

## شناسایی خانواده ژنی *G2-like* و اعضای کاندید در پاسخ به بیماری سفیدک پودری در گندم

### In silico analysis of *like-G2* gene family and identification of responsive members in wheat to powdery mildew infection

پانته آ وثوق محبی<sup>۱</sup>، مهدی زهراوی<sup>۲\*</sup>، مهدی چنگیزی<sup>۱</sup>، شهاب خاقانی<sup>۱</sup>، زهراسادات شبیر<sup>۳</sup>

۱- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار، دانشیار، گروه ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، بخش تحقیقات ژنتیک و بانک ژن گیاهی ملی ایران، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- دانشیار، گروه زیست‌شناسی سیستم‌ها، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

Vosough-Mohebbi P<sup>1</sup>, Zahravi M<sup>\*2</sup>, Changizi M<sup>1</sup>, Khaghani Sh<sup>1</sup>, Shobbar ZS<sup>3</sup>

1- PhD Student, Assistant Professor, Associate Professor, Department of Genetics and Plant Breeding, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran

2- Assistant Professor, Department of Genetics and National Plant Gene Bank of Iran, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3- Associate Professor, Department of Systems Biology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

\* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mzahravi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

### چکیده

گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در جهان و ایران محسوب می‌شود و سفیدک پودری گندم، یکی از بیماری‌های مهم در گندم است که خسارت قابل توجهی را به محصول وارد می‌سازد. ژن‌های رمزکننده عوامل رونویسی، کاندیدای مناسبی برای دست‌ورزی ژنتیکی و اصلاح ارقام مقاوم به تنش‌های محیطی می‌باشند. اخیراً، مطالعات نشان داده است که اعضاء خانواده ژنی *like-G2* در گیاهان در پاسخ به پاتوژن‌ها نقش دارند. لذا به‌منظور، شناسایی اعضاء خانواده ژنی *like-G2* در گندم نانوايي و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها، اطلاعات مربوط به خانواده پروتئینی *like-G2* از پایگاه‌های اطلاعاتی نظیر TFDB و Ensembl جمع‌آوری شد. سپس، از اعضای این خانواده ژنی در برنج و آرآیدوپسیس بر علیه پروتئین‌ها و ژنوم گندم استفاده شد و پس از حذف توالی‌های تکراری، ۸۳ مکان ژنی رمزکننده ۱۳۶ رونوشت پروتئینی شناسایی شد. درخت فیلوژنی ترسیمی بر اساس توالی‌های پروتئینی این خانواده ژنی در گندم و ۶ توالی پروتئینی شناخته شده در سایر گیاهان با روش نزدیک‌ترین همسایه‌ها، این خانواده را به ۶ گروه طبقه‌بندی نمود. بر اساس گروه‌بندی اعضاء، پیش‌بینی می‌شود که گروه I، II و V به ترتیب در فرایندهای پاسخ به بیماری سفیدک پودری، در رشد و توسعه کلروپلاست، پاسخ به تنش‌های زیستی و زمان گلدهی دخیل هستند. پیش‌بینی موتیف‌ها در این خانواده نشان داد که اغلب اعضاء خانواده ژنی *like-G2* در یک گروه، شامل ترکیبات موتیفی مشابهی هستند که دلالت بر صحت گروه‌بندی در درخت فیلوژنی و عملکرد مشابه اعضاء یک گروه دارد. توزیع فراوانی اعضاء خانواده ژنی *like-G2* گندم روی کروموزوم‌ها نشان داد که اعضاء این خانواده روی کلیه کروموزوم‌های گندم وجود دارد. بیشترین و کمترین تعداد اعضاء این خانواده به ترتیب روی کروموزوم 6B و کروموزوم‌های 3D و 3A قرار دارد. همچنین، تجزیه و تحلیل ساختار ژن‌های آن‌ها نشان داد که تعداد اینترون در گروه‌ها از ۰ تا ۸ عدد متغیر است.

### واژه‌های کلیدی

بیماری سفیدک پودری  
خانواده ژنی *G2-like*  
درخت فیلوژنتیکی  
گندم

## مقدمه

منطقه تنظیم رونویسی<sup>۳</sup> هستند که با سایر اجزاء دستگاه رونویسی ارتباط برقرار می‌کنند تا دسترسی RNA پلیمرز به راه‌انداز<sup>۴</sup> ژن را آسان یا مسدود کنند (Udvardi et al. 2007). در حقیقت، عوامل رونویسی انتقال اطلاعات ژنتیکی از DNA به RNA را با فعال یا سرکوب رونویسی کنترل می‌کنند و با تنظیم مسیرهای مختلف سیگنالینگ، نقش مهمی در دفاع از گیاهان ایفا می‌کنند (Xu et al. 2007; Udvardi et al. 2011). تاکنون، ۶۴ خانواده عامل رونویسی در سلسله گیاهان شناسایی شده است که اعضای مختلف یک خانواده، اغلب پاسخ‌های مختلفی به محرک‌های متفاوت محیطی می‌دهند (Pérez-Rodríguez et al. 2010; Nakashima, Ito, and Yamaguchi-Shinozaki 2009). عوامل رونویسی نظیر برخی از اعضاء خانواده‌های WRKY، NAC، G2-like و C3H، MYB، GATA، ERF/AP2، ZIP<sup>۵</sup>، bHLH<sup>۶</sup> (Guo et al. 2007; Curto Rubio et al. 2015; Tan et al. 2018). عوامل رونویسی Golden2-like (GLK) از ابرخانواده GARP می‌باشند که جزء عوامل رونویسی Myb محسوب می‌شوند و رابطه مستقیمی با رشد کلروپلاست در سلسله گیاهان دارند (Chen et al. 2016). ژن Golden2 اولین بار در ذرت کشف شد که نقش کلیدی در توسعه کلروپلاست داشت (Langdale and Kidner 1994) و مطالعات بعدی نشان داد که این ژن، نقش عامل رونویسی را ایفاء می‌کند (Hall et al. 1998). پس از آن، بسیاری از ژن‌های Golden2-like در سایر گیاهان نظیر آرابیدوپسیس (Tang et al. 2012)، فلفل (Brand et al. 2014) و گوجه فرنگی (Powell et al. 2012) شناسایی شدند. این خانواده در برنج، ذرت، تنباکو به ترتیب ۶، ۵۹ و ۸۹ عضو دارد (Qin et al. 2021; Bhutia et al. 2020; Liu et al. 2016). اغلب ژن‌های G2-like دارای دو دمین هستند که دمین متصل شونده Myb-DNA<sup>۸</sup> شامل منطقه HLH<sup>۹</sup> است و این منطقه از دو مارپیچ حفاظت شده

گندم، سومین غله اصلی در جهان محسوب می‌شود که ۹۵٪ از زمین‌های زیر کشت گندم در جهان به گندم هگزاپلوئید نانوائی (*Triticum aestivum* L.) و ۵٪ به گندم تتراپلوئید دوروم تعلق دارد (Reynolds, Gutiérrez-Rodríguez, and Larqué- (Saavedra 2000; Shewry 2009). گندم با دارا بودن اسیدهای آمینه ضروری، مواد معدنی، ویتامین‌ها و ترکیبات فیبری، به‌طور گسترده‌ای مورد تغذیه انسان قرار می‌گیرد و یک سوم جمعیت جهان بیش از نیمی از کالری و نزدیک به نیمی از پروتئین مصرفی خود را از گندم تامین می‌کنند (Shewry 2009; Dhanda, Sethi, and Behl 2004). پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ به ترتیب به ۸ و ۹ میلیارد نفر خواهد رسید و برای تامین مواد غذایی جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰، محصول گندم می‌بایست سالیانه ۲٪ در واحد سطح افزایش یابد که بخشی از این افزایش محصول از طریق اصلاح گندم در برابر از دست دادن ۲۵٪ سالیانه از محصول توسط عوامل محیطی می‌تواند محقق شود (FAO 2016; Gill et al. 2004). از عوامل محیطی که موجب اثرات نامطلوب نظیر کاهش رشد و محصول گندم می‌شود، می‌توان به شرایط آب و هوایی، عناصر غذایی، آلاینده‌ها، آفات، عوامل بیماری‌زای گیاهی و علف‌های هرز اشاره کرد (Wiese 1987; Kong et al. 2020).

گیاهان برای بقاء خود در تنش‌های محیطی، شبکه سیگنالینگ پیچیده‌ای را توسعه می‌دهند که سیگنال‌ها را از محیط اطراف خود دریافت و با بیان ژن‌های پاسخ دهنده به تنش، به تغییرات محیط اطراف خود پاسخ می‌دهند (Xu et al. 2011). ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش‌های محیطی به دو گروه؛ ژن‌های مرتبط به متابولیسم سلولی و تحمل به تنش، و ژن‌های تنظیمی رمزکننده پروتئین‌های کینازی، فسفاتازها و یا عوامل رونویسی<sup>۱</sup> طبقه‌بندی می‌شوند (Cheong et al. 2003). عوامل رونویسی، حدود ۷ درصد از توالی رمزشونده ژنوم گیاهان را به‌خود اختصاص می‌دهند که نشان‌دهنده پیچیدگی تنظیم در سطح رونویسی است. به‌طور معمول، عوامل رونویسی دارای دمین متصل شونده به DNA<sup>۲</sup> و

<sup>3</sup> Transcriptional Regulation Region (TRR)

<sup>4</sup> promoter

<sup>5</sup> basic Helix-Loop-Helix

<sup>6</sup> basic leucine zipper

<sup>7</sup> Ethylene Response Factor

<sup>8</sup> Myb-DNA binding domain

<sup>9</sup> helix-loop helix

<sup>1</sup> Transcription factors

<sup>2</sup> DNA binding domain

به‌ویژه استان‌های شمالی خسارت قابل توجهی وارد می‌سازد (Zahravi et al. 2018). مقاومت به سفیدک پودری در گونه‌های مختلف گیاهان مطالعه شده است اما مکانیسم مولکولی آن تاکنون شناسایی نشده است. تنظیم رونویسی ژن‌های گیاهی گام اصلی در پاسخ‌های دفاعی گیاه محسوب می‌شوند، از این‌رو شناسایی مکانیسم‌های پیچیده تنظیمی که بیان ژن‌های دفاعی را کنترل می‌کنند، برای درک اثر متقابل<sup>۴</sup> ایتراکشن گیاه و پاتوژن ضروری است (Guo et al. 2018). (Vosough-Mohebbi et al. 2020). با تجزیه و تحلیل داده ریزآرایه موجود که حاصل از برگ‌های ژنوتیپ حساس و مقاوم گندم در مرحله گیاهچه‌ای، قبل و ۱۲ ساعت بعد از تلقیح با عامل بیماری زای سفیدک پودری بودند (Xin et al. 2011)، ۱۵ ژن رمزکننده عامل‌های رونویسی که در پاسخ به سفیدک پودری در گندم دخیل هستند را شناسایی کردند و بیان نسبی آن‌ها را قبل و ۱۲ ساعت بعد از تلقیح با عامل بیماری‌زای سفیدک پودری در ژنوتیپ‌های حساس و مقاوم به سفیدک پودری تایید نمودند. یکی از ژن‌های رمزکننده این عوامل رونویسی، عضوی از اعضای خانواده ژنی *G2-like* (*Golden2-like*) بود که بیان آن در هر دو ژنوتیپ بعد از تلقیح با سفیدک پودری افزایش یافت اما میزان بیان در ژنوتیپ مقاوم به‌مراتب نسبت به ژنوتیپ حساس بیشتر بود که نشان‌دهنده فعال بودن این ژن رمزکننده عامل رونویسی در ایجاد مقاومت به سفیدک پودری در گندم می‌باشد. از آنجایی که تاکنون، اعضای این خانواده ژنی در گندم شناسایی نشده است، هدف اصلی از این تحقیق شناسایی اعضای خانواده ژنی *G2-like* در گندم نانویی است و همچنین پیش‌بینی عملکرد سایر اعضای این خانواده که در فرایندهای زیستی از جمله دخیل بودن در پاسخ به بیماری جهت معرفی ژن‌های رمزکننده این عوامل رونویسی، برای دست‌ورزی ژنتیکی و اصلاح ارقام مقاوم می‌باشند.

### مواد و روش‌ها

اطلاعات مربوط به خانواده ژنی *G2-like* در گندم از پایگاه اطلاعاتی TFDB<sup>۵</sup> جمع‌آوری شد (Jin et al. 2016). همچنین،

تشکیل شده است که مارپیچ دوم به نسبت مارپیچ اول، بیشتر حفاظت شده است. دمین دیگر، دمین سی-ترمینال که شامل GCT box حفاظت شده است که در دایمر شدن نقش دارد (Rossini et al. 2001; Liu et al. 2016; Qin et al. 2021). عوامل رونویسی *G2-like* (GLK) در بیان ژن‌های هسته‌ای که محصول پروتئینی آن‌ها در کلروپلاست مکان‌یابی می‌شود و همچنین بیان ژن‌های مربوط به فتوسنتز<sup>۱</sup> در گیاهان نظیر ذرت و آرابیدوپسیس نقش دارند (Rossini et al. 2001; Waters et al. 1998; Fitter et al. 2002; Hall et al. 2009). همچنین، ژن‌های این خانواده در تمایز سلولی، پیری، پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی دخیل هستند (Liu et al. 2016; Rauf et al. 2013; Murmu et al. 2014). نقش ژن‌های *GLK* در دفاع علیه بیماری‌ها در بسیاری از مطالعات نیز هم‌عنوان شده است. به‌طور مثال بیان مضاعف ژن *AtGLK1* آرابیدوپسیس منجر به مقاومت بسیار بالا علیه فوزاریوم<sup>۲</sup> و افزایش حساسیت به پاتوژن اوماسیت بیماری زا<sup>۳</sup> در مقایسه با گیاه شاهد شده است (Savitch et al. 2007; Murmu et al. 2014). ژن *OsGLK1* برنج در مقاومت به تهاجم پاتوژن نقش دارد (Nakamura et al. 2009) و همچنین ژن‌های *GLK* نقش مثبت در تحمل به ویروس موزائیک در آرابیدوپسیس دارند (Han et al. 2016). به‌علاوه، یک ژن از خانواده ژنی *G2-like* در میان ژن‌های رمزکننده عوامل رونویسی با بیان افتراقی حاصل از مقایسه پروفایل بیانی دو ژنوتیپ حساس و مقاوم خربزه بعد از تلقیح با سفیدک پودری، گزارش شده است (Hong, Wei-ping, and Jun-Feng 2019).

در بین عوامل بیماری‌زا، قارچ‌ها دارای اهمیت بیشتری هستند زیرا گیاه گندم به بسیاری از بیماری‌های ریشه، طوقه، ساقه و برگ که غالب این بیماری‌ها توسط قارچ‌ها صورت می‌گیرد، حساس می‌باشد (Butler 1961). بیماری سفیدک پودری گندم با عامل *Blumeria graminis* f.sp. *tritici* (*Bgt*) انتشار جهانی داشته و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بیماری‌های این محصول از قرن‌ها پیش، مورد توجه بشر قرار داشته است (Qian et al. 2017) و در ایران نیز، یکی از بیماری‌های مهم گندم بوده و در بعضی مناطق کشور

<sup>1</sup> photosynthesis-related genes

<sup>2</sup> *Fusarium graminearum*

<sup>3</sup> *Hyaloperonospora arabidopsidis* (*Hpa*) *Noco2*

<sup>4</sup> interaction

<sup>5</sup> Plant Transcription Factor Database

بارگزاری شد (Bailey et al. 2009) و محدوده‌های نرم‌افزار برای تعداد موتیف‌ها، کمترین و بیشترین طول موتیف به ترتیب روی ۲۰، ۶ و ۵۰ تنظیم شد. سپس، توالی موتیف‌های حفاظت شده پیش‌بینی شده در MEME، برای پیش‌بینی عملکردشان در پایگاه Pfam مورد جستجو قرار گرفتند (Finn et al. 2016).

### نتایج و بحث

اعضای خانواده ژنی *G2-like* در گندم

از بین ۱۰۰ توالی پروتئینی این خانواده که از پایگاه TFDB جمع‌آوری شد، ۹ توالی پروتئینی دارای دمین مختص این خانواده نبودند که شامل پروتئین‌هایی با Traes\_4AL\_3193F9838، Traes\_4DL\_A0DBF5059.1، Traes\_4DS\_D770B519F.2، Traes\_5BL\_6E13A3C8C.1، Traes\_5DS\_19B90732F.1، Traes\_6BL\_53201E1DB، Traes\_5DL\_82E82F8F9.1، Traes\_7DL\_C39412827.1، Traes\_7BL\_731ABE466.1

بودند. همچنین، توالی‌های پروتئینی با شماره دستیابی TRAES3BF104900050CFD\_t1 با Traes\_4BL\_8719DBF92.1، Traes\_3DS\_0240F189D.1 با Traes\_4BL\_32D8155C6.1، Traes\_4BS\_481D51B66.2 با Traes\_5AL\_0684A2454.1، Traes\_4DL\_C5FFFD54A.1 با Traes\_5BL\_A2C97A02D.3، Traes\_5BL\_A28533902.1 با Traes\_6AS\_4B9F0CBBF.2، Traes\_5DL\_EB47672ED.4 با Traes\_6DS\_C7C1FFE0C.1 یک مکان ژنی روی کروموزوم‌های گندم در پایگاه Ensembl، نقشه‌یابی شدند. همچنین، ۷ ژن از طریق جستجوی واژه *G2-like* در پایگاه Ensembl و ۸۴ ژن از طریق انجام blastها بر علیه توالی‌های پروتئینی و ژنومی گندم در پایگاه Ensembl به دست آمد. توالی‌های تکراری حذف و حضور دمین *G2-like* در آن‌ها تایید شد. در نهایت، ۸۳ مکان ژنی *G2-like* در گندم شناسایی شد که ۱۳۶ رونوشت پروتئینی را رمزدهی می‌نمایند.

مکان‌یابی کروموزومی ژن‌های *G2-like* گندم

مکان ژنی همه ژن‌های این خانواده روی کروموزوم در پایگاه Ensembl مشخص شد و بر اساس مکان کروموزومی آن‌ها،

برای شناسایی اعضای این خانواده ژنی در گندم در پایگاه Ensembl، جستجوی نام ژن بر علیه ژنوم گندم صورت گرفت. سپس، به منظور یافتن اعضاء احتمالی جدید، توالی پروتئینی اعضای این خانواده ژنی در برنج و آرابیدوپسیس دریافت شده از پایگاه اطلاعاتی TFDB بر علیه پروتئین‌ها و ژنوم گندم توسط BLASTP و tBLASTN پایگاه Ensembl مورد جستجو قرار گرفت (Kersey et al. 2016). توالی‌های تکراری به دست آمده به صورت دستی حذف شدند و سپس توالی‌های پروتئینی جهت بررسی حضور دمین متناسب به خانواده پروتئینی *G2-like* در پایگاه اطلاعاتی Pfam و SMART مورد جستجو قرار گرفتند (Finn et al. 2016; Letunic, Doerks, and Bork 2015).

توالی‌های پروتئینی تک به تک اعضاء خانواده ژنی *G2-like* گندم در مقابل ژنوم گندم در پایگاه Ensembl مورد جستجو قرار گرفتند و مکان هر ژن روی کروموزوم مشخص شده و به صورت شماتیک با اندازه مگاباز توسط نرم‌افزار MapChart ترسیم شد (Voorrips 2002). توالی‌های ژنی و همچنین توالی‌های رمز شونده<sup>۱</sup> هر ژن از پایگاه مذکور دریافت و برای مشخص شدن نواحی برش ایترونی<sup>۲</sup> در سرور Gene structure قرار گرفتند (Hu et al. 2015).

توالی‌های پروتئینی خانواده *G2-like* گندم (بلندترین رونوشت از هر عضو) به همراه دو عضو شناخته شده در آرابیدوپسیس (At2g20570 (AtGLK1) و At5g44190 (AtGLK2))، سه عضو برنج (LOC\_Os09g12750 (OsHPL3)، LOC\_Os01g13740 (OsGLK1) و LOC\_Os06g24070 (OsGLK2)) و AAK50392 (ZmGLK1) با هم هم‌ردیف شدند. درخت فیلوژنی با روش اتصال همسایه<sup>۳</sup> و آزمون خود راه‌اندازی<sup>۴</sup> با ۱۰۰۰ تکرار توسط نرم‌افزار Mega7 ترسیم شد (Kumar et al. 2006).

توالی‌های پروتئینی اعضاء این خانواده ژنی در گندم (بلندترین توالی پروتئینی رمزشونده توسط آن ژن)، برای تشخیص موتیف‌های حفاظت شده در توالی‌ها در نرم‌افزار MEME

<sup>1</sup> coding sequences

<sup>2</sup> intron splicing sites

<sup>3</sup> Neighbor-joining

<sup>4</sup> Bootstrap

گندم روی کروموزومها نشان می‌دهد که حضور اعضاء این خانواده روی کلیه کروموزومهای گندم وجود دارد. بیشترین تعداد ژن *G2-like* (۸ عضو) روی کروموزوم 6B و کمترین تعداد ژن (۱) روی کروموزوم 3D و 3A قرار گرفتند.

نام‌گذاری جدید برای اعضاء این خانواده در نظر گرفت. بدین صورت که نام جدید (*TaG1* الی *TaG83*) است و اعداد اعشاری برای رونوشت ژنها استفاده شد (*TaG1.1*) (جدول-۱). مکان ژنی خانواده ژنی *G2-like*، به صورت شماتیک با اندازه مگاباز ترسیم شد (شکل ۱). توزیع فراوانی اعضاء خانواده ژنی *G2-like*

جدول ۱- اطلاعات مربوط به خانواده ژنی *G2-like* گندم

| Gene Name    | Transcript Name | Ensembl transcript ID | TFDB ID                 | Gene Name      | Transcript Name | Ensembl transcript ID | TFDB ID                |
|--------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| <i>TaG1</i>  | <i>TaG1.1</i>   | TraesCS1A02G305500.1  | Traes_1AL_2CFBBD60E.2   | <i>TaG35</i>   | <i>TaG35.1</i>  | TraesCS5A02G068900.1  | Traes_5AS_12F8B3DEF.3  |
|              | <i>TaG1.2</i>   | TraesCS1A02G305500.2  |                         |                | <i>TaG35.2</i>  | TraesCS5A02G068900.2  |                        |
|              | <i>TaG2.1</i>   | TraesCS1A02G309200.1  | Traes_1AL_2EDF05396.2   |                | <i>TaG36</i>    | <i>TaG36.1</i>        | TraesCS5A02G153000.1   |
| <i>TaG2</i>  | <i>TaG2.2</i>   | TraesCS1A02G309200.2  |                         | <i>TaG37</i>   | <i>TaG37.1</i>  | TraesCS5A02G178600.1  | Traes_5AL_6F77CFB03.2  |
|              | <i>TaG2.3</i>   | TraesCS1A02G309200.3  |                         | <i>TaG38</i>   | <i>TaG38.1</i>  | TraesCS5A02G401600.1  | Traes_5AL_D98C7CE92.1  |
|              | <i>TaG3.1</i>   | TraesCS1B02G216600.1  | Traes_1BL_E2629CBC1.1   | <i>TaG39</i>   | <i>TaG39.1</i>  | TraesCS5B02G068000.1  | Traes_5BS_82133897D.2  |
| <i>TaG4</i>  | <i>TaG4.1</i>   | TraesCS1B02G316200.1  | Traes_1BL_C0F4A948C.2   | <i>TaG40</i>   | <i>TaG40.1</i>  | TraesCS5B02G075300.1  | Traes_5BS_C9EA93E10.1  |
|              | <i>TaG4.2</i>   | TraesCS1B02G316200.2  |                         | <i>TaG41</i>   | <i>TaG41.1</i>  | TraesCS5B02G151800.1  | Traes_5BL_0C6735099.1  |
| <i>TaG5</i>  | <i>TaG5.1</i>   | TraesCS1B02G320000.1  | Traes_1BL_8E8190A0F.1   | <i>TaG42</i>   | <i>TaG42.1</i>  | TraesCS5B02G176200.1  | Traes_5AL_0684A2454.1, |
|              | <i>TaG5.2</i>   | TraesCS1B02G320000.2  |                         | <i>TaG43</i>   | <i>TaG43.1</i>  | TraesCS5B02G176300.1  | Traes_5BL_A28533902.1, |
| <i>TaG6</i>  | <i>TaG6.1</i>   | TraesCS1B02G441800.1  | Traes_1AL_43D709979.1   | <i>TaG44</i>   | <i>TaG44.1</i>  | TraesCS5B02G406300.1  | Traes_5BL_A2C97A02D.3, |
|              | <i>TaG7.1</i>   | TraesCS1D02G305200.1  | Traes_IDL_7589A1385.1   | <i>TaG44.2</i> |                 | TraesCS5B02G406300.2  | Traes_5DL_EB47672ED.4  |
| <i>TaG7</i>  | <i>TaG7.2</i>   | TraesCS1D02G305200.2  |                         | <i>TaG45</i>   | <i>TaG45.1</i>  | TraesCS5B02G407600.1  | Traes_5BL_883AD53FB.1  |
|              | <i>TaG8.1</i>   | TraesCS1D02G308600.1  | Traes_IDL_1141C575C.2   | <i>TaG46</i>   | <i>TaG46.1</i>  | TraesCS5D02G075600.1  | Traes_5DS_39E5EF501.2  |
| <i>TaG8</i>  | <i>TaG8.2</i>   | TraesCS1D02G308600.2  |                         | <i>TaG47</i>   | <i>TaG47.1</i>  | TraesCS5D02G081000.1  | Traes_5DS_13C2391DC.1  |
|              | <i>TaG9.1</i>   | TraesCS2A02G100600.1  | Traes_2AS_28B163E7C.1   | <i>TaG48</i>   | <i>TaG48.1</i>  | TraesCS5D02G183000.1  | Traes_5DL_156E53683.1  |
| <i>TaG10</i> | <i>TaG10.1</i>  | TraesCS2A02G116100.1  | Traes_2AS_4EFA77404.2   | <i>TaG49</i>   | <i>TaG49.1</i>  | TraesCS5D02G411800.1  | Traes_5DL_B2F166A31.2  |
|              | <i>TaG10.2</i>  | TraesCS2A02G116100.2  |                         | <i>TaG50</i>   | <i>TaG50.1</i>  | TraesCS5D02G412800.1  | Traes_5DL_EFE6EFEDF.1  |
| <i>TaG11</i> | <i>TaG11.1</i>  | TraesCS2A02G264800.1  | Traes_2AL_92939B028.1   | <i>TaG51</i>   | <i>TaG51.1</i>  | TraesCS6A02G007300.1  | Traes_6AS_4B9FOCBBF.2, |
|              | <i>TaG11.2</i>  | TraesCS2A02G264800.2  |                         | <i>TaG52</i>   | <i>TaG52.1</i>  | TraesCS6A02G108800.1  | Traes_6DS_C7C1FFE0C.1  |
| <i>TaG12</i> | <i>TaG12.1</i>  | TraesCS2A02G441300.1  | Traes_2AL_8D3A3687D.2   | <i>TaG53</i>   | <i>TaG53.1</i>  | TraesCS6A02G155400.1  | Traes_6AS_DBE4E3146.2  |
| <i>TaG13</i> | <i>TaG13.1</i>  | TraesCS2B02G117800.1  | Traes_2BS_34669CA7B.1   | <i>TaG53.2</i> |                 | TraesCS6A02G155400.2  | Traes_6AS_2F376689A.2  |
| <i>TaG14</i> | <i>TaG14.1</i>  | TraesCS2B02G135600.1  | Traes_2BS_10A8CAB27.2   | <i>TaG53.3</i> |                 | TraesCS6A02G155400.3  |                        |
| <i>TaG15</i> | <i>TaG15.1</i>  | TraesCS2B02G277300.1  | Traes_2BL_EED456A17.1   | <i>TaG54</i>   | <i>TaG54.1</i>  | TraesCS6A02G269000.1  | Traes_6AL_72D2B7C35.1  |
| <i>TaG16</i> | <i>TaG16.1</i>  | TraesCS2B02G459800.1  | Traes_2BL_FA727026F.1   | <i>TaG55</i>   | <i>TaG55.1</i>  | TraesCS6B02G012800.1  | Traes_6BS_2125E90F3.2  |
|              | <i>TaG16.2</i>  | TraesCS2B02G459800.2  |                         | <i>TaG56</i>   | <i>TaG56.1</i>  | TraesCS6B02G137300.1  | Traes_6BS_00D311B94.1  |
| <i>TaG17</i> | <i>TaG17.1</i>  | TraesCS2D02G100100.1  | Traes_2DS_8EA143F67.1   | <i>TaG56.2</i> |                 | TraesCS6B02G137300.2  |                        |
| <i>TaG18</i> | <i>TaG18.1</i>  | TraesCS2D02G259200.1  | Traes_2DL_64EAA3388.1   | <i>TaG57</i>   | <i>TaG57.1</i>  | TraesCS6B02G138200.1  | Traes_6BS_44456AE22.1  |
|              | <i>TaG18.2</i>  | TraesCS2D02G259200.2  |                         | <i>TaG57.2</i> |                 | TraesCS6B02G138200.2  |                        |
| <i>TaG19</i> | <i>TaG19.1</i>  | TraesCS2D02G437600.1  | Traes_2DL_07E54848B.1   | <i>TaG58</i>   | <i>TaG58.1</i>  | TraesCS6B02G183500.1  | Traes_6BS_444F0E79E.1  |
| <i>TaG20</i> | <i>TaG20.1</i>  | TraesCS2D02G488500.1  | Traes_2DL_7B1FE2F5B.1   | <i>TaG58.2</i> |                 | TraesCS6B02G183500.2  |                        |
|              | <i>TaG20.2</i>  | TraesCS2D02G488500.2  |                         | <i>TaG58.3</i> |                 | TraesCS6B02G183500.3  |                        |
| <i>TaG21</i> | <i>TaG21.1</i>  | TraesCS3A02G105500.1  | Traes_3AS_6EEB8D2B2.1   | <i>TaG58.4</i> |                 | TraesCS6B02G183500.4  |                        |
|              | <i>TaG21.2</i>  | TraesCS3A02G105500.2  |                         | <i>TaG59</i>   | <i>TaG59.1</i>  | TraesCS6B02G293700.1  | Traes_6DL_DB1546316.1  |
| <i>TaG21</i> | <i>TaG21.3</i>  | TraesCS3A02G105500.3  |                         | <i>TaG60</i>   | <i>TaG60.1</i>  | TraesCS6B02G296300.1  | Traes_6BL_A3E9C02F0.1  |
|              | <i>TaG21.4</i>  | TraesCS3A02G105500.4  |                         | <i>TaG61</i>   | <i>TaG61.1</i>  | TraesCS6B02G392000.1  | Traes_3DS_981B4E4D9.2  |
|              | <i>TaG21.5</i>  | TraesCS3A02G105500.5  |                         | <i>TaG62</i>   | <i>TaG62.1</i>  | TraesCS6B02G424600.1  | Traes_6BL_5D8EE6802.1  |
| <i>TaG22</i> | <i>TaG22.1</i>  | TraesCS3B02G124100.1  | TRAES3BF104900050CFD_t1 | <i>TaG62.2</i> |                 | TraesCS6B02G424600.2  |                        |
|              | <i>TaG22.2</i>  | TraesCS3B02G124100.2  | , Traes_3DS_0240F189D.1 | <i>TaG62.3</i> |                 | TraesCS6B02G424600.3  |                        |
| <i>TaG23</i> | <i>TaG23.1</i>  | TraesCS3B02G144100.1  | TRAES3BF056900070CFD_t1 | <i>TaG63</i>   | <i>TaG63.1</i>  | TraesCS6D02G097000.1  | Traes_6DS_20D189350.2  |
| <i>TaG24</i> | <i>TaG24.1</i>  | TraesCS3B02G191600.1  | TRAES3BF062500050CFD_t1 | <i>TaG63.2</i> |                 | TraesCS6D02G097000.2  |                        |
|              | <i>TaG24.2</i>  | TraesCS3B02G191600.2  |                         | <i>TaG64</i>   | <i>TaG64.1</i>  | TraesCS6D02G145300.1  | Traes_6DS_45417CBA9.2  |

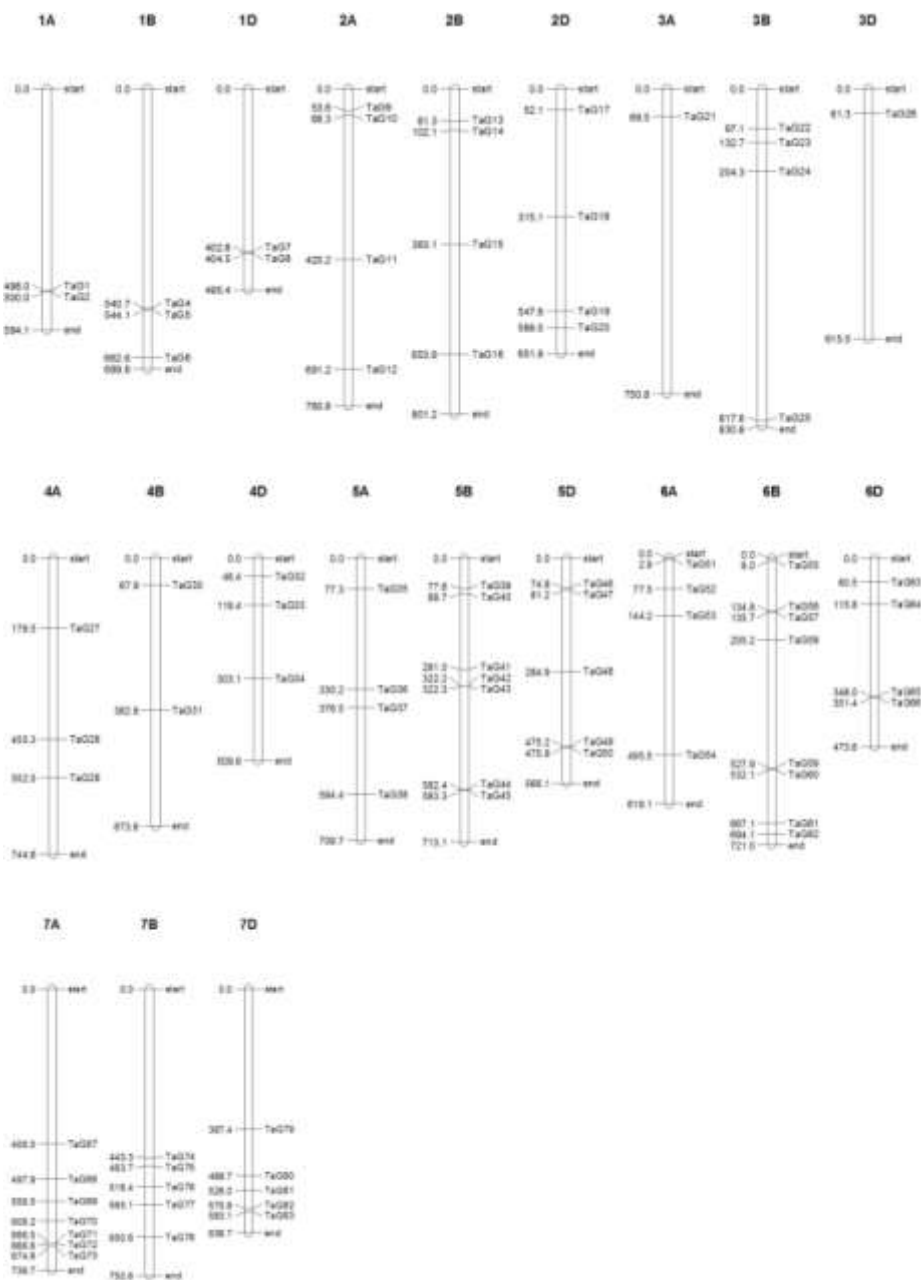
|              |                |                      |  |                |                      |                      |                       |
|--------------|----------------|----------------------|--|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| <i>TaG25</i> | <i>TaG25.1</i> | TraesCS3B02G594300.1 | TRAES3BF076800040CFD_t1  | <i>TaG64.2</i> | TraesCS6D02G145300.2 |                      |                       |
|              | <i>TaG26.1</i> | TraesCS3D02G107800.1 | Traes_3DS_0E0A747A1.1  | <i>TaG64.3</i> | TraesCS6D02G145300.3 |                      |                       |
|              | <i>TaG26.2</i> | TraesCS3D02G107800.2 |  | <i>TaG64.4</i> | TraesCS6D02G145300.4 |                      |                       |
| <i>TaG26</i> | <i>TaG26.3</i> | TraesCS3D02G107800.3 |  | <i>TaG65</i>   | <i>TaG65.1</i>       | TraesCS6D02G245900.1 | Traes_6DL_EAF038D23.2 |
|              | <i>TaG26.4</i> | TraesCS3D02G107800.4 |  |                | <i>TaG65.2</i>       | TraesCS6D02G245900.2 |                       |
|              | <i>TaG27.1</i> | TraesCS4A02G131700.1 | Traes_4AS_7220D33B3.2  | <i>TaG66</i>   | <i>TaG66.1</i>       | TraesCS6D02G248300.1 | Traes_6AL_B2256B77F.2 |
|              | <i>TaG27.2</i> | TraesCS4A02G131700.2 |  |                | <i>TaG66.2</i>       | TraesCS6D02G248300.2 |                       |
|              | <i>TaG27.3</i> | TraesCS4A02G131700.3 |  | <i>TaG67</i>   | <i>TaG67.1</i>       | TraesCS7A02G298700.1 | Traes_7AL_A086258BE.1 |
| <i>TaG27</i> | <i>TaG27.4</i> | TraesCS4A02G131700.4 |  | <i>TaG68</i>   | <i>TaG68.1</i>       | TraesCS7A02G339800.1 | Traes_7AL_6279FCE8B.1 |
|              | <i>TaG27.5</i> | TraesCS4A02G131700.5 |  | <i>TaG69</i>   | <i>TaG69.1</i>       | TraesCS7A02G381900.1 | Traes_7AL_A33076690.3 |
|              | <i>TaG27.6</i> | TraesCS4A02G131700.6 |  | <i>TaG70</i>   | <i>TaG70.1</i>       | TraesCS7A02G415800.1 | Traes_7AL_D45376F32.2 |
|              | <i>TaG27.7</i> | TraesCS4A02G131700.7 |  | <i>TaG71</i>   | <i>TaG71.1</i>       | TraesCS7A02G470100.1 | Traes_7AL_9A1395EC7.1 |
| <i>TaG28</i> | <i>TaG28.1</i> | TraesCS4A02G180900.1 | Traes_4AL_72ECC7747.1  | <i>TaG72</i>   | <i>TaG72.1</i>       | TraesCS7A02G470200.1 | Traes_7AL_BF6FD97DA.1 |
| <i>TaG29</i> | <i>TaG29.1</i> | TraesCS4A02G242600.1 | Traes_4AL_2E26DE3F6.2<br>Traes_4BL_8719DBF92.1,<br>Traes_4BS_481D51B66.2 | <i>TaG73</i>   | <i>TaG73.1</i>       | TraesCS7A02G483100.1 | Traes_7BL_AE0BEF1BE.1 |
|              | <i>TaG30.1</i> | TraesCS4B02G072500.1 |  | <i>TaG74</i>   | <i>TaG74.1</i>       | TraesCS7B02G238000.1 | Traes_7BL_C35CABF69.1 |
| <i>TaG30</i> | <i>TaG30.2</i> | TraesCS4B02G072500.2 |  | <i>TaG75</i>   | <i>TaG75.1</i>       | TraesCS7B02G251400.1 | Traes_7DL_58DDB90E3.1 |
|              | <i>TaG31.1</i> | TraesCS4B02G174600.1 | Traes_4BL_32D8155C6.1,<br>Traes_4DL_CSFFFD54A.1                          | <i>TaG76</i>   | <i>TaG76.1</i>       | TraesCS7B02G284400.1 | Traes_7BL_F20FD5D20.1 |
| <i>TaG31</i> | <i>TaG31.2</i> | TraesCS4B02G174600.2 |  |                | <i>TaG76.2</i>       | TraesCS7B02G284400.2 |                       |
|              | <i>TaG31.3</i> | TraesCS4B02G174600.3 |  | <i>TaG77</i>   | <i>TaG77.1</i>       | TraesCS7B02G315800.1 | Traes_7BL_09DD5A1DC.1 |
|              | <i>TaG32.1</i> | TraesCS4D02G071300.1 | Traes_4DS_808AD9543.2  | <i>TaG78</i>   | <i>TaG78.1</i>       | TraesCS7B02G385700.1 | Traes_7AL_4E68C2154.1 |
| <i>TaG32</i> | <i>TaG32.2</i> | TraesCS4D02G071300.2 |  | <i>TaG79</i>   | <i>TaG79.1</i>       | TraesCS7D02G294400.1 | Traes_7DL_976FAF094.1 |
| <i>TaG33</i> | <i>TaG33.1</i> | TraesCS4D02G131500.1 | Traes_4DS_99EC36CD4.1  | <i>TaG80</i>   | <i>TaG80.1</i>       | TraesCS7D02G378400.1 | Traes_7DL_999E12D5D.1 |
|              | <i>TaG34.1</i> | TraesCS4D02G175000.1 | Traes_4DL_2C27C34AF.2  | <i>TaG81</i>   | <i>TaG81.1</i>       | TraesCS7D02G409100.1 | Traes_7DL_090D0E08E.3 |
| <i>TaG34</i> | <i>TaG34.2</i> | TraesCS4D02G175000.2 |  | <i>TaG82</i>   | <i>TaG82.1</i>       | TraesCS7D02G457500.1 | Traes_7DL_FEA7D3672.1 |
|              | <i>TaG34.3</i> | TraesCS4D02G175000.3 |  | <i>TaG83</i>   | <i>TaG83.1</i>       | TraesCS7D02G470000.1 | Traes_7DL_B26E341BE.2 |
|              | <i>TaG34.4</i> | TraesCS4D02G175000.4 |  | <i>TaG83.2</i> | TraesCS7D02G470000.2 |                      |                       |

درخت فیلوژنی خانواده ژنی *G2-like* در گندم

به منظور گروه‌بندی اعضای این خانواده ژنی در گندم، درخت روابط خویشاوندی بر توالی پروتئینی خانواده ژنی *G2-like* گندم به همراه دو، سه و یک عضو که به ترتیب در آرآبیدوپسیس، برنج و ذرت شناسایی شده بودند، ترسیم شد. درخت فیلوژنی، عوامل رونویسی *G2-like* گندم را به شش زیرخانواده طبقه‌بندی نمود که گروه‌های I، II، III، VI، V و VI این خانواده ژنی، به ترتیب ۱۹، ۱، ۱۹، ۱۵ و ۷ عضو از گندم را به خود اختصاص دادند (شکل). به طور خلاصه، عوامل رونویسی *G2-like* در فتوستت، تمایز سلولی، پیری، پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی فعالیت دارند (Liu et al. 2016; Rauf et al. 2013; Murmu et al. 2009; Waters et al. 2014). ژن‌ها با روابط خویشاوندی نزدیک، اغلب عملکردهای مشابهی از خود نشان می‌دهند. لذا، آنالیز فیلوژنتیک می‌تواند روشی مناسب و موثر برای پیش‌بینی عملکرد ژن‌ها محسوب شود (Wang et al. 2016). در گروه I، عامل رونویسی TaG36 قرار گرفته است که طبق مطالعات پیشین، ژن رمزکننده این عامل رونویسی در پاسخ به عامل بیمارگر

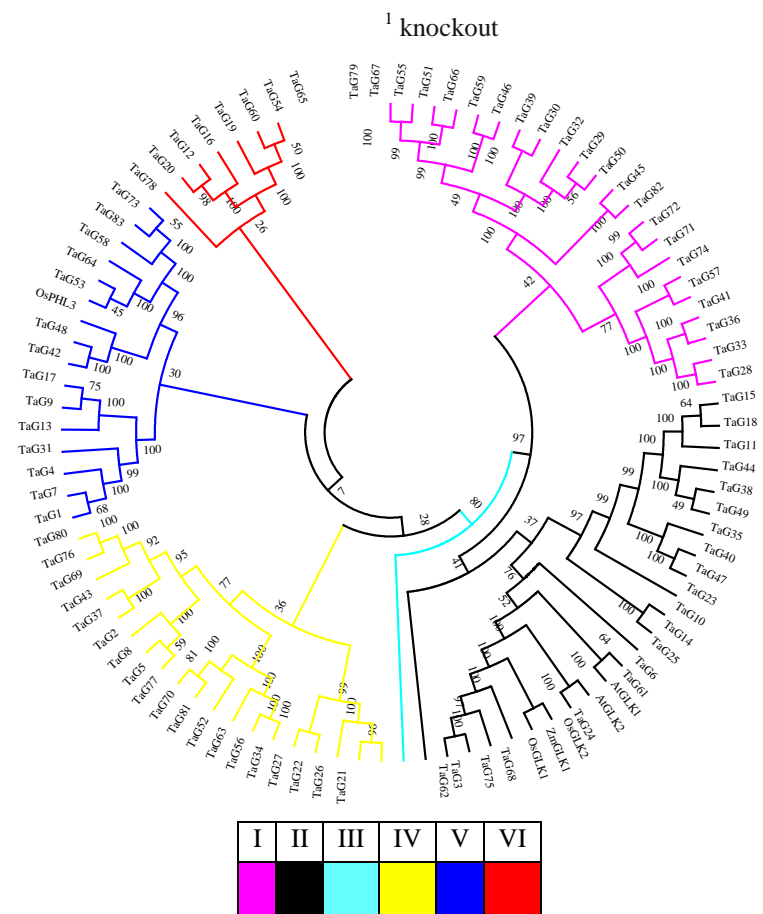
سفیدک پودری در گندم دخیل بوده و میزان بیان این ژن در رقم مقاوم بسیار بالاتر از رقم حساس گزارش شد (Vosough-Mohebbi et al. 2020; Xin et al. 2011). لذا، پیش‌بینی می‌شود که این گروه در پاسخ به تنش‌های زیستی از جمله پاسخ به بیماری سفیدک پودری نقش داشته باشند.

از این رو، می‌توان ژن‌های رمزکننده این عوامل رونویسی را برای بررسی بیشتر تحت تنش زیستی و در نهایت برای دست‌ورزی ژنتیکی و اصلاح ارقام مقاوم در نظر گرفت. عوامل رونویسی AtGLK1 و AtGLK2 در آرآبیدوپسیس، OsGLK1 و OsGLK2 در برنج و ZmGLK1 در ذرت در گروه II قرار گرفتند. ژن‌های *AtGLK1* و *AtGLK2* در تنظیم رشد و توسعه کلروپلاست‌ها ایفای نقش می‌کنند (Yasumura, Moylan, and Langdale 2005; Fitter et al. 2002).



فیلولژی قرار می‌گیرند، دارای توزیع موتیف مشابهی هستند (Fang et al. 2008; Sanjari et al. 2019; Yazdani et al. 2020). همان‌طور که انتظار می‌رفت اغلب اعضاء خانواده ژنی متعلق به یک گروه، شامل ترکیبات موتیفی مشابهی بودند که به نظر می‌رسد احتمالاً دارای عملکرد مشابهی هم باشند (شکل ۳). از ۲۰ موتیف پیش‌بینی شده توسط MEME در توالی‌های پروتئینی اعضاء خانواده ژنی *G2-like* در گندم، تنها عملکرد مولکولی سه موتیف (۱، ۲ و ۱۷) شناسایی شده است و برای دیگر موتیف‌ها، توالی همولوگی در پایگاه Pfam شناسایی نشده است (جدول ۲). اغلب ژن‌های *G2-like* شامل دمین متصل شونده Myb-DNA و دمین سی-ترمینال می‌باشند (Rossini et al. 2001; Liu et al. 2016; Qin et al. 2021). موتیف‌های ۱ و ۱۷ در این خانواده پروتئینی، موتیف متصل شونده به Myb-DNA هستند که همه توالی‌های پروتئینی این خانواده دارای یکی از این دو موتیف بودند.

تنش‌های زیستی نقش داشته باشند. در گروه V، عامل پروتئینی OsHPL3 برنج قرار گرفته است. این ژن در برگ‌ها بیان می‌شود و بیان مضاعف این ژن در برنج‌های روز کوتاه و روز بلند موجب تأخیر در زمان گلدهی شده است. همچنین تخریب<sup>۱</sup> این ژن توسط تکنولوژی CRISPR/Cas9، موجب تسریع در زمان گلدهی در برنج شده است (Zeng et al. 2018). لذا، پیش‌بینی می‌شود اعضاء این گروه در گندم در فرایند گلدهی گندم نقش داشته باشند. با توجه به این امر که هیچ عضو شناخته شده‌ای از اعضاء خانواده پروتئینی در آرکیدوپسیس، برنج و ذرت در گروه‌های III، IV و VI قرار نگرفتند. لذا برای این گروه‌ها عملکردی را نمی‌توان پیش‌بینی نمود. پیش‌بینی موتیف حفاظت شده خانواده پروتئینی *G2-like* در گندم و ساختار ژنی آن‌ها برای درک بهتر تنوع ساختاری پروتئین‌های *G2-like* در گندم، موتیف‌های اضافی حفاظت شده (۲۰ موتیف) در پایگاه MEME پیش‌بینی شد. به‌طور کلی اعضایی که در یک گروه در درخت

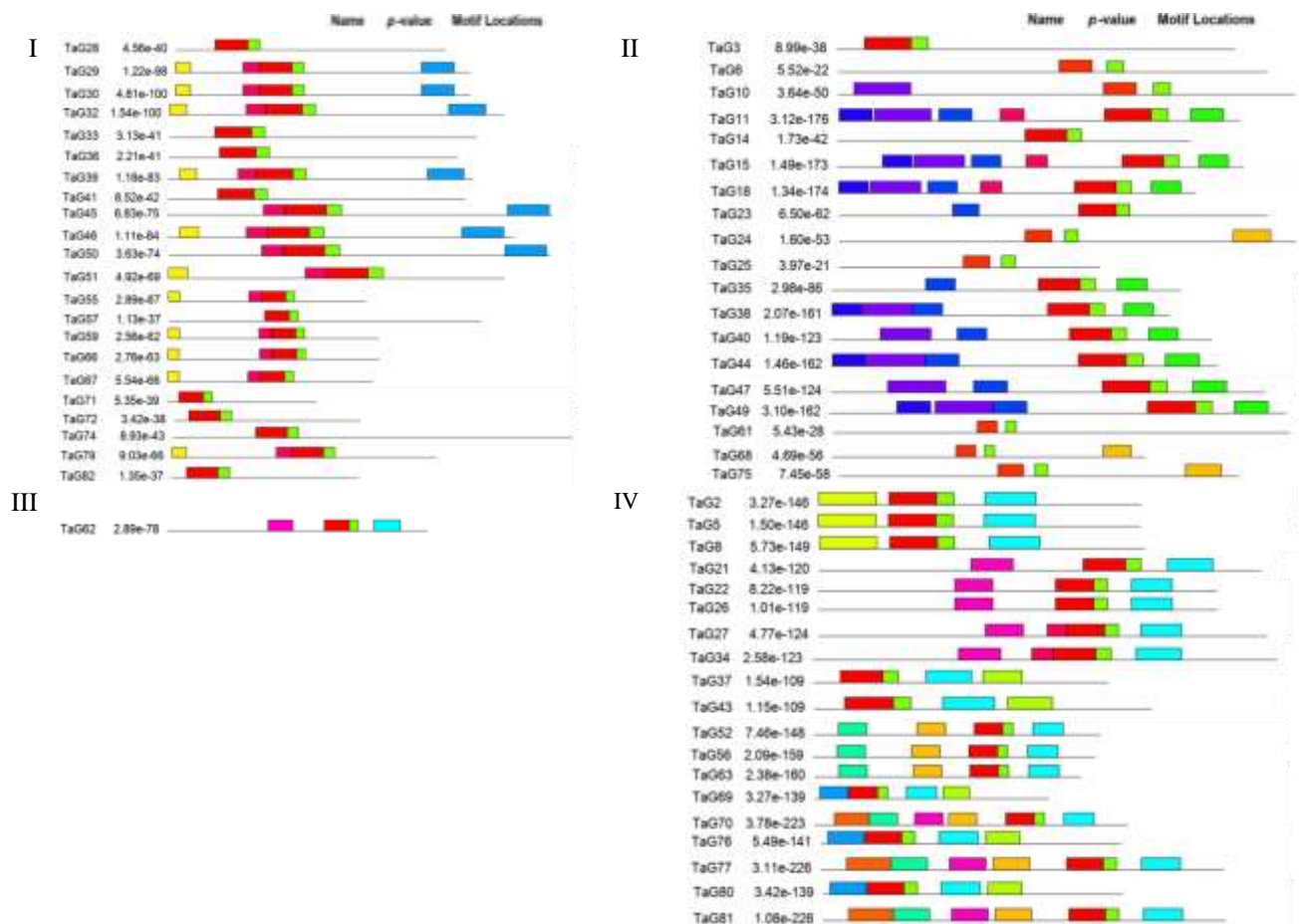


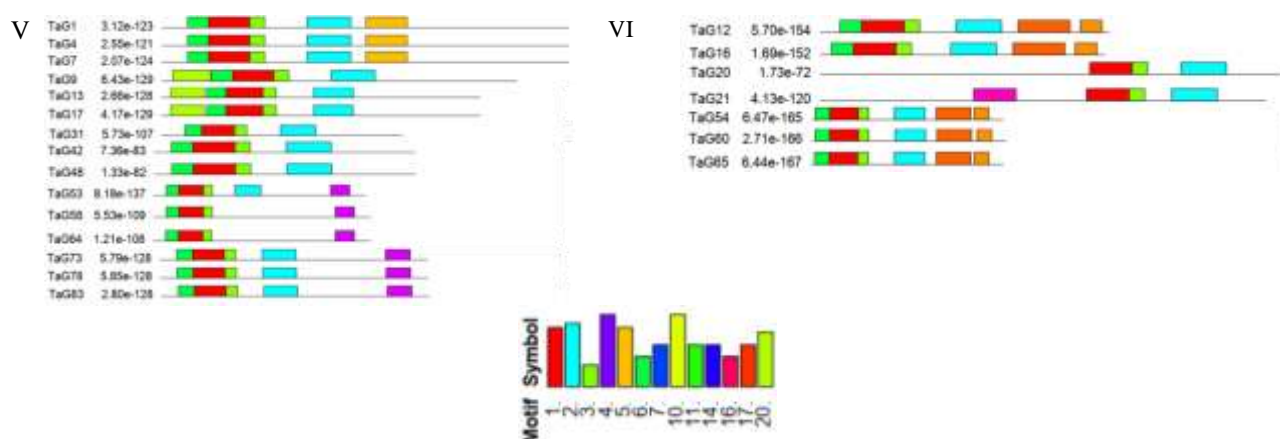
شکل ۲- درخت فیلولژی خانواده پروتئینی *G2-like* گندم (۸۳ عضو) و ۶ پروتئین *G2-like* شناخته شده در آرکیدوپسیس، برنج و ذرت با استفاده از نرم‌افزار Mega7

مشخص شد (شکل ۴). تجزیه و تحلیل ساختار ژن‌های *G2-like* گندم نشان داد که تعداد ایترون در زیرخانواده‌ها از ۰ تا ۸ عدد متغیر است. تغییرات در تعداد ایترون ممکن است یکی از عوامل کلیدی باشد که منجر به تنوع ساختار و عملکرد ژن در دوره تکامل می‌شود (Qin et al. 2021). اکثر ژن‌های این خانواده در ذرت و تنباکو دارای ساختارهای اگزون/ ایترون مشابه در گروه‌های فیلوژنتیکی بودند (Liu et al. 2016; Qin et al. 2021) که اکثر اعضای گروه‌های I، II، III، VI، VII و VI این خانواده ژنی در گندم نیز، به ترتیب دارای ۵، ۴، ۶، ۷، ۵ و ۶ عدد ایترون بودند.

موتیف ۲، موتیف Myb\_CC\_LHEQLE است که در ۴۰ عضو از اعضای این خانواده پروتئینی شناسایی شد. مطالعات نشان دادند که موتیف Myb\_CC\_LHEQLE به سمت منطقه سی ترمینال عوامل رونویسی نوع Myb-CC<sup>۱</sup> قرار گرفته است و این عوامل رونویسی در سیگنالینگ کمبود فسفر و پاسخ به تنش‌های مختلف غیرزیستی و نقش‌های متنوعی را در رشد و توسعه گیاهان دارند (Murmu et al. 2014; Rubio et al. 2001). ساختار ژنی از قبیل تعداد و جایگاه اگزون و ایترون در اعضای خانواده ژنی *G2-like* در گندم بر اساس گروه‌بندی آن‌ها توسط درخت فیلوژنی

<sup>۱</sup> Myb-CC-type transcription factors

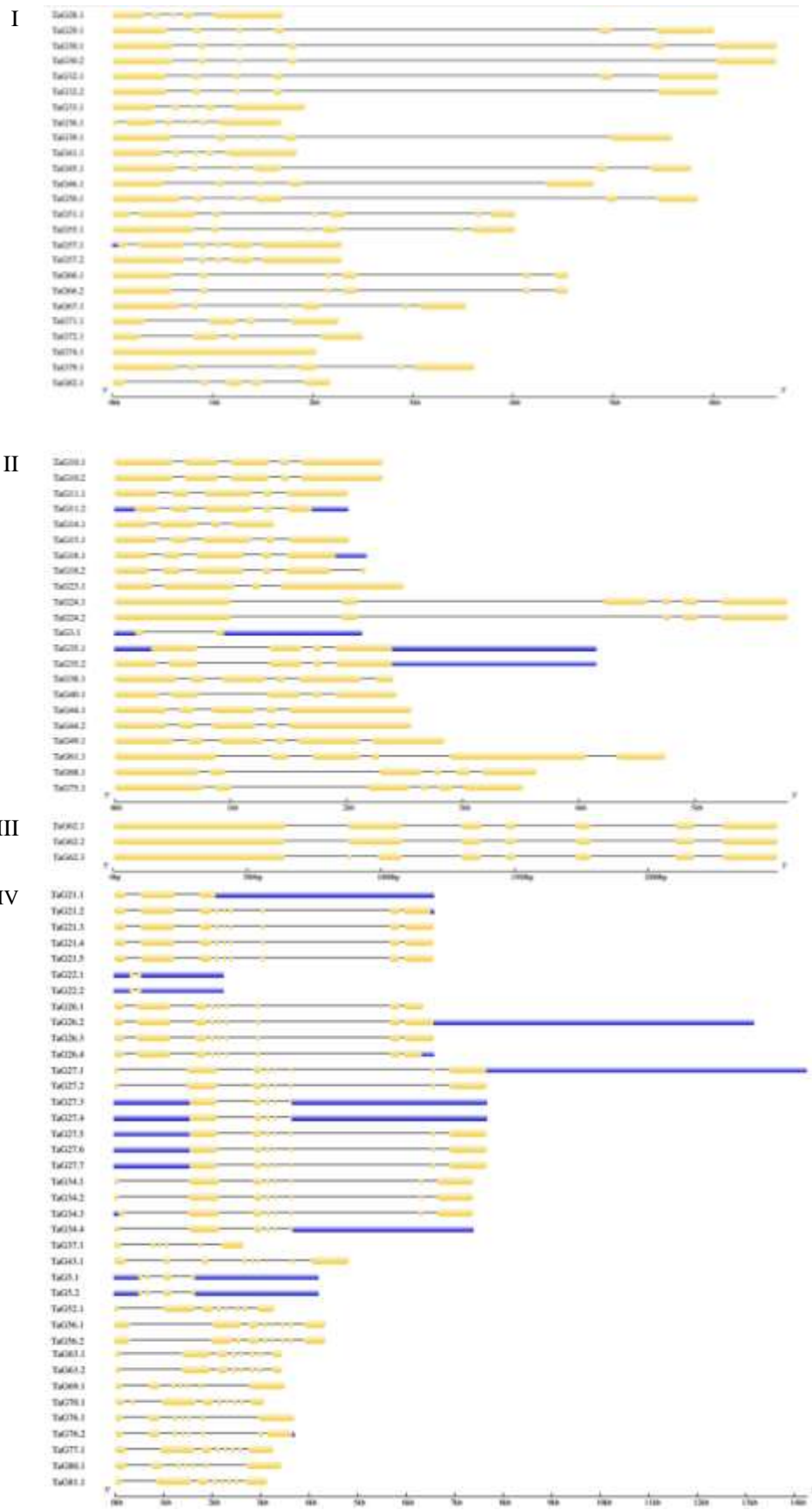


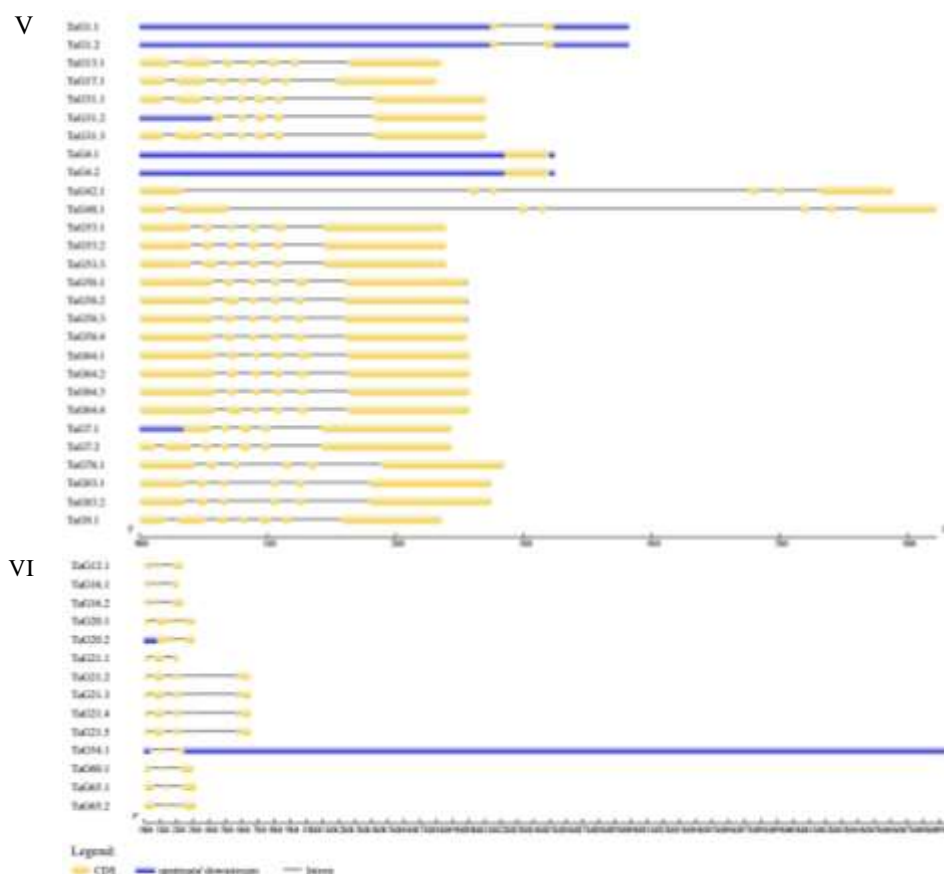


شکل ۳- تصویر شماتیک توالی موتیف‌های پیش‌بینی شده بر اساس گروه‌بندی اعضاء خانواده ژنی *G2-like* در گندم

جدول ۲- اطلاعات مربوط به توالی موتیف‌های پیش‌بینی شده اعضاء خانواده ژنی *G2-like* در گندم در پایگاه MEME

| Motif | Amino acid sequence composition of motif   | site | width | E-value   | Molecular Function |
|-------|--|------|-------|-----------|--------------------|
| 1     | RWTPELHERFV[DE]AVX[QKL]LGGP[DE][KR]ATPK[GS][VI]L[RE]LM[GK]V[KD]GLT[LI]YH   | 76   | 41    | 7.1e-2266 | Myb_DNA-binding    |
| 2     | [QH][LI][NA][ED]AL[RK][ML]Q[MI]EVQ[KR][RQ]LHEQLEVQ[RK][HKQ]LQ[LM]RIE[AE]QGKYLQSI[LI]E[KEQ][QA]   | 40   | 44    | 4.9e-1209 | Myb_CC_LHEQLE      |
| 3     | [VL]KSHLQ[KM]YR[LT]AKY[RT]P  | 83   | 15    | 5.6e-733  | -                  |
| 4     | [EPK]A[AP][AR][LMV][DE][DAE]C[IA]R[GRS]LE[EA]E[KR][RSA]K[IM]E VFRRELPL[LI][CS][AV][RH]L[LI]ADV[ED][FVW][ML]K[EKD]E[VA][AE][EKQ][KRH][KSR][RE][GRP]   | 9    | 50    | 3.0e-188  | -                  |
| 5     | [DFN]A[FKM][DAM][EFK][AIQS][ELS][QE][LM][EV][FAS]Q[FPV][LS][SN]E[QCS][LFI][GD][IA]A[IV][TG][DE][NIV][EKL]E[SK][PS][QRSW][LM][DHP][DLR][ILP][YEL][GDP][ILRT][PKQ][PI][PQ][CFQS]                           | 12   | 41    | 1.9e-142  | -                  |
| 6     | [AE]G[AG]GA[GQ]G[DG][SA]GLVL[ST][TR]D[PA]KPRL  | 21   | 21    | 5.3e-134  | -                  |
| 7     | [ERT][DE]A[DG][AD][SGN]DK[RS][NKS]WMS[TS]AQLW[TV][GCD][DGS][SR][AHV][STR][DGS][ADT][ADS][ADN][SP]  | 10   | 29    | 2.3e-091  | -                  |
| 8     | [DGI][VQP][PSA][SV][GT][SN][NQS][LI][QT][GLN][ISG][GS][PD][ITA][AGV][ANT][STV][DH][DEV][LEV]A[KE]Q[TN][ED][WD][WI][KTA][DE][FI][ML]N[DL][DS][WA][KGR]D[IA][SAL]D[GNA]                                    | 9    | 41    | 7.3e-089  | -                  |
| 9     | [TS][RV][SH][QK]L[TL]D[FA][NK]L[AD][LH][LPS]G[LF][LMS][DE][DN][AGN][TL][QS][ASV][CTY][EQS][QE][SN][GS][DEG][EIQ][LK][ATV][KE][ALH][ILM][SR][DT][DS][SNG]L[GHR][ADR][GNS][NS]L[DGP]F[QN]L[YQ][RH]         | 9    | 50    | 3.0e-142  | -                  |
| 10    | MCM[TR][SI][CY]NCCSTLMMYHAKKFSVPFAPQRAQNSEHVSNIAGAF[GS]GSNISNP   | 3    | 50    | 9.1e-061  | -                  |
| 11    | [QSE][QE][HQS]SS[SQ][QS][SG][GR]SP[EPQ]GPL[QN][LF][ST][VS]S[GS][VR][AG][AMV]S[ASV][LTV][TV][GV]  | 3    | 29    | 8.8e-060  | -                  |
| 12    | [KR]S[PD][EI][PY][DS][PS][AE][DS][PD][LT]S[HR]VS[HY][AP][DN][FL]S[DE]P[MN][AS]S[NS]SSTFCTS[LM][FY]SSSST[NK]  | 6    | 41    | 4.1e-073  | -                  |
| 13    | [NSP][AT][GDS]S[ADS][AHC]P[SEA][NQGL][APD][CIRS][MSFV][HKEL][QDL][QDL][QA][AID][GPD]M[PSTV][RTFM][AV][PN][NS][LA][EA][MSI][SNR][LI]G[RG][QNH][GDS][WS][NQEG][NMQ][ASEM][FIEH][PAE][QTES][QRAE][QLS][RAS] | 10   | 41    | 6.4e-069  | -                  |
| 14    | GLDVG EIGM[GP][AL]DL[GS]LDLK[LM]F[AV]AK[ST][AL]GR[LV][AR]  | 6    | 29    | 6.7e-060  | -                  |
| 15    | [MP]M[EM][AD][DG][GI][DG]S[GM][GY][ES][AM][DK]P[IM]M[ST][LM]S GDS[AL]GS[KR]GFDG[GP][IM]  | 6    | 31    | 2.9e-058  | -                  |
| 16    | G[SG]G[AG][AR][AR][SV]A[PAF][PG][GP]G[KR][RK]S[SAV]RAPRM   | 18   | 21    | 7.6e-060  | -                  |
| 17    | [RK]V[DV]WTPELH[RK][RK]FV[QE]AVE[QH]LGIDKAVP[KS]RI   | 7    | 29    | 2.9e-059  | Myb_DNA-binding    |
| 18    | [CK][CT][AP][KT][DT]EDLLLLDLNKGGYD[HL]   | 6    | 21    | 1.1e-052  | -                  |
| 19    | M[EA][LT][FA][PA][SD][AQ]PDL[SL]QH[ISPPS][PS]  | 11   | 19    | 5.0e-044  | -                  |
| 20    | [MST][GTP][EKG][PA][ENG][AQ][LMT][AYV][HLT][AQ][EQS][EQS][EQD][QL][FH][HP]D[FHS][RSE][KQR][TH][EMD][PS]S[TR]P[SVA][LP][TS][SPE][PKS][KAP][FS][FRQ][DMG][KN][AG]  | 8    | 38    | 1.7e-059  | -                  |





شکل ۴- تصویر شماتیک ساختار ژنی گروه‌های خانواده ژنی *G2-like* در گندم

### منابع

Bailey TL, Boden M, Buske FA, Frith M, Grant CE, Clementi L, Ren J, Li WW, Noble WS (2009) MEME SUITE: Tools for Motif Discovery and Searching. *Nucleic Acids Research* 37:202–208.

Bhutia KL, Nongbri EL, Gympad E, Rai M, Tyagi W (2020) In Silico Characterization, and Expression Analysis of Rice Golden 2-like (*OsGLK*) Members in Response to Low Phosphorous. *Molecular Biology Reports* 47:2529–2549.

Brand A, Borovsky Y, Hill T, Rahman KAA, Bellalou A, Van Deynze A, Paran I (2014) CaGLK2 Regulates Natural Variation of Chlorophyll Content and Fruit Color in Pepper Fruit. *Theoretical and Applied Genetics* 127:2139–2148.

Butler FC (1961) Root and Foot Rot Diseases of Wheat.

Chen M, Ji M, Wen B, Liu L, Li S, Chen X, Gao D, Li L (2016) GOLDEN 2-LIKE Transcription Factors of Plants. *Frontiers in Plant Science* 7:1509.

Cheong YH, Moon BC, Kim JK, Kim CY, Kim MC, Kim IH, Park CY, Kim JC, Park BO, Koo SC (2003) BWMK1, a Rice Mitogen-Activated Protein Kinase, Locates in the Nucleus and Mediates Pathogenesis-Related Gene Expression by Activation of a Transcription Factor. *Plant Physiology* 132:1961–1972.

Curto Rubio M, Krajinski F, Schlereth A, Rubiales Olmedo D (2015) Transcriptional Profiling of Medicago

Truncatula during Erysiphe Pisi Infection. *Frontiers in Plant Science* 6:517.

Dhanda SS, Sethi GS, Behl RK (2004) Indices of Drought Tolerance in Wheat Genotypes at Early Stages of Plant Growth. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190:6–12.

Fang Y, You J, Xie K, Xie W, Xiong L, (2008) Systematic Sequence Analysis and Identification of Tissue-Specific or Stress-Responsive Genes of NAC Transcription Factor Family in Rice. *Molecular Genetics and Genomics* 280:547–563.

FAO (2016) Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Italy.

Finn RD, Coghill P, Eberhardt RY, Eddy SR, Mistry J, Mitchell AL, Potter SC, Punta M, Qureshi M, Sangrador-Vegas A, Salazar GA (2016) The Pfam Protein Families Database: Towards a More Sustainable Future. *Nucleic Acids Research* 44:279–285.

Fitter DW, Martin DJ, Copley MJ, Scotland RW, Langdale JA (2002) *GLK* Gene Pairs Regulate Chloroplast Development in Diverse Plant Species. *The Plant Journal* 31:713–727.

Gill BS, Appels R, Botha-Oberholster AM, Buell CR, Bennetzen JL, Chalhoub B, Chumley F, Dvorák J, Iwanaga M, Keller B, Li W (2004) A Workshop Report on Wheat Genome Sequencing: International Genome Research on Wheat Consortium. *Genetics* 168:1087–1096.

- Guo WL, Chen BH, Chen XJ, Guo YY, Yang HL, Li XZ, Wang GY (2018) Transcriptome Profiling of Pumpkin (*Cucurbita Moschata* Duch.) Leaves Infected with Powdery Mildew. *PLoS One* 13:e0190175.
- Hall LN, Rossini L, Cribb L, Langdale JA (1998) GOLDEN 2: A Novel Transcriptional Regulator of Cellular Differentiation in the Maize Leaf. *The Plant Cell* 10:925-936.
- Han XY, Li PX, Zou LJ, Tan WR, Zheng T, Zhang DW, Lin HH (2016) GOLDEN2-LIKE Transcription Factors Coordinate the Tolerance to Cucumber Mosaic Virus in Arabidopsis. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 477:626-632.
- Hong C, Wei-ping K, Jun-Feng L (2019) Comparative Transcriptome Analysis of Powdery Mildew Resistance between Two Melon (*Cucumis Melo* L) with Different Thickness Peel. *BioRxiv*: 541391.
- Hu B, Jin J, Guo AY, Zhang H, Luo J, Gao G (2015) GSDS 2.0: An Upgraded Gene Feature Visualization Server. *Bioinformatics* 31:1296-1297.
- Jin J, Tian F, Yang DC, Meng YQ, Kong L, Luo J, Gao G (2016) PlantTFDB 4.0: Toward a Central Hub for Transcription Factors and Regulatory Interactions in Plants. *Nucleic Acids Research*: gkw982.
- Kersey PJ, Allen JE, Armean I, Boddu S, Bolt BJ, Carvalho-Silva D, Christensen M, Davis P, Falin LJ, Grabmueller C, Humphrey J (2016) Ensembl Genomes 2016: More Genomes, More Complexity. *Nucleic Acids Research* 44:574-580.
- Kong L, Liu Y, Wang X, Chang C (2020) Insight into the Role of Epigenetic Processes in Abiotic and Biotic Stress Response in Wheat and Barley. *International Journal of Molecular Sciences* 21:1480.
- Kumar, Sudhir, Masatoshi Nei, Joel Dudley, and Koichiro Tamura (2006) MEGA: A Biologist-Centric Software for Evolutionary Analysis of DNA and Protein Sequences. *October* 88:559-566.
- Langdale JA, Kidner CA (1994) Bundle Sheath Defective, a Mutation That Disrupts Cellular Differentiation in Maize Leaves. *Development* 120:673-681.
- Letunic I, Doerks T, Bork P (2015) SMART: Recent Updates, New Developments and Status in 2015. *Nucleic Acids Research* 43:257-260.
- Liu F, Xu Y, Han G, Zhou L, Ali A, Zhu S, Li X (2016) Molecular Evolution and Genetic Variation of G2-like Transcription Factor Genes in Maize. *PLoS One* 11:e0161763.
- Murmu J, Wilton M, Allard G, Pandeya R, Desveaux D, Singh J, Subramaniam R (2014) A Rabidopsis GOLDEN2-LIKE (GLK) Transcription Factors Activate Jasmonic Acid (JA)-dependent Disease Susceptibility to the Biotrophic Pathogen *Hyaloperonospora Arabidopsisidis*, as Well as JA-independent Plant Immunity against the Necrotrophic Pathogen *B. Otr*. *Molecular Plant Pathology* 15:174-184.
- Nakamura H, Muramatsu M, Hakata M, Ueno O, Nagamura Y, Hirochika H, Takano M, Ichikawa H (2009) Ectopic Overexpression of the Transcription Factor OsGLK1 Induces Chloroplast Development in Non-Green Rice Cells. *Plant and Cell Physiology* 50:1933-1949.
- Nakashima K, Ito Y, Yamaguchi-Shinozaki K (2009) Transcriptional Regulatory Networks in Response to Abiotic Stresses in Arabidopsis and Grasses. *Plant Physiology* 149:88-95.
- Pérez-Rodríguez P, Riano-Pachon DM, Corrêa LGG, Rensing SA, Kersten B, Mueller-Roeber B (2010) PlnTFDB: Updated Content and New Features of the Plant Transcription Factor Database. *Nucleic Acids Research* 38:822-827.
- Powell AL, Nguyen CV, Hill T, Cheng KL, Figueroa-Balderas R, Aktas H, Ashrafi H, Pons C, Fernández-Muñoz R, Vicente A, Lopez-Baltazar J (2012) Uniform Ripening Encodes a Golden 2-like Transcription Factor Regulating Tomato Fruit Chloroplast Development. *Science* 336:1711-1715.
- Qian C, Cui C, Wang X, Zhou C, Hu P, Li M, Li R, Xiao J, Wang X, Chen P, Xing L (2017) Molecular Characterisation of the Broad-spectrum Resistance to Powdery Mildew Conferred by the Stpk-V Gene from the Wild Species *Haynaldia villosa*. *Plant Biology* 19:875-885.
- Qin M, Zhang B, Gu G, Yuan J, Yang X, Yang J, Xie X (2021) Genome-Wide Analysis of the G2-Like Transcription Factor Genes and Their Expression in Different Senescence Stages of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Frontiers in Genetics* 12.
- Rauf M, Arif M, Dortay H, Matallana-Ramírez LP, Waters MT, Gil Nam H, Lim PO, Mueller-Roeber B, Balazadeh S (2013) ORE1 Balances Leaf Senescence against Maintenance by Antagonizing G2-like-mediated Transcription. *EMBO Reports* 14:382-388.
- Reynolds MP, Gutiérrez-Rodríguez M, Larqué-Saavedra A (2000) Photosynthesis of Wheat in a Warm, Irrigated Environment: I: Genetic Diversity and Crop Productivity. *Field Crops Research* 66:37-50.
- Rossini L, Cribb L, Martin DJ, Langdale JA (2001) The Maize Golden2 Gene Defines a Novel Class of Transcriptional Regulators in Plants. *The Plant Cell* 13:1231-1244.
- Rubio V, Linhares F, Solano R, Martín AC, Iglesias J, Leyva A, Paz-Ares J (2001) A Conserved MYB Transcription Factor Involved in Phosphate Starvation Signaling Both in Vascular Plants and in Unicellular Algae. *Genes and Development* 15:2122-2133.
- Sanjari S, Shirzadian-Khorramabad R, Shobbar ZS, Shahbazi M (2019) Systematic analysis of NAC transcription factors' gene family and identification of post-flowering drought stress responsive members in sorghum. *Plant cell reports* 38:361-376.
- Savitch LV, Subramaniam R, Allard GC, Singh J (2007) The GLK1 'Regulon' Encodes Disease Defense Related Proteins and Confers Resistance to *Fusarium Graminearum* in Arabidopsis. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 359:234-238.
- Shewry PR (2009) Wheat. *Journal of Experimental Botany* 60:1537-1553.
- Tan X, Meyers BC, Kozik A, West MA, Morgante M, Clair DA, Bent AF, Michelmore RW (2007) Global Expression Analysis of Nucleotide Binding Site-Leucine

- Rich Repeat-Encoding and Related Genes in Arabidopsis. *BMC Plant Biology* 7:1-20.
- Tang W, Wang W, Chen D, Ji Q, Jing Y, Wang H, Lin R (2012) Transposase-Derived Proteins FHY3/FAR1 Interact with PHYTOCHROME-INTERACTING FACTOR1 to Regulate Chlorophyll Biosynthesis by Modulating HEMB1 during Deetiolation in Arabidopsis. *The Plant Cell* 24:1984-2000.
- Udvardi, Michael K, Klementina Kakar, Maren Wandrey, Ombretta Montanari, Jeremy Murray, Andry Andriankaja, Ji-Yi Zhang, Vagner Benedito, Julie M I Hofer, and Foo Chueng (2007) Legume Transcription Factors: Global Regulators of Plant Development and Response to the Environment. *Plant Physiology* 144:538-49.
- Voorrips RE (2002) MapChart: Software for the Graphical Presentation of Linkage Maps and QTLs. *Journal of Heredity* 93:77-78.
- Vosough-Mohebbi P, Zahravi M, Changizi M, Khaghani S, Shobbar ZS (2020) Identification of the Differentially Expressed Genes of Wheat Genotypes in Response to Powdery Mildew Infection. *Caryologia. International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics* 73:63-72.
- Wang YX, Liu ZW, Wu ZJ, Li H, Zhuang J (2016). Transcriptome-Wide Identification and Expression Analysis of the NAC Gene Family in Tea Plant [*Camellia Sinensis* (L.) O. Kuntze]. *PLoS ONE* 11:1-26.
- Waters MT, Wang P, Korkaric M, Capper RG, Saunders NJ, Langdale JA (2009) GLK Transcription Factors Coordinate Expression of the Photosynthetic Apparatus in Arabidopsis. *The Plant Cell* 21:1109-1128.
- Wiese MV (1987) Compendium of Wheat Diseases. The American Phytopathological Society, St. Paul, MN, USA.
- Xin M, Wang Y, Yao Y, Song N, Hu Z, Qin D, Xie C, Peng H, Ni Z, Sun Q (2011) Identification and Characterization of Wheat Long Non-Protein Coding RNAs Responsive to Powdery Mildew Infection and Heat Stress by Using Microarray Analysis and SBS Sequencing. *BMC Plant Biology* 11:1-13.
- Xu ZS, Chen M, Li LC, Ma YZ (2011) Functions and Application of the AP2/ERF Transcription Factor Family in Crop Improvement. *Journal of Integrative Plant Biology* 53:570-585.
- Yasumura Y, Moylan EC, Langdale JA (2005) A Conserved Transcription Factor Mediates Nuclear Control of Organelle Biogenesis in Anciently Diverged Land Plants. *The Plant Cell* 17:1894-1907.
- Yazdani B, Sanjari S, Asghari-Zakaria R, Ghanegolmohammadi F, Pourabed E, Shahbazi M, Shobbar ZS (2020) Revision of the Barley WRKY Gene Family Phylogeny and Expression Analysis of the Candidate Genes in Response to Drought. *Biologia Plantarum* 64:9-19.
- Zahravi M, Mansourian MR, Azimi H, Dehghan MA, Allahyari N, Alitabar R (2018) Investigation of Resistance of Iranian Bread Wheat Landraces to Powdery Mildew Disease. *Iranian Journal of Field Crop Science* 49:151-165.
- Zeng L, Liu X, Zhou Z, Li D, Zhao X, Zhu L, Luo Y, Hu S (2018) Identification of a G2-like Transcription Factor, OsPHL3, Functions as a Negative Regulator of Flowering in Rice by Co-Expression and Reverse Genetic Analysis. *BMC Plant Biology* 18:1-12.