آب و هوایی طی ۶ دوره‌ی زمانی را مورد مطالعه قرار داد. وی در این تحقیق، متغیرهای دارای ارتباط آماری قوی‌تر با بیماری را مشخص نمود. در تحقیق دیگری (Aghajani, 2015)، کارایی دو مدل هاینر و والین در شرایط منطقه‌ی گرگان مورد بررسی قرار گرفت. مقدمات رسیدن به متغیرهای پیشگو و ساختن مدل پیش‌آگاهی برای منطقه‌ی گرگان انجام شد و نسخه‌های مقدماتی مدل با عنوان گلفیتو (GolPhyto) معرفی شد (Aghajani, 2014).

هدف از انجام این تحقیق، تهیه‌ی نسخه‌ی نهایی و کاربردی مدل GolPhyto برای پیش‌بینی وضعیت بیماری بادزدگی فیتوفترایی سیب‌زمینی در منطقه‌ی سرخنکلاته‌ی شهرستان گرگان برای اطلاع‌رسانی و ایجاد آگاهی در کارشناسان و کشاورزان منطقه به‌منظور جلوگیری از سمپاشی‌های غیر ضروری بوده است.

پیش‌آگاهی باید بتواند مدتی قبل از این پنجره، وضعیت بیماری را روشن نماید تا فرصت کافی برای اطلاع‌رسانی و اقدام‌های مدیریتی وجود داشته باشد.

برای یافتن مناسب‌ترین پنجره‌های زمانی جهت مدل‌سازی، بر اساس روش زواینخویزن و زادوکس (Zwankhuizen and Zadoks, 2002)، سه پنجره زمانی اصلی و پنج پنجره‌ی زمانی فرعی تعریف شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. هشت متغیر آب و هوایی برای هشت پنجره‌ی زمانی یادشده محاسبه شد و ارتباط آماری (ضریب همبستگی اسپرمن) آن‌ها با وقوع بیماری (متغیر EPI) بررسی شد.

متوسط یا مجموع چندروزه‌ی آن‌ها محاسبه شد (متغیرهای دوره‌ای یا سطح دو) و سپس بر اساس آستانه‌هایی، متغیرهای شرطی (سطح سوم) از متغیرهای سطح دوم ساخته شد. در نهایت، از متغیرهای شرطی منتخب، متغیرهای پیشگو برای مدل پیش‌آگاهی ساخته شد (جدول ۱).

۳- تعریف پنجره‌های زمانی مناسب برای پیش‌آگاهی

ابتدا وضعیت بیماری و تاریخ ظهور آن طی سال‌های قبل بر اساس اطلاعات کارشناسان محلی و کشاورزان پیشرو تهیه شد (جدول ۲). با نگاهی به این جدول، مشخص می‌شود که علائم بیماری طی ۱۷ سال گذشته، از هفته‌ی آخر فروردین تا هفته‌ی آخر اردیبهشت ظاهر شده است. بنابراین، مدل

جدول ۱- متغیرهای مشتق از داده‌های آب و هوایی مورد استفاده در ساخت مدل پیش‌آگاهی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی در منطقه‌ی گرگان.

Table 1. Variables derived from weather data used for developing a forecasting model of potato late blight in Gorgan region.

Concept	Unit	Variable	Level
Mean minimum temperature	Degree centigrade	TM	First (simple)
Mean maximum temperature	Degree centigrade	TX	
Mean average temperature	Degree centigrade	AT	Second (periodic)
Mean minimum relative humidity	%	HM	
Mean maximum relative humidity	%	HX	
Mean average relative humidity	%	AH	
Sum of precipitation	ml	SP	
Sum of rainy days number	day	RD	
Mean minimum temperature of last 5 days	Degree centigrade	TM5d	
Mean maximum temperature of last 3 days	Degree centigrade	TX3d	
Mean average temperature of last 3 days	Degree centigrade	AT3d	
Mean minimum relative humidity of last 5 days	%	HM5d	
Mean maximum relative humidity of last 3 days	%	HX3d	
Mean average relative humidity of last 7 days	%	AH7d	Third (conditional)
Sum of precipitation of last 5 days	ml	SP5d	
Sum of rainy days number of last 3 days	day	RD3d	
Number of days with $TM5d \geq 14$ °C	day	FTM	
Number of days with $TX3d \geq 23$ °C	day	FTX	
Number of days with $AT3d \geq 17.6$ °C	day	FAT	
Number of days with $HM5d \geq 59\%$	day	FHM	
Number of days with $HX3d \geq 90\%$	day	FHX	
Number of days with $AH7d \geq 74\%$	day	FAH	
Number of days with $SP5d \geq 5$ ml	day	FSP	
Number of days with $RD3d \geq 2.5$ days	day	FRD	
Sum of scores of FTM + FTX + FAT	score	FT	
Sum of scores of FHM + FHX + FAH	score	FH	
Sum of scores of FRD + FSP	score	FP	
Sum of scores of FH + FT	score	FTH	
Sum of scores of FT + FP	score	FTP	
Sum of scores of FH + FP	score	FHP	
Sum of scores of FH + FT + FP	score	FTHP	
Years with diseases (1) and without disease (0)	score	EP	Dependent

یکی از آزمون‌های بسیار مهم در تعیین کارایی پیش‌بینی متغیرهای پیشگو، تجزیه و منحنی مشخصه عملکرد سیستم (Receiver operating characteristic curve = ROC curve) است که در علوم مختلف کاربرد فراوانی داشته است (Madden *et al.*, 2006). در این منحنی، که نمایش گرافیکی حساسیت در برابر اختصاصیت-۱ است، هر متغیری که بتواند خطوط نزدیک‌تری به قسمت بالای محور افقی و سمت چپ محور عمودی ایجاد نماید، از کارایی پیش‌بینی بالاتری برخوردار است.

جدول ۲- تاریخچه بیماری بادزدگی سیب‌زمینی طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ در منطقه‌ی گرگان.

Table 2. Disease history of potato late blight from 2003 to 2019 in Gorgan region.

Disease state*	Date of disease appearance	Sowing date	Year
+	2003/04/21	2002/12/10	2003
+	2004/04/24	2003/12/05	2004
-	-	2004/12/22	2005
++	2006/04/28	2005/12/16	2006
+	2007/05/11	2007/01/25	2007
-	-	2004/12/14	2008
+	2009/05/08	2008/12/21	2009
++	2010/04/29	2009/12/29	2010
+	2011/05/18	2010/12/29	2011
-	-	2012/01/11	2012
+	2013/04/23	2012/12/25	2013
-	-	2013/12/23	2014
-	-	2014/12/28	2015
++	2016/05/02	2015/12/24	2016
-	-	2016/12/27	2017
+	2018/04/30	2017/12/26	2018
+	2019/04/14	2018/12/27	2019

* Symbols + and - indicate years with and without disease, and ++ indicates disease outbreak which more than one spray carried out per season.

جدول ۳- مشخصات پنجره‌های زمانی در نظر گرفته شده برای محاسبه‌ی متغیرهای آب و هوایی مورد نیاز برای ساختن مدل پیش‌آگاهی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 3. Characteristics of time windows considered for calculating wether variables needed for developing a forecasting model of potato late blight.

Date	Description	Name
May	Harvest	W01
June to November	Inter season	W02
December to end April	Growing season	W03
July, August and September	Summer	W021
January, Febraury and March	Winter	W031
March and April	Spring	W032
Mid March to April	Spring	W033
April	Spring	W034

۴- تعریف متغیرهای دوره‌ای

بر اساس مدل هایر (Hyre, 1954)، روز مساعد برای بادزدگی (Blight favorable day = BFD) بر اساس سه متغیر دمای کمینه و متوسط و جمع بارش روزانه تعریف شد. در این تحقیق، تلاش شد تا روز مساعد برای بادزدگی جدیدی بر اساس تعداد متغیرهای بیشتری ساخته شود تا متغیر پیشگوی ساخته‌شده، از جامعیت بیشتری برخوردار باشد. برای یافتن بهترین طول پنجره‌ی زمانی مورد نیاز برای تعریف متغیرهای دوره‌ای، میانگین‌ها و جمع‌های ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۴ روزه برای دما و رطوبت نسبی و بارش روزانه محاسبه شد. سپس ارتباط آماری آن‌ها با وقوع بیماری (متغیر EPI) بررسی شد.

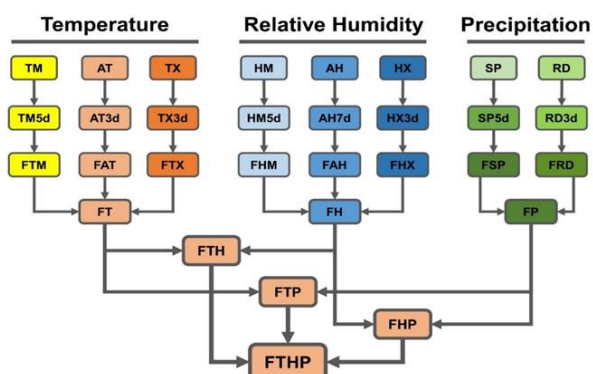
۵- یافتن آستانه‌های شرطی

در ادامه، برای تبدیل متغیرهای دوره‌ای منتخب به نمره‌های روزانه، باید شرط‌هایی بر اساس آستانه‌ی هر کدام از این متغیرها تعریف می‌شد. برای این منظور، بر اساس منابع علمی مرتبط با اپیدمیولوژی بیمارگر و چرخه‌ی زندگی آن، دامنه‌ای از اعداد به عنوان آستانه‌ی هر متغیر در نظر گرفته شد و با مقایسه‌ی ضریب همبستگی روابط معنی‌دار آماری، مناسب‌ترین آستانه برای تعریف شرط مشخص گردید. به‌عنوان مثال، برای یافتن بهترین آستانه‌ی TM5d (میانگین دمای کمینه ۵ روز قبل)، اعداد ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ مورد آزمون قرار گرفت.

۶- روش‌های آماری مورد استفاده برای رسیدن به متغیرهای پیشگو

برای تمایز مقدار متغیرها به تفکیک سال‌های واجد و فاقد بیماری، از روش آزمون همبستگی رتبه‌ای اسپرمن (Spearman Rank Correlation) در نرم‌افزار آماری StatGraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc. 2010) استفاده شد. جهت مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار بر وقوع بیماری نیز از دو روش آماری تجزیه‌ی تابع تشخیص (Discriminant analysis) و رگرسیون لجستیک (Logistic regression) استفاده گردید (Madden *et al.*, 2006).

نمره‌ی صفر می‌گیرد). به‌همین ترتیب، اعداد ۲۳ و ۱۷/۶ درجه سلسیوس، ۵۹، ۹۰ و ۷۴ درصد، ۵ میلی‌متر و ۲/۵ روز، به‌ترتیب به‌عنوان آستانه‌های شرطی برای متغیرهای دوره‌ای RD3d، SP5d، AH7d، HX3d، HM5d، AT3d، TX3d، FAT، FTX، FTM گردید. بدین ترتیب هشت متغیر شرطی FTM، FTX، FAT، FHM، FHX، FAH، FSP و FRD تعریف شد. از تلفیق سه متغیر شرطی مربوط به دما (FTM، FTX و FAT)، رطوبت نسبی (FHM، FHX و FAH) و بارش (FSP و FRD)، به‌ترتیب سه متغیر پیشگوی FT، FH و FP ساخته شد و از ترکیب دوتایی این متغیرها، سه متغیر FTH (ترکیب FT و FH)، FTP (ترکیب FT و FP) و FHP (ترکیب FH و FP) تولید شد و ترکیب هر سه متغیر، به متغیر پیشگوی چهارمی به‌نام FTHP ختم گردید (شکل ۲).



شکل ۲- فلوجارت محاسبه‌ی متغیرهای دوره‌ای، شرطی و پیشگوی متغیرهای آب و هوایی روزانه برای ساختن مدل پیش‌آگاهی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Fig. 2. Flowchart of calculating periodic, conditional and predictor variables from daily weather variables for developing forecasting model of potato late blight.

۴- متغیرهای پیشگو

براساس مفهوم روز مساعد برای بادزدگی، چهار متغیر پیشگو با تلفیق متغیرهای روزانه‌ی دما، رطوبت نسبی و بارش و تعریف شرط‌هایی برای تعیین مساعد یا نامساعد بودن روزها، ساخته شد که خلاصه‌ای از آماره‌های آن‌ها در جدول ۶ و شکل ۳ ارائه شده است.

مدل‌های نهایی با مقایسه‌ی مدل‌های توسعه یافته‌ی معنی‌دار براساس آماره‌هایی نظیر ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا، صحت کلی، میزان حساسیت و اختصاصی بودن انتخاب شد. مدل‌های نهایی توسعه یافته براساس داده‌های موجود (۱۷ سال اخیر)، براساس داده‌های آب و هوایی و وقوع یا عدم وقوع اپیدمی بیماری طی دو سال اجرای تحقیق مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفته، پارامترها تصحیح و به‌روز شد.

نتایج و بحث

۱- پنجره‌های زمانی مناسب برای پیش‌آگاهی

مقایسه‌ی هشت پنجره‌ی زمانی مورد بررسی براساس معنی‌دار بودن ارتباط آماری متغیرهای آب و هوایی با وقوع بیماری (متغیر EPI) نشان داد که پنجره‌ی W034 (اواسط فروردین تا اواسط اردیبهشت)، مناسب‌ترین مقطع زمانی برای جستجو به دنبال متغیرهای پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی است (جدول ۴).

۲- متغیرهای دوره‌ای

مقایسه‌ی طول‌های مختلف پنجره‌های زمانی مورد استفاده برای محاسبه‌ی متغیرهای دوره‌ای نشان داد که پنجره‌های ۵، ۳، ۳، ۵، ۷، ۵ و ۳ روزه، به‌ترتیب، مناسب‌ترین طول پنجره برای تعریف متغیرهای دوره‌ای برای متغیرهای ساده‌ی TM، TX، AT، HM، HX، AH و SP و RD بوده‌اند؛ به‌عنوان مثال، میانگین دمای کمینه‌ی روزانه طی پنج روز (TM5d) و جمع روزهای بارانی طی سه روز (RD3d)، بهترین متغیرهای دوره‌ای برای TM و RD بودند (جدول ۵).

۳- آستانه‌های شرطی برای ساختن متغیرهای شرطی

پس از بررسی آستانه‌های مختلف برای متغیرهای دوره‌ای، بهترین آستانه‌ی TM5d (میانگین دمای کمینه ۵ روز قبل) دمای ۱۴ درجه سلسیوس بود. به‌عبارت دیگر، اگر متغیر دوره‌ای TM5d بزرگ‌تر یا مساوی ۱۴ درجه سلسیوس باشد، آن روز برای بادزدگی مساعد در نظر گرفته می‌شود (و نمره‌ی یک دریافت خواهد کرد، در غیر این صورت

جدول ۴- وضعیت معنی‌دار بودن آماری و ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپرمن متغیرهای آب و هوایی ساده با وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی به تفکیک هشت پنجره‌ی زمانی در طول سال.

Table 4. Status of statistical significance and Spearman rank correlation of weather variables with potato late blight occurrence separated by eight time windows during the year.

Win Variable	Statistic	W01	W02	W03	W021	W031	W032	W033	W034
TM	P-value ¹	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
	r	-0.252	0.476	0.644	0.168	0.588	0.224	-0.420	-0.476
TX	P-value	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	**
	r	-0.140	0.364	0.224	-0.028	0.672	0.112	-0.476	-0.840
AT	P-value	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*
	r	-0.168	0.448	0.448	0.084	0.644	0.196	-0.420	-0.784
HM	P-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*
	r	-0.168	-0.280	0.308	-0.448	0.112	-0.028	0.560	0.700
HX	P-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	r	-0.028	-0.252	0.280	-0.084	0.140	-0.070	0.280	0.448
AH	P-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
	r	-0.224	-0.308	0.364	-0.140	0.140	0.028	0.476	0.672
SP	P-value	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
	r	-0.560	0.056	0.336	-0.098	0.238	0.196	0.476	0.644
RD	P-value	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	*
	r	-0.422	0.141	0.505	0.170	0.084	0.211	0.705	0.677

1. ns: non significant, *: significant ($P \leq 0.05$), very significant ($P \leq 0.01$)

جدول ۵- سطح احتمال معنی‌دار بودن آماری و ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپرمن متغیرهای آب و هوایی دوره‌ای محاسبه‌شده با طول‌های مختلف با وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 5. Probability value of statistical significance and Spearman rank correlation (r) of periodic weather variables calculated with different lengths with potato late blight.

Win. length Variable	Statistic	3	5	7	10	14
TM	P-value ¹	ns	ns	ns	ns	ns
	r	-0.427	-0.452	-0.327	-0.276	-0.176
TX	P-value	**	**	**	*	*
	r	-0.703	-0.678	-0.678	-0.628	-0.502
AT	P-value	*	*	*	*	ns
	R	-0.628	-0.628	-0.603	-0.528	-0.352
HM	P-value	**	**	*	*	*
	r	0.653	0.703	0.628	0.628	0.628
HX	P-value	*	*	*	ns	ns
	r	0.578	0.553	0.502	0.452	0.352
AH	P-value	*	*	**	*	*
	r	0.603	0.628	0.678	0.628	0.628
SP	P-value	*	*	*	*	ns
	r	0.566	0.578	0.528	0.528	0.427
RD	P-value	**	**	**	*	*
	r	0.656	0.655	0.653	0.603	0.541

1. ns: non significant, *: significant ($P \leq 0.05$), very significant ($P \leq 0.01$)

دارد و متغیر FHP فاقد رابطه‌ی معنی‌دار با وقوع بیماری است (جدول ۸). مقایسه‌ی میانگین متغیرها در سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری نیز نشان داد که بهترین تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری، بر اساس متغیر FTP قابل انجام است؛ در حالی که متغیر FHP نتوانست هیچ تفکیکی میان سال‌های دارای بیماری و فاقد آن ایجاد نماید (جدول ۸ و شکل ۴).

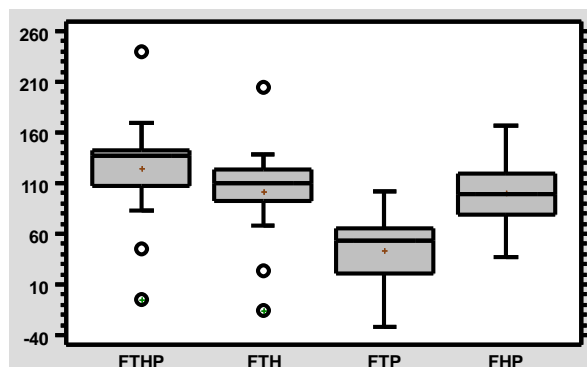
برای تعیین کارایی چهار متغیر پیشگو در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی، ابتدا ضریب همبستگی اسپرمن آن‌ها با متغیر وابسته (EP) تعیین شد (جدول ۷) که نشان داد متغیر FTP دارای بالاترین همبستگی و متغیر FHP فاقد همبستگی معنی‌دار با وقوع بیماری است. نتایج تجزیه‌ی واریانس این متغیرها نیز نشان داد که متغیر پیشگوی FTP قوی‌ترین رابطه‌ی آماری را با وقوع بیماری

مقایسه‌ی منحنی ROC این چهار متغیر، موید نتایج تجزیه‌های قبلی بوده، بهترین کارایی برای متغیر FTP مشخص گردید (شکل ۵). سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم (AUC) نیز همین نتایج را تکرار نمود و مشخص کرد که متغیر FHP فاقد قدرت پیش‌بینی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی است (جدول ۱۰). دو آماره‌ی مهم تجزیه‌ی مشخصه‌ی عملکرد سیستم، حساسیت (Sensitivity) و اختصاصیت (Specificity) هستند که به ترتیب به معنی درصد پیش‌بینی‌های درست سال‌های دارای بیماری و درصد پیش‌بینی‌های درست سال‌های بدون بیماری است (Madden *et al.*, 2006). متغیر FTP با درصد حساسیت و اختصاصیت حدود ۹۲ و ۱۰۰ درصد، بالاترین کارایی برای پیش‌بینی بیماری را نشان داد (جدول ۱۰). میزان حساسیت دو متغیر FTH و FTHP مشابه متغیر FTP بود؛ اما میزان اختصاصیت آن‌دو کمتر بود.

حساسیت و اختصاصیت مدل جانسون (Johnson *et al.*, 1996) که برای پیش‌بینی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی در ایالت واشینگتن آمریکا ساخته شد، به ترتیب معادل ۹۲ و ۸۵ درصد بود (Madden *et al.*, 2006). حساسیت و اختصاصیت مدل سوئدی پیش‌آگاهی بیماری پوسیدگی اسکلوروتینیایی ساقه‌ی کلزا (Twengstrom *et al.*, 1998) به ترتیب معادل ۸۹ و ۹۵ درصد بود. با مقایسه، در می‌یابیم که پارامترهای پیش‌بینی متغیر FTP بسیار مناسب بوده، می‌تواند مدل نتایج قابل اعتمادی را ایجاد نماید.

بدین ترتیب، متغیر پیشگوی FTP دارای بالاترین کارایی برای پیش‌بینی احتمال وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی بود. این متغیر، که همانند متغیر پیشگویی هایر (Hyre, 1954)، از ترکیب دما و بارش روزانه ساخته شده (البته با این تفاوت که در مدل هایر از سه متغیر ساده و در این مدل، از پنج متغیر ساده استفاده می‌شود)، ترکیبی از دو متغیر ترکیبی FT (مرکب از میانگین دمای کمینه، بیشینه و متوسط روزانه) و FP (ترکیب جمع بارش و تعداد روزهای بارانی) است.

در ادامه، نتایج تجزیه‌ی تابع تشخیص و رگرسیون لجستیک، نتایج تجزیه‌های قبلی را تأیید نمود و بهترین تفکیک میان سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری، به ترتیب، با استفاده از متغیرهای پیشگوی FTP، FTH و FTHP به دست آمد؛ اما متغیر FHP فاقد قدرت تفکیک بود (جدول ۹).



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای چهار متغیر پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Fig. 3. Box and whisker plot of four predictor variables for potato late blight.

جدول ۶- خلاصه‌ی آماره‌های چهار متغیر پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 6. Summary statistics of four predictor variables for potato late blight.

Variable	Average	Standard error	Minimum	Maximum
FTHP	124.3	11.90	-5	239
FTH	102.3	10.78	-15	205
FTP	44.1	8.29	-32	102
FHP	101.0	7.59	37	167

جدول ۷- سطح احتمال معنی‌داری و ضریب همبستگی اسپرمن متغیرهای پیشگو با وقوع یا عدم وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 7. Probability value and Spearman rank correlation of predictor variables with potato late blight.

Variable	P-Value	Spearman Rank Correlation
FTHP	0.0311	0.523
FTH	0.0066	0.659
FTP	0.0010	0.795
FHP	0.8513	-0.046

جدول ۸- تجزیه‌ی واریانس و مقایسه‌ی میانگین متغیرهای پیشگو براساس وقوع یا عدم وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 8. Analysis of variance and mean comparison of predictor variables based on potato late blight occurrence.

Variable	Anova		Mean Comparison			
	P-Value	F-ratio	0	se	1	se
FTHP	0.0142	7.57	85.00	17.51	144.00	12.38
FTH	0.0059	10.09	63.17	15.08	121.83	10.66
FTP	0.0000	31.66	4.67	8.57	63.75	6.06
FHP	0.9764	0.00	100.67	13.56	101.17	9.59

جدول ۹- نتایج تجزیه‌ی تابع تشخیص و رگرسیون لجستیک متغیرهای پیشگو براساس وقوع یا عدم وقوع بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 9. Results of discriminant analysis and logistic regression of predictor variables based on potato late blight occurrence.

Variable	Discriminant Analysis			Logistic Regression	
	P-Value	Canonical Correlation	Correctly Classified (%)	P-Value	Correctly Classified (%)
FTHP	0.0143	0.567	83.33	0.0062	32.63
FTH	0.0059	0.622	88.89	0.0011	46.23
FTP	0.0000	0.815	88.89	0.0000	74.80
FHP	0.9764	0.008	44.44	0.9745	0.00

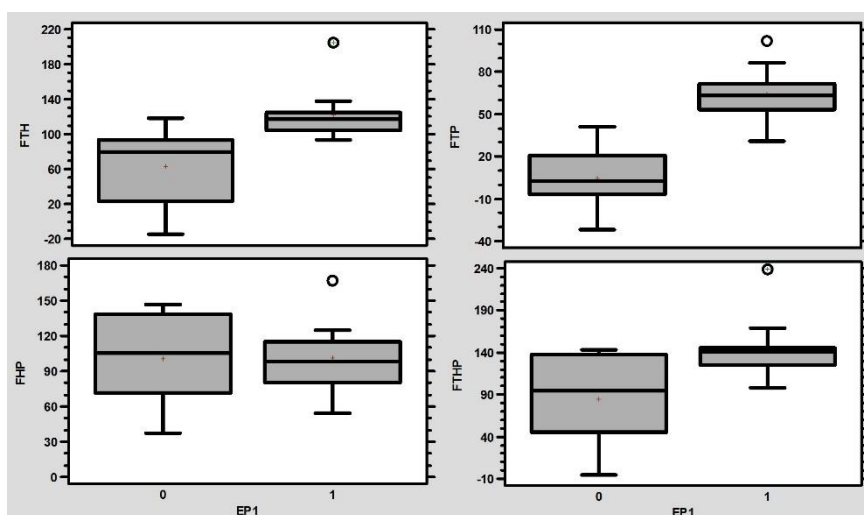
جدول ۱۰- نتایج تجزیه‌ی مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای متغیرهای پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.

Table 10. Results of discriminant analysis and logistic regression of predictor variables based on potato late blight occurrence.

Variable	AUC ¹	SE ²	Z Statistic	P-Value	Youden index J	Sensitivity	Specificity
FTHP	0.819	0.12	2.72	0.0066	0.58	91.670	66.670
FTH	0.903	0.09	4.59	0.0000	0.75	91.670	83.330
FTP	0.986	0.02	24.75	0.0000	0.92	91.670	100.000
FHP	0.528	0.18	0.16	0.8761	0.25	8.330	66.670

1. Area under ROC curve

2. Standard error



شکل ۴- نمودارهای جعبه‌ای چهار متغیر پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی به تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری.

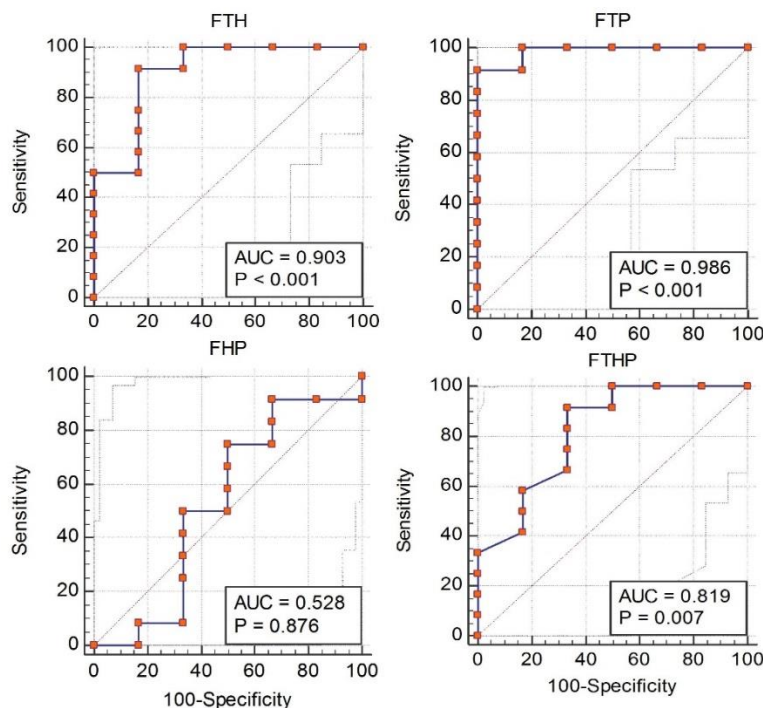
Fig. 4. Box and whisker plot of four predictor variables for potato late blight separated by epidemic and non-epidemic years.

۵- استفاده از متغیرهای پیشگو برای پیش‌آگاهی بیماری

برای استفاده از متغیر پیشگوی FTP دو راه وجود داشت. روش اول، استفاده از نمره‌ی روزانه متغیر بود (از ۲- تا ۴). نمرات روزانه‌ی FTP از روز اول فروردین تا آخر اردیبهشت برای این ۱۸ سال محاسبه شد (شکل ۶). سپس، نمودار میانگین نمرات روزانه‌ی FTP از روز اول فروردین تا آخر اردیبهشت به تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری محاسبه و ترسیم شد (شکل ۷).

روش دوم، استفاده از نمره‌ی تجمعی این متغیر بود (یعنی جمع نمرات روزانه‌ی متغیر از اول فروردین‌ماه). نمرات تجمعی FTP از روز اول فروردین تا آخر اردیبهشت برای این ۱۸ سال محاسبه شد (شکل ۸). سپس، نمودار میانگین نمرات تجمعی FTP از روز اول فروردین تا آخر اردیبهشت به تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری محاسبه و ترسیم شد (شکل ۹).

جمع جبری FTP از ۲- تا ۴ در تغییر است و براساس مقایسه‌ی مقادیر آن، چهار حالت برای هر روز تعیین شد که عبارتند از: نامساعد (نمرات ۲- تا ۱-)، تقریباً مساعد (نمره‌ی صفر)، مساعد (نمرات ۱ تا ۲) و بسیار مساعد (نمرات ۳ تا ۴) که به ترتیب با رنگ‌های سبز، زرد، نارنجی و قرمز نمایش داده می‌شود. در مدل هایپر (Hyre, 1954)، تنها دو حالت مساعد و نامساعد برای هر روز در نظر گرفته می‌شود و بیان وضعیت هر روز به صورت چهار حالت، می‌تواند یکی از برتری‌های مدل پیش‌آگاهی اخیر باشد. در مدل پیش‌آگاهی والین (Wallin et al., 1954) و بلایت کست (Krause et al., 1975) نیز، نتایج پیش‌آگاهی به صورت نمره‌های شدت روزانه بیان می‌شود و جمع نمرات یک دوره‌ی زمانی، تعیین‌کننده‌ی چگونگی پیش‌بینی است. در سیستم اسپارکس (Sparks, 1984) که برای پیش‌بینی طغیان‌های بادزدگی در مناطق شرقی بریتانیا ساخته شده نیز، وضعیت بیماری به صورت نمره‌ی صفر (بدون ریسک) تا ۳ (ریسک بالا) ارایه می‌شود.



شکل ۵- منحنی‌های مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای متغیرهای پیشگوی بیماری بادزدگی سیب‌زمینی.
Fig. 5. Receiver operating characteristic (ROC) curve for predictor variables of potato late blight.

براساس مدل GolPhyto پیش‌بینی شد و به سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان اعلان شد. در ۲۶ فروردین سال ۱۳۹۸ نیز وقوع بیماری به صورت طغیانی اطلاع‌رسانی گردید. صحت پیش‌بینی اعلان شده طی سه سال اخیر توانسته اعتماد عده‌ای از کشاورزان را جلب نماید و این عده، با عدم انجام سمپاشی در سال‌های بدون بیماری و انجام سمپاشی‌های کمتر و در زمان مناسب در سال‌های دارای بیماری، به مدیرت‌مؤثرتر و به صرفه‌تر بیماری نائل شدند. امید است با ایجاد اعتماد عمومی نسبت به نتایج این مدل پیش‌آگاهی، تحولی در مدیریت مؤثر این بیماری خسارت‌زا ایجاد گردد و علاوه بر کنترل مناسب و قابل قبول بیماری، از صرف هزینه‌های اضافی بابت سمپاشی‌های غیر ضروری جلوگیری شود و آلودگی‌های زیست محیطی نیز کاهش یابد.

سپاسگزاری

نگارنده بر خود واجب می‌داند علاوه بر ابراز سپاس خود از همکاران محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان و سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان، از همکاری صمیمانه کشاورزان منطقه نیز قدردانی نماید. همکاری و همراهی بیدریغ و ستودنی کارکنان اداره کل هواشناسی استان گلستان، به‌ویژه آقای مهندس رحمان‌نیا در ارائه داده‌های آب و هوایی در کوتاه‌ترین زمان ممکن، دشواری‌های انجام این تحقیق را برای حقیر به حداقل رساند که از مراجع ایشان تشکر می‌نمایم.

میانگین نمرات روزانه‌ی متغیر پیشگوی FTP به تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری نشان داد که تا تاریخ حدود ۲۰ فروردین، دو منحنی به صورت تقریباً مشابه بوده‌اند؛ اما از حدود ۲۲ فروردین‌ماه، از یکدیگر تفکیک شده‌اند (شکل ۷). مقایسه‌ی منحنی‌های میانگین نمرات تجمعی متغیر پیشگوی FTP به تفکیک سال‌های دارای بیماری و بدون بیماری نیز نشان داد که از حدود ۱۱ فروردین، دو منحنی شروع به جدا شدن از یکدیگر نمودند و در حدود ۲۰ فروردین، تفکیک آشکاری از هم نشان دادند و با گذشت زمان، فاصله‌ی دو منحنی از یکدیگر بیشتر شد (شکل ۹). بدین ترتیب، با ترسیم منحنی نمرات روزانه و تجمعی FTP هر سال و مقایسه‌ی روند آن با دو نمودار یاد شده (شکل‌های ۷ و ۹)، می‌توان از حدود نیمه‌ی فروردین‌ماه، وضعیت بیماری را پیش‌بینی نمود. تفکیک دقیق‌تر منحنی‌ها در حدود ۲۰ فروردین اتفاق افتاد؛ بدین ترتیب، حداقل یک هفته قبل از ظهور علائم بیماری، می‌توان وقوع یا عدم وقوع بیماری را پیش‌بینی نمود و با صدور اطلاعیه‌های ترویجی و هشدارهای خبری، آمادگی لازم برای مقابله با بیماری را در کارشناسان و کشاورزان ایجاد نمود.

این مدل پیش‌آگاهی با نام گلفیتو (GolPhyto) نام‌گذاری شد تا اشاره‌ای به استان گلستان و نام بیمارگر (*Phytophthora*) باشد. طی سه سال اخیر، این کار توسط مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان انجام شد. به‌عنوان مثال، در ۲۸ فروردین سال ۱۳۹۶، عدم وقوع بیماری

References

AGHAJANI, M. A. 2012. Probability of disease occurrence for potato late blight in Gorgan (Golestan province, Iran) based on weather conditions. *Applied Research in Plant Protection* 1:67-80.

AGHAJANI, M. A. 2014. A forecasting model for potato late blight in Gorgan. *Journal of Plant Production Research* 21:99-116.

AGHAJANI, M. A. 2015. Study of efficacy of Hyre and Wallin models for predicting potato late blight in Gorgan. *Research in Plant Pathology* 3:1-17.

- AGRIOS, G. N. 2005. Plant Pathology. Elsevier Academic Press. USA, New York.
- AHMADI, K., H. EBADZADEH, H. ABDESHAH, A. KAZEMIAN, and M. RAFIEE, 2018. Stat book of Agriculture, cropping year 2016-2017. Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran. 116p.
- ANONYMOUS. 2012. Forecasting models for late blight of potato and tomato. UC IPM Online: <http://ipm.ucanr.edu/DISEASE/DATABASE/potatolabteblight.html>.
- BEAUMONT, A. 1947. The dependence of the weather of the dates of outbreak of potato blight epidemics. Transactions of the Britain Mycological Society 31: 45-53.
- CAMPBELL, C. L., and L. V. MADDEN, 1990. Introduction to Plant Disease Epidemiology. John Wiley & Sons. USA, New York.
- COOK, H. T. 1949. Forecasting late blight epiphytotics of potatoes and tomatoes. Journal of Agricultural Research 78:554-563.
- FAO, 2019. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO, 2019. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- HYRE, R. A. 1954. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. Plant Disease Reporter 38:245-253.
- HYRE, R. A. 1955. Three methods of forecasting late blight of potato and tomato in northeastern United States. American Potato Journal 32:362-371.
- HYRE, R. A. 1957. Forecasting downy mildew of lima bean. Plant Disease Reporter 41:7-9.
- JOHNSON, D. A., J. R. ALLDREDGE, and D. L. VAKOCH, 1996. Potato late blight forecasting models for the semiarid environment of south-central Washington. Phytopathology 86:480-484.
- MADDEN, L. V., G. HUGHES, and F. Van Den Bosch, 2006. The study of plant disease epidemiology. 421p. APS press, USA.
- SCHUMANN, G. L., and C. J. D'ARCY, 2005. Late blight of potato and tomato. in: The Plant Health Instructor. APS Press.
- SOHEILI MOGHADAM, B., H. KARBALAEI KHIAMI, and D. HASSANPANAH, 2016. Potato diseases in Ardabil and their integrated pest management. Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Center, 110p.
- SPARKS, W. R. 1984. The use of 'Critical' weather periods in the prediction of potato blight outbreaks. Agricultural Memorandum No. 1020, Neterological Office, Bracknell.
- TWENGSTROM, E., R. SIGVALD, C. SVENSSON, and J. YUEN, 1998. Forecasting Sclerotinia stem rot in spring sown oilseed rape. Crop Protection 17: 405-411.
- WALLIN, J. R., and W. G. HOYMAN, 1954. Forecasting potato late blight in North Dakota. North Dakota Agr. Exp. Sta. Bimonth. Bull. 16:226-231.
- ZARGARZADEH, F., and S. MOHAMMADI, 2016. A forecasting model for potato late blight in Ardebil. Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture) 39:15-24.
- ZWANKHUIZEN, M. J., and J. C. ZADOKS, 2002. *Phytophthora infestans*'s 10-year truce with Holland: a long-term analysis of potato late-blight epidemics in the Netherlands. Plant Pathology 51:413-423.