**تعیین وابستگی بازدهی تبدیل توان سلول خورشیدی به پارامترهای ساخت در انواع پروسکایت های غیرآلی با استفاده از بیان ژن برنامه‌نویسی**

علی حبیبی1\*، غلامرضا خیاطی 2، فرهاد ستاری3، صغری میرارشادی4

|  |  |
| --- | --- |
| 1\*دانشجوی دکتری تخصصی نانوفناوری-نانومواد گروه مهندسی مواد و متالوژی دانشگاه شهید باهنر کرمان | alihabibi14@yahoo.com |
| 2: دانشیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی مواد و متالوژی دانشگاه دانشگاه شهید باهنر کرمان | khayatireza@gmail.com |
| 3 دانشیار و عضو هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه دانشگاه محقق اردبیلی | f\_sattari@uma.ac.ir |
| 4 دانشیار و عضو هیات علمی گروه فیزیک مهندسی دانشگاه دانشگاه محقق اردبیلی | s.mirershadi@uma.ac.ir |
|  |  |

# چكيده

این مقاله تلاشی است برای بررسی سلول‌های خورشیدی پروسکایت غیرآلی و ارائه یک مدل پیش‌بینی‌کننده جدید برای تخمین بازدهی تبدیل توان (‏PCE) ‏با استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن (‏GEP)‏. تمام مراجع از روش پوشش دهی چرخشی برای ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده کردند. برای لایه پروسکایت، پارامترهای ضخامت، شکاف نواری و درصد جرمی عناصر تکراری لایه‌های پروسکایت به عنوان متغیرهای ورودی و PCE به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شدند. . در مرحله اول، ۲۹ آزمایش از مقالات معتبر استخراج شدند. به عنوان اولین گام برای اطمینان از استحکام داده‌های انتخاب ‌شده، از نمودار جعبه­ای برای تعیین توزیع پارامترهای عملیاتی استفاده شد و داده‌های پرت (‏سه مجموعه داده)‏ حذف شدند. مجموعه داده‌های باقی مانده برای ساخت مدل‌ها با آموزش (‏۱۹ مجموعه داده)‏ و آزمایش (‏۷ مجموعه داده)‏ در GEP استفاده شد. شاخص‌های آماری شامل کسر مطلق واریانس (‏2R)‏، ریشه میانگین مربعات خطا (‏RMSE)‏، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (‏RRSE)‏، میانگین مربعات خطا (‏MSE) ‏و نمودار جعبه‌ای متغیرها برای ارزیابی دقت مدل‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت بهترین مدل با ۰.۹۱۱۱ =2R، ۰.۰۸۷۸RMSE = ، ۰.۲۹۹۵RRSE = و ۰.۰۰۷۷MSE =. انتخاب شد. نتایج نشان داد که GEP می‌تواند به عنوان یک ابزار منحصر به فرد برای مدل‌سازی PCE در سلول‌های خورشیدی پروسکایت با پارامترهای عملیاتی استفاده شود. دسته‌بندی اثر هر پارامتر بر PCA قدرت بعدی این مطالعه بود که با استفاده از آنالیز حساسیت انجام شد و نشان داد که شکاف نواری، درصد جرمی سزیم (‏Cs)‏، سرب (‏Pb) ‏و ید (‏I)‏ به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر PCE از سلول‌های خورشیدی پروسکایت غیرآلی بودند.

**کليدواژه­ها:** سلول‌های خورشیدی پروسکایت غیر آلی، بازده تبدیل انرژی، مدل‌سازی ریاضی، برنامه‌نویسی بیان ژن

**Determining the dependence of solar cell power  
conversion efficiency on fabrication parameters in  
inorganic perovskite types by programming gene  
expression**

**Ali Habibi1\*, Gholam Reza Khayati 2, Farhad Sattari3, Soghra Mirershadi4**

|  |  |
| --- | --- |
| 1\* PhD Student in Nanotechnology-Nanomaterials, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman | alihabibi14@yahoo.com |
| 2 Associate Professor and Faculty Member, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Shahid Bahonar University of Kerman | khayatireza@gmail.com |
| 3 Associate Professor and Faculty Member, Department of Physics, Mohaghegh Ardabili University | f\_sattari@uma.ac.ir |
| 4Associate Professor and Faculty Member, Department of Engineering Physics, Mohaghegh Ardabili University | s.mirershadi@uma.ac.ir |

**Abstract**

This article is an attempt to review inorganic perovskite solar cells and propose a new predictive  
model to estimate the power conversion efficiency (PCE) using gene expression programming  
(GEP). All references used the spin coating method to construct the solar cells. For the perovskite  
layer, parameters of thickness, bandgap, and mass percentage of repetitive elements of perovskite  
layers were considered as input variables, and the PCE was selected as the output variable. In the  
first stage, 29 experiments were extracted from reliable articles. As a first step to ensure the  
robustness of the selected data, the box plot was used to determine the distribution of operational  
parameters, and the outlier’s data (three data sets) were excluded. Remained data set used to  
construct models by training (19 data sets) and testing (7 data sets) in GEP. Statistical indices  
including the absolute fraction of variance (R2), root mean square error (RMSE), root relative  
squared error (RRSE), mean squared error (MSE), and box plot of variables were used to evaluate  
the accuracy of the proposed models. Finally, the best model was selected by R2 = 0.9111, RMSE  
= 0.0878, RRSE = 0.2995, and MSE = 0.0077. The results showed that GEP can be used as a unique  
tool for modeling PCE in perovskite solar cells with operational parameters. Sorting out the effect of  
each parameter on PCA was the next strength of this study, which was performed using sensitivity  
analysis and showed that bandgap, the mass percentage of cesium (Cs), lead (Pb) and iodine (I)  
were the most influencing parameters on the PCE from the inorganic perovskite solar cells,  
respectively.

**Keywords:** “Inorganic perovskite solar cells,”” Power conversion efficiency.”” Mathematical  
modeling,”” Geneexpression programming,”.

**مقدمه**

توانایی بیشتر نیمه‌رساناهای پروسکایت غیرآلی برای کار در دماهای کاری بالاتر در مقایسه با انواع آلی - غیرآلی، ساخت و توسعه آن‌ها را موضوع بسیاری از مطالعات در سال‌های اخیر قرار داده‌است [‏ ۱ - ۴ ]‏. با وجود افزایش بازده تبدیل انرژی خورشیدی سلول‌های غیر آلی تا 20.8%، متاسفانه این نوع سلول خورشیدی میزان اتلاف انرژی بیشتری دارد و همچنان از انواع آلی - غیرآلی عقب است [‏ 6و5]‏. در این راستا، شناسایی پارامترهای عملیاتی موثر بر کارایی و مدل‌سازی رفتار بازده تبدیل توان (‏PCE)‏ این گروه از سلول‌های خورشیدی می‌تواند نقش کلیدی در بهبود عملکرد لایه جاذب نور این سلول‌ها ایفا کند [‏ ۷ - ۹ ]‏. با توجه به مقالات، روش‌های مختلفی برای تولید پروسکایت غیرآلی گزارش شده‌است، از جمله پوشش دهی چرخشی [‏ ۱۰، ۱۱ ]‏، پوشش اسپری [‏ ۱۲، ۱۳ ]‏، محلول کلوییدی [‏ ۱۴، ۱۶ ]‏، تبخیر خلا [‏ ۱۷ ]‏، خلا دومنبع (‏DSVD)‏[‏ ۱۸، ۲۰ ]‏ و تبخیر حرارتی [‏ ۲۱، ۲۲ ]‏. در عین حال، استفاده از پوشش اسپینی به دلیل مزایای منحصر به فرد آن مانند تولید پوشش‌های یکنواخت با ضخامت کم، هزینه عملیاتی کم، انتقال سریع، و قرار دادن پوشش‌های تولید شده، گزینه‌های خوبی برای تولید سلول‌های خورشیدی پروسکایت غیرآلی می‌باشند [‏ ۲۳، ۲۴ ]‏. علی‌رغم این مزایا، مدلسازی PCE سلول‌های خورشیدی غیرآلی می‌تواند به دلیل تنوع فعل و انفعالات بین عوامل عملیاتی و ماهیت زمان‌بر آزمایش‌ها بسیار پیچیده باشد [‏ ۲۳ - ۲۷ ]‏. اهمیت استفاده از انرژی‌های جدید و زیست سازگار تحقیقات سلول خورشیدی را به موضوعی جذاب برای بسیاری از مطالعات تبدیل کرده‌است [‏ ۷، ۲۸ ]‏. علی‌رغم کاره‌ای مختلف انجام‌شده در این زمینه، هنوز مدل جامعی برای پیش‌بینی دقیق PCE این سلول‌ها ارائه نشده است. بنابراین، استفاده از هوش مصنوعی به عنوان یک ابزار ارزشمند برای مدل‌سازی می‌تواند به طور علمی و عملی موثر باشد.

پژوهش حاضر تلاش می‌کند تا از الگوریتم بیان ژن (‏GEP)‏به عنوان ابزاری برای مدلسازی تاثیر پارامترهای عملیاتی لایه پروسکایتی که با پوشش دهی چرخشی تهیه شده‌اند، شامل پارامترهای ضخامت، شکاف نواری و درصد جرمی عناصر تکراری بر PCE سلول‌های خورشیدی پروسکایتی استفاده کند. در این راستا، ۲۹ آزمایش مختلف معتبر از مقالات استخراج شده‌اند. در مرحله اول، با استفاده از یک نمودار جعبه‌ای، کیفیت و استحکام داده‌های جمع‌آوری‌شده تعیین می‌شود و پس از حذف داده‌های پرت، مدل‌های مختلف GEP ساخته و اعتبارسنجی می‌شوند. همچنین، جنبه‌های علمی و صنعتی با توجه به مدل‌های فعلی مدیریت بین‌المللی در نظر گرفته شدند. این یک معیار برای بازرسی مبتنی بر ریسک فراهم می‌کند، مستندات و مدیریت داده‌ها را افزایش می‌دهد و به عنوان یک رویکرد جدید برای بیان اهمیت ثبت کیفیت با داده‌ها و اسناد صنعتی در نظر گرفته می‌شود.

**جمع‌آوری مجموعه داده‌ها و پیشینه نظری**

**مجموعه داده‌های جمع‌آوری‌شده**

از آنجایی که تمرکز مطالعه ارائه شده بر روی مدل‌سازی PCE به عنوان تابعی از ویژگی‌های فرآیند لایه پروسکتی است، در مرحله اول، مقالات منتشر شده در مورد آماده‌سازی این لایه با پوشش اسپین گردآوری و در جدول 1 خلاصه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از پارامترهای عملیاتی مدل سازی GEP مبنایی برای خلاصه کردن مراجع در این جدول 1 است.

**پیش پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده**

با توجه به تنوع مراجع مورد استفاده در انتخاب داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی GEP، اهمیت پیش‌پردازش داده‌ها دو برابر است. در میان روش‌های مختلف موجود [‏ ۵۸ ]‏، جعبه لکه می‌تواند به عنوان یک ابزار موثر برای اطمینان از قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی با توجه به قابلیت‌هایش مانند امکان نشان دادن داده‌های پرت، توزیع و پراکندگی داده‌ها در نظر گرفته شود. شکل ۱ نمودار جعبه­ای پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. در نتیجه، سه داده نادیده گرفته شدند و تعداد داده‌ها به ۲۶ رسید.



شكل 1: نمودارهای جعبه­ای برای تعیین داده‌های خارج از محدوده از طریق پیش‌پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده

همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، ردیف های 20، 21 و 25 به ترتیب به دلیل وجود داده های پرت در درصد جرمی سرب (Pb) خارج از داده شناسایی شدند و برای بهبود قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی استفاده نشدند.

جدول 1: خلاصه مقالات چاپ شده که در آنها از روش پوشش اسپین برای ساخت لایه پروسکایت استفاده شده است.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| No. | The Formula of the perovskite layer | Input | | | | | | |  | Output |  | References | |
| Bandgap (eV) | Thickness (nm) |  | Mass Percent of a component | | | | PCE (%) | Year | Ref |
| Cs (%) | Pb (%) | I (%) | Br (%) |
| 1 | CsPbI3 | 1.73 | 300 |  | 18.44 | 28.75 | 52.82 | 0.00 |  | 13.4 |  | 2018 | 29 |
| 2 | CsPb0.95Ca0.05I3 | 1.72 | 400 |  | 18.66 | 27.63 | 53.44 | 0.00 |  | 13.5 |  | 2018 | 30 |
| 3 | CsPbI3 | 1.73 | 350 |  | 18.44 | 28.75 | 52.82 | 0.00 |  | 6.4 |  | 2017 | 31 |
| 4 | CsPbBr3 | 2.30 | 270 |  | 22.92 | 35.74 | 0.00 | 41.34 |  | 6.0 |  | 2015 | 32 |
| 5 | CsPbBr3 | 2.30 | 230 |  | 22.92 | 35.74 | 0.00 | 41.34 |  | 9.7 |  | 2018 | 33 |
| 6 | CsPbBr3 | 2.30 | 200 |  | 22.92 | 35.74 | 0.00 | 41.34 |  | 4.1 |  | 2018 | 34 |
| 7 | CsPb0.97Sm0.03Br3 | 2.30 | 400 |  | 22.99 | 34.77 | 0.00 | 41.46 |  | 10.1 |  | 2018 | 35 |
| 8 | CsPb0.97Tb0.03Br3 | 2.30 | 360 |  | 22.98 | 34.75 | 0.00 | 41.44 |  | 10.3 |  | 2018 | 36 |
| 9 | CsPb0.97Sr0.03Br3 | 2.24 | 400 |  | 23.07 | 34.88 | 0.00 | 41.60 |  | 9.6 |  | 2019 | 37 |
| 10 | Cs0.91Rb0.09PbBr3 | 2.24 | 400 |  | 21.01 | 36.00 | 0.00 | 41.65 |  | 9.9 |  | 2018 | 38 |
| 11 | CsPbI2Br | 1.92 | 150 |  | 19.73 | 30.75 | 37.67 | 11.86 |  | 6.7 |  | 2016 | 39 |
| 12 | CsPbI2Br | 1.92 | 400 |  | 19.73 | 30.75 | 37.67 | 11.86 |  | 13.3 |  | 2018 | 40 |
| 13 | Cs0.925K0.075PbI2Br | 1.92 | 100 |  | 18.44 | 31.07 | 38.06 | 11.98 |  | 10.0 |  | 2017 | 41 |
| 14 | CsPb0.98Sr0.02I2Br | 1.87 | 250 |  | 19.80 | 30.24 | 37.80 | 11.90 |  | 11.2 |  | 2017 | 42 |
| 15 | CsPb0.98Mn0.02I2Br | 1.92 | 200 |  | 19.81 | 30.27 | 37.84 | 11.91 |  | 13.5 |  | 2018 | 43 |
| 16 | CsPbI2Br | 1.92 | 230 |  | 19.73 | 30.75 | 37.67 | 11.86 |  | 7.7 |  | 2017 | 44 |
| 17 | CsPb0.9Sn0.1IBr2 | 1.79 | 300 |  | 21.51 | 30.18 | 20.54 | 25.86 |  | 11.3 |  | 2017 | 45 |
| 18 | CsPb0.95Eu0.05I2Br | 1.98 | 150 |  | 19.81 | 29.33 | 37.82 | 11.91 |  | 13.7 |  | 2019 | 46 |
| 19 | CsPbIBr2 | 2.05 | 230 |  | 21.20 | 33.06 | 20.25 | 25.49 |  | 5.5 |  | 2017 | 47 |
| 20 | CsSnBr3 | 1.75 | 300 |  | 27.05 | 0.00 | 0.00 | 48.79 |  | 2.17 |  | 2016 | 48 |
| 21 | CsSnIBr2 | 1.65 | 300 |  | 24.69 | 0.00 | 23.57 | 29.68 |  | 3.2 |  | 2016 | 49 |
| 22 | CsPb0.96Bi0.04I3 | 1.56 | 350 |  | 18.44 | 27.59 | 52.81 | 0.00 |  | 11.47 |  | 2018 | 50 |
| 23 | CsPb0.75Sn0.25IBr2 | 1.78 | 300 |  | 21.98 | 25.70 | 20.99 | 26.43 |  | 11.53 |  | 2018 | 51 |
| 24 | CsPb0.8Ge0.2Br | 1.89 | 400 |  | 23.81 | 42.17 | 0.00 | 20.33 |  | 10.8 |  | 2018 | 52 |
| 25 | Cs2AgBiBr6 | 1.98 | 200 |  | 25.03 | 0.00 | 0.00 | 45.14 |  | 2.51 |  | 2019 | 53 |
| 26 | Cs0.99Rb0.01PbI2Br | 1.90 | 250 |  | 19.54 | 30.77 | 37.69 | 11.87 |  | 12.0 |  | 2019 | 54 |
| 27 | CsPbIBr2 | 2.05 | 300 |  | 21.20 | 33.06 | 20.25 | 25.49 |  | 8.02 |  | 2017 | 55 |
| 28 | CsPb0.98Ni0.02I2Br | 1.92 | 300 |  | 19.81 | 30.27 | 37.83 | 11.91 |  | 13.88 |  | 2019 | 56 |
| 29 | CsPb0.995Mn0.005I1.01Br1.99 | 1.75 | 250 |  | 21.21 | 32.91 | 20.46 | 25.38 |  | 7.36 |  | 2018 | 57 |

همانطور که نشان‌داده شده‌است، متقارن‌ترین توزیع پراکندگی مربوط به توزیع پهنای باند است، که در آن مقدار میانه تقریبا برابر با مقدار میانگین است. با این حال، درصد وزنی I کم‌ترین تقارن توزیع داده‌ها را دارد و تفاوت قابل‌توجهی بین میانگین و میانه وجود دارد. علاوه بر این، کمترین پراکندگی را بین اجزای شیمیایی مورد استفاده برای ساختن لایه پروسکایت Cs دارد، در حالی که این پراکندگی بالاترین ارزش را برای ما دارد.

**برنامه نویسی بیان ژن (GEP)**

برنامه نویسی بیان ژن که توسط کاندیدا فریرا ارایه شده، الگوریتم تکامل نوینی است که از الگوریتم ژنتیک (GAS) و برنامه نویسی ژنتیک (GP) ساخته شده است و به کاربر اجازه می‌دهد تا مساله را به عنوان داده ورودی و خروجی تعریف کند و از آن برای مدلسازی رفتار سیستم مورد مطالعه استفاده کند [‏ ۵۹ - ۶۲ ]‏. ویژگی متمایز این سه الگوریتم ماهیت افراد در ساخت مدل است. در برنامه‌نویسی GEP، افراد به عنوان رشته‌های خطی با طول ثابت، یعنی کروموزوم "ژنوتیپ" کدگذاری می‌شوند، که سپس به "فنوتیپ" درختان بیان تبدیل می‌شوند. این ژنوتیپ‌ها و فنوتیپ‌ها از نظر ساختاری و عملکردی موجودات مختلفی هستند، و به همین دلیل، سیستم تکاملی جدید منجر به تغییراتی می‌شود که به محققان در طراحی مدل‌های کامپیوتری قوی و دقیق کمک می‌کند [‏ ۶۲ - ۶۵ ]‏.

اساس GEP کدگذاری مساله با رشته‌های خطی با طول ثابت (‏کروموزوم‌ها)‏است، که سپس به عنوان رشته‌های غیر خطی بیان می‌شوند (‏درخت بیان، ET)‏. کروموزوم‌ها (‏مشکل حل جواب) ‏در هر موقعیت می‌تواند متغیر باشد؛ اپراتورها و پایانه‌ها که در ابتدای الگوریتم به عنوان ورودی معرفی می‌شوند و ثابت‌ها توسط کاربر در محدوده مشخصی تعیین می‌شوند [‏ ۶۸ - ۶۶ ]‏. شکل2، مثالی از رمزگذاری یک کروموزوم با دو ژن و متناظر با آن را نشان می‌دهد. معادله ریاضی مساله نیز بیان شده‌است [‏ ۵۹ - ۶۱ ]‏.

کروموزوم از یک یا چند صفت تشکیل شده‌است و هر کیفیت شامل دو بخش جلو و عقب است. سر یک طول مقدر (‏تعداد نمادها = h) ‏است و شامل تصاویری هم برای ظرفیت و هم برای ترمینال است. دم می‌تواند شامل ترمینال‌ها (‏فاکتورها و ثابت‌ها)‏ باشد و طول آن (‏t)‏ می‌تواند کار طول سر باشد [‏ ۵۹ - ۶۱ ]‏. طول دنباله به صورت زیر داده می‌شود: که در آن n مهم‌ترین تعداد چیزهایی است که در یک کار به نام بزرگ‌ترین درجه وجود دارد [‏ ۶۳ ]‏. برای کروموزوم‌های چند ژنی، یک کار ارتباطی (‏به عنوان مثال، +، -، \*، /)‏ باید از قبل (‏در حال پیشرفت) ‏انتخاب شود تا کیفیت‌های متمایز را به یک درخت بیان پیچیده‌تر و کلی ارتباط دهد. بیان عددی مربوط به این درخت‌های بیان، آرایش کاندید برای مساله است [‏ ۵۹ - ۶۱ ]‏.



شکل ۲: کروموزوم دو ژن، درخت بیان آن و معادله ریاضی مربوطه.

در الگوریتم GEP، اپراتورهای ژنتیک (‏انتخاب، تقاطع، جهش، چرخش و انتقال) ‏برای تولید یک نسل جدید اعمال می‌شوند [‏ ۵۹ - ۶۱ ]‏. عملکرد این اپراتورها به گونه‌ای است که در مرحله اول فرآیند انتخاب، برای دستیابی به احتمال بالای تولید فرزند یا به اصطلاح نسل جدید، کروموزوم‌ها با توجه به تابع تناسب انتخابی انتخاب می‌شوند. در تقاطع، با انتخاب دو کروموزوم تصادفی، والدین برای تبادل برخی عناصر بین آن‌ها جفت می‌شوند، به طوری که در نهایت دو کروموزوم جدید (‏فرزندان) ‏تولید می‌شوند. در طول جهش کروموزومی، کودک با توجه به احتمال خاصی که باعث تغییر یک یا چند ژن خود و در نهایت تولید یک جمعیت جدید می‌شود، تحت یک تغییر تصادفی قرار می‌گیرد. در مقایسه، فرآیند چرخش مرتبه نمادها را در بخشی از ژن (‏مانند GA)‏ معکوس می‌کند. انتقال اپراتور دو بخش متوالی از یک ژن به یک نقطه انتخابی تصادفی [‏ ۶۹ - ۷۱ ]‏.

هنگام استفاده از GEP، مانند الگوریتم GP، پنج جز کلی مجموعه تابع، مجموعه ترمینال، تابع برازش، پارامترهای کنترل و معیارهای توقف باید برای حل مساله تعیین شوند [‏ ۷۲ ]‏. الگوریتم GEP سپس با تولید تصادفی کروموزوم‌های خطی با طول ثابت آغاز می‌شود که جمعیت اصلی را تشکیل می‌دهد. سپس کروموزوم‌ها به عنوان درخت بیان نشان داده می­شوند و هر فرد پس از اعمال تابع برازش که در آن افراد برای تکثیر افراد اصلاح‌شده یا نسل جدید انتخاب می‌شوند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نسل جدید از طریق چهار عملیات (‏تولید مثل، تقاطع، جهش و چرخش) ‏در طول فرآیند رشد حرکت می‌کند و در نهایت براساس پارامترهای کنترل از پیش تعیین‌شده تا زمانی که یک راه‌حل پیدا شود، تکرار می‌شود [‏ ۶۳ ]‏. شکل ۳ مراحل اصلی الگوریتم GEP را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که خروجی الگوریتم ژنتیک (‏GEP) ‏به تابع برازش بستگی دارد و افراد به عنوان یک نسل جدید یا اصلاح‌شده براساس آن انتخاب می‌شوند [‏ ۶۶، ۷۳، ۷۴ ]‏.



شکل 3: فلوچارت یک الگوریتم GEP معمولی.

در این مطالعه، GeneXproTools 5.0 برای استخراج مدل پیش‌بینی PCE به عنوان تابعی از متغیرهای ساخت لایه پروسکایت استفاده شده­است. پارامترهای متعددی در این نرم‌افزار وجود دارند که باید به صورت سعی و خطا تنظیم شوند. این پارامترها شامل ثوابت در هر ژن، اندازه سر، تعداد شامل اپراتورها، معکوس سازی، تابع تناسب، انتقال، تعداد ژن‌ها، تعداد کروموزوم‌ها، تابع پیوند، جهش و محدودیت کران‌ها هستند. از آنجا که تنظیم این پارامترها برای ایجاد مدلی با کم‌ترین خطا یا بیش‌ترین دقت با روش آزمون - خطا انجام شده‌است، فرآیند مدل‌سازی بسیار زمان بر بوده‌است. در این راستا ۲۰۰ مدل مختلف ساخته شد و کیفیت هر مدل با شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نکته مهم بعدی در ساخت مدل استفاده از توابع مختلف (‏مانند تقسیم، تفریق، جمع و ضرب)‏ برای ترکیب انواع توابع موجود در نرم‌افزار مورد استفاده است.

با توجه به مقالات [‏ ۷۵ - ۷۷ ]‏، پارامترهای اصلی موثر بر PCE سلول‌های خورشیدی تمام غیرآلی را می‌توان به صورت ضخامت، شکاف نواری و درصد جرمی ترکیبات در لایه پروسکایت سلول خورشیدی طبقه‌بندی کرد. داده‌های گزارش‌شده در جدول ۱ برای ساخت مدل‌های GEP استفاده شدند. برای دستیابی به این هدف، ۲۰ داده (‏معادل با ۷۵ % داده‌ها) ‏برای آموزش مدل و بقیه برای تست کیفیت مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۲ محدودیت‌ها و مقادیر ثابت پارامترهای GEP را در طول مدل‌سازی نشان می‌دهد.

جدول1: پارامترهای GEP به کار رفته برای فرمول‌های پیشنهادی

|  |  |
| --- | --- |
| GEP parameters | Ranges/Value |
| Number of chromosomes | 30 |
| Head size | 9-13 |
| Number of genes | 5-11 |
| Linking function | Addition |
| Fitness function error type | RRSE |
| Constant per gene | 1 |
| Mutation rate | 0-0.014 |
| Inversion rate | 0-0.0416 |
| One point recombination rate | 0-0.0217 |
| Two-point recombination rate | 0-0.175 |
| Gene recombination rate | 0.00277-0.0129 |
| Gene transposition rate | 0-0.00277 |

به عنوان مثال، در جدول ۳، جزئیات مربوط به ۹ مورد از بهترین مدل‌های ساخته‌شده گزارش شده‌است. همانطور که نشان‌داده شده‌است، تعداد تابع بین ۶ - ۱۴ تغییر کرده‌است. همچنین، همه مدل‌ها از اعمال اصلی جبری (‏+، -، \* و /)‏ استفاده می‌کنند، در حالی که بقیه مدل‌ها (‏Rt3، Sqrt، Sin، exp، tanh، Atan، Ln، 2x، 3x ، 4x)‏در صورت نیاز گنجانده شده‌اند.

**نتایج و بحث**

براساس مقالاتی که از GEP برای مدل‌سازی فرآیندهای تجربی استفاده کرده‌اند [‏ ۷۸، ۷۹ ]‏، شاخص‌های آماری مختلفی می‌توانند برای تعیین کیفیت مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرند. در میان این موارد، استفاده از کسر مطلق واریانس (‏2R)‏، میانگین مربع خطا (‏MSE)‏، میانگین مربع خطا (‏RMSE)‏، و ریشه نسبی مربع خطا (‏RRSE)‏ (‏معادلات ۱ ۴) ‏[‏ ۷۶، ۸۰ ]‏ بسیار رایج است. تمام این شاخص‌ها از مقدار پیش‌بینی‌شده (‏m)‏، مقدار واقعی (‏h) ‏و مقدار کل داده‌های (‏n) ‏مورد استفاده برای ارزیابی استفاده می‌کنند.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
| (2) |  |
| (3) |  |
| (4) |  |

به عنوان یک روند کلی، 2R مدل بهینه همیشه باید نزدیک یا برابر با ۱ باشد و سایر شاخص‌های خطا باید نزدیک به صفر باشند. ارزیابی مدل پیشنهادی در دو مرحله تست و آموزش انجام می شود. جدول 4 مقادیر این شاخص های آماری را برای دو مرحله خلاصه می کند. همانطور که نشان داده شد مقادیر 2R تمرین در محدوده 0.8013-0.9111 بود در حالی که مقادیر 2R در تست تغییرات در محدوده 0.8974-9.0741 بود. علاوه بر این، کمترین مقادیر RMSE، MSE و RRSE به ترتیب 0.0878، 0.0077 و 0.2996 در آموزش و 0.7069، 0.3758، 7.9957 در تست هستند.

جدول 3: مقایسه مقادیر برای توابع مورد استفاده برای ساخت مدل های GEP

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Model | Linking function | Head size | Genes number | Functions number | Function/s |
| GEP-1 | Addition | 9 | 7 | 6 | +, -, \*, /, x2, x1/3 |
| GEP-2 | Addition | 12 | 8 | 9 | +, -, \*, /, sqrt(x), 10x, floor(x), x2, x3 |
| GEP-3 | Addition | 13 | 9 | 14 | +, -, \*, /, 1/x, x2, avg(x,y), sin(x), cos(x), tan(x), cot(x), sec(x), csc(x), (1-x) |
| GEP-4 | Addition | 10 | 8 | 7 | +, -, \*, /, x2, min(x,y), max(x,y) |
| GEP-5 | Addition | 13 | 5 | 9 | +, -, \*, /, sqrt(x), exp(x), ln(x), abs(x), 1/x |
| GEP-6 | Addition | 11 | 8 | 9 | +, -, \*, /, abs(x), 1/x, x1/3, x1/4, x1/5 |
| GEP-7 | Addition | 13 | 11 | 13 | +, -, \*, /, sqrt(x), pow(10,x), 1/x, -x, x2, x3, x4, x5, (1-x) |
| GEP-8 | Addition | 13 | 9 | 10 | +, -, \*, /, arcsin(x), arccos(x), arctan(x), arccot(x), arcsec(x), arccsc(x) |
| GEP-9 | Addition | 13 | 8 | 7 | +, -, \*, /, 1/x, arctan(x), tanh(x) |

*جدول 4: خلاصه ای از شاخص های آماری مورد استفاده برای ارزیابی مدل های پیشنهادی* GEP

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Model | R2 | |  | Error | | | | | | |
| **Training** | | |  | **Testing** | | |
| Training | Testing | RMSE | MSE | RRSE |  | RMSE | MSE | RRSE |
| GEP-1 | 0.8013 | 9.0741 |  | 0.1306 | 0.0170 | 0.4457 |  | 0.6130 | 0.3758 | 7.9957 |
| GEP-2 | 0.8059 | 7.7158 |  | 0.1297 | 0.0167 | 0.4411 |  | 0.7702 | 0.5932 | 10.0452 |
| GEP-3 | 0.8040 | 7.1730 |  | 0.1300 | 0.0169 | 0.4437 |  | 0.7386 | 0.5456 | 9.6340 |
| GEP-4 | 0.8471 | 0.1883 |  | 0.1149 | 0.0132 | 0.3924 |  | 0.7879 | 0.6209 | 10.2771 |
| GEP-5 | 0.9111 | 3.3455 |  | 0.0878 | 0.0077 | 0.2996 |  | 0.7069 | 0.4997 | 9.2198 |
| GEP-6 | 0.8341 | 6.4125 |  | 0.1193 | 0.0142 | 0.4073 |  | 0.8324 | 0.6930 | 10.8574 |
| GEP-7 | 0.8301 | 3.5297 |  | 0.1214 | 0.0147 | 0.4145 |  | 0.7161 | 0.5128 | 9.3401 |
| GEP-8 | 0.8301 | 3.5186 |  | 0.1207 | 0.0145 | 0.4120 |  | 0.7253 | 0.5147 | 9.2781 |
| GEP-9 | 0.9010 | 0.8974 |  | 0.0922 | 0.0085 | 0.3149 |  | 0.7183 | 0.5268 | 9.3487 |

شکل 4، تغییرات شاخص های مختلف در آموزش و تست رویکردهای GEP را نشان می دهد. بر این اساس GEP-5 و GEP-9 عملکرد بهتری دارند. معادلات برآورد شده برای 9 مدل GEP در جدول 5 ارائه شده است. متغیرهای ورودی معادلات در جدول 5 در جدول 6 آورده شده است. این معادلات از درختان بیان متناظر بر اساس ادبیات [81] به دست آمده اند. شکل 4 تغییرات شاخص های آماری مورد استفاده برای ارزیابی مدل را برای دو مرحله آزمون و بیشترین تغییرات را برای 9 مدل GEP کارآمد نشان می دهد. با توجه به شکل 4، می توان استنباط کرد که در بین مدل های ساخته شده، GEP-5 و GEP-9 برای پیش بینی PCE مناسب تر هستند. جدول 5 فرمول ریاضی این 9 مدل را نشان می دهد. شکل 5 درخت های زیر بیان مدل GEP-5 را نشان می دهد.



شکل 4: خطاهای مختلف برای آموزش و آزمایش سری داده ها در مدل های GEP، a: R2، b: RMSE، c: MSE و d: RRSE

جدول 5: خلاصه ای از بهترین مدل های GEP ساخته شده به عنوان یک تابع ریاضی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Model | Acquired equation | Coefficients |
| GEP-1 | (G1C0+(d(6)-(((d(1)-d(2))\*gep3Rt(d(3)))\*d(5))))+((((d(3)+d(3))\*(d(2)^2))+(d(6)/G2C0))\*(d(5)^2))+((((d(6)-(d(1)-G3C0))\*d(4))\*G3C0)\*d(1))+((((d(5)+d(5))\*(d(4)\*G4C0))\*((d(4)-d(3))\*(d(2)+d(4))))-d(1))+(((((d(1)-d(6))/G5C0)+(d(4)-d(5)))-d(2))\*(d(3)^2))+((((d(1)\*G6C0)+(d(2)\*G6C0)) (G6C0+d(6)))\*(gep3Rt(d(3))\*G6C0))+(gep3Rt((G7C0^2))\*((((G7C0-d(1))+G7C0)^2)\*d(2))) | G1C0 = 0.18207324068569;  G2C0 = 0.164059781839939;  G3C0 = -0.886945799857182;  G4C0 = -4.86865191803612;  G5C0 = 0.186558327675266;  G6C0 = 1.27179871551021;  G7C0 = 0.620126667641699 |
| GEP-2 | (G1C0\*(G1C0-((((d(3)\*d(2))^2)\*(d(2)-d(4)))\*((G1C0-d(2))-(10^d(3))))))+((d(3)\*d(4))+d(6))+((((d(3)-d(6))\*((d(3)-d(2))\*d(5)))\*((G3C0-d(2))+d(4)))/G3C0)+(d(5)+((((d(4)\*d(2))+(d(6)-d(4)))^2)-((d(2)\*(G4C0+d(3)))+d(3))))+(realsqrt(realsqrt((d(3)-((((d(1)-d(4))\*d(5))\*d(3))/G5C0))))\*G5C0)+((((d(6)-G6C0)\*(d(4)^3))-((G6C0^3)/(d(4)-d(6))))-(d(2)-(G6C0+d(3))))+((((d(1)^2)^2)-d(6))-((G7C0\*floor(d(5)))\*((d(5)\*d(2))+d(5))))+(d(3)+((d(2)-((G8C0^2)+(d(6)-d(3))))\*(((d(3)\*d(5))+d(1))\*d(1)))) | G1C0 = -0.515854365672781;  G3C0 = -6.74199354646754e-02;  G4C0 = -0.539048432874538;  G5C0 = -0.758478652302621;  G6C0 = 0.136936552018799;  G7C0 = 0.33127842036195;  G8C0 = -1.008533036787 |
| GEP-3 | ((((d(4)+d(6))/2.0)+(1.0-((G1C0\*d(1))+d(2))))\*(sin(d(5))-(1.0-(1.0-d(6)))))+cot((1.0-G2C0))+ cot((d(1)+((G3C0+csc(csc((G3C0+d(6)))))\*(((cos(d(3))^2)+G3C0)/2.0))))+(G4C0-sin((G4C0-((G4C0-G4C0)-tan(cos((sin(d(2))+d(6))))))))+ (((sin(sin(d(6)))-d(4))^2)+(tan((((d(2)+G5C0)/2.0)\*G5C0))\*((d(5)+d(5))\*(G5C0\*d(3)))))+cos((d(2)\*d(5)))+(1.0-(d(3)+sec(G7C0)))+tan(sin((1.0-tan((G8C0\*((tan(sin(cot((G8C0+d(4)))))-d(5))^2))))))+ (1.0/((((((1.0/(sec((d(1)+d(1)))))-((d(1)\*d(1))-(G9C0/G9C0)))+d(2))+G9C0)/2.0))) | G1C0 = 0.582768841573458;  G2C0 = -0.165420539729706;  G3C0 = 0.434481752364255;  G4C0 = -1.07761220872062;  G5C0 = -1.61294551790478;  G7C0 = 1.17352912607911;  G8C0 = -5.74856776455959e-02;  G9C0 = 1.77239536120408 |
| GEP-4 | (d(1)+min(d(6),((d(5)-d(3))\*G1C0)))+min((d(3)-d(3)),((G2C0-(d(1)-d(6)))\*((d(1)-d(4))-d(4))))+  ((((G3C0+G3C0)\*d(5))\*(min(d(2),d(1))-d(1)))\*(d(2)+d(2)))+  ((((d(5)\*d(5))+(G4C0\*d(2)))+((d(5)\*d(1))+d(2)))\*((d(6)-d(2))-(d(1)\*d(2))))+(((d(5)\*(d(5)\*d(6)))-d(1))\*((max(d(4),d(3))-d(4))-(G5C0+G5C0)))+(((d(1)\*((d(1)^2)\*d(4)))-(min(G6C0,d(3))-(d(2)+d(2))))-d(6))+  (G7C0-(G7C0+d(2)))+((G8C0\*min((d(6)-d(6)),(d(4)-d(2))))+(((d(3)-d(4))-d(4))\*(d(5)\*d(4)))) | G1C0 = 0.121633239307436;  G2C0 = -2.72996936444589e-09;  G3C0 = 2.656606593612;  G4C0 = -0.842350884845639;  G5C0 = -0.775846932896111;  G6C0 = -0.880771775087881;  G7C0 = -1.07852094482555e+15;  G8C0 = -0.35441230201298; |
| GEP-5 | (((((abs(d(4))-(d(3)\*G1C0))-(d(3)\*d(5)))+(d(6)-(d(4)\*d(4))))+G1C0)\*d(1))+(d(6)\*((d(2)-((d(6)+d(6))\*(d(3)+d(6))))\*(((d(5)\*d(5))-G2C0)\*(d(5)+d(4)))))+abs((((1.0/((G3C0-d(1))))+(1.0/((d(1)+d(5)))))+((realsqrt(d(2))-exp(G3C0))\*d(5))))+(((G4C0-(d(3)+d(4)))+d(2))\*(((G4C0+G4C0)/(G4C0+d(1)))\*realsqrt(realsqrt(d(6)))))+(d(2)\*(d(3)/abs(((d(3)/((d(2)\*G5C0)-(d(4)\*d(6))))+exp((G5C0\*G5C0)))))) | G1C0 = -0.698348962399171;  G2C0 = -0.777031769768365;  G3C0 = -0.440351573229163;  G4C0 = 0.485915380178241;  G5C0 = 1.26471401265395 |
| GEP-6 | (gep3Rt(d(6))-(((G1C0\*d(3))\*(d(2)+d(1)))+((d(5)/G1C0)\*gep5Rt(G1C0))))+(d(5)\*(d(6)+((d(4)\*(d(4)-d(3)))\*((d(6)\*G2C0)-d(2)))))+(d(3)\*((((d(4)-d(5))-(G3C0\*G3C0))\*(d(1)-d(5)))/(d(4)+(d(5)\*G3C0))))+  (d(5)+abs(((abs(gep5Rt((d(2)-d(3))))\*G4C0)+(realpow(d(1),(1.0/4.0))))))+((realpow(gep3Rt(d(1)),(1.0/4.0)))-(((d(6)+d(5))\*(d(6)-d(2)))+(abs(d(3))+(d(1)-d(2)))))+((G6C0+(d(6)\*(d(2)-d(6))))\*(((d(6)\*d(6))+(d(6)+d(6)))\*(d(5)+d(5))))+((((gep3Rt(d(4))-d(2))\*(d(2)\*d(2)))\*d(3))-abs((d(6)-(d(4)+d(2)))))+gep3Rt(((realpow(d(3),(1.0/4.0)))\*(gep5Rt(G8C0)-gep3Rt((d(6)+d(1)))))) | G1C0 = -0.664762222730837;  G2C0 = -1.90183889674787;  G3C0 = -0.342905608837323;  G4C0 = -0.710948242647172;  G6C0 = 1.70426146895276e-02;  G8C0 = -3.24070674875042 |
| GEP-7 | (((((-((d(2)-d(4))))^2)-d(2))+((G1C0-(-(d(6))))^3))\*(1.0-d(2)))+((1.0-(((((d(5)+G2C0)^5)\*(d(4)^4))\*((d(5)+G2C0)\*(G2C0-d(2))))+d(1)))^5)+(d(6)-(G3C0-(((((d(1)\*d(1))+d(1))+(G3C0-G3C0))\*(G3C0-(d(2)\*G3C0)))^2)))+((((1.0-(1.0-(d(2)-G4C0)))\*(((G4C0\*G4C0)+(d(1)^2))\*(d(1)^4)))-(1.0-d(6)))^5)+(G5C0\*(d(6)\*(10^(((((-(d(4)))^2)-(d(2)+d(1)))\*d(6))+d(6)))))+(G6C0+realsqrt((((((d(5)+d(3))-(1.0-d(1)))-((G6C0+d(6))\*d(1)))\*((G6C0-d(1))^4))^4)))+((G7C0\*((d(5)\*((-(((d(2)+d(5))-(d(1)+d(1)))))\*d(1)))+G7C0))^3)+((((d(6)-(((G8C0\*d(4))-(d(3)\*d(3)))\*((d(1)^5)+d(1))))\*d(6))-d(1))^5)+((d(2)-(1.0-((1.0-d(1))\*((1.0-(((d(2)\*d(2))-d(4))^2))^5))))\*d(2))+  (((d(6)+d(1))-d(6))\*G10C0)+(d(5)+((((G11C0-d(2))\*(d(5)\*d(6)))-((d(4)-d(2))+d(3)))\*((G11C0^4)\*(d(6)-d(2))))) | G1C0 = 0.186826036148303;  G2C0 = 0.924614841747921;  G3C0 = -0.433989545258875;  G4C0 = 0.829950865199744;  G5C0 = -1.01340965160961;  G6C0 = 0.10390568227423;  G7C0 = -0.656937224741857;  G8C0 = 0.678945030321203;  G10C0 = -0.788744439850241;  G11C0 = -0.975588134885851 |
| GEP-8 | (((d(4)\*(d(6)\*d(5)))-(asin(G1C0)\*atan(G1C0)))\*(((d(1)-d(2))\*(d(5)+d(5)))-d(5)))+((((asin(d(3))+((d(1)+d(2))-(G2C0\*G2C0)))-d(1))\*d(4))+atan(d(2)))+(d(5)-(G3C0\*(((d(1)/(d(2)-d(5)))\*(d(6)-d(2)))+(acot(d(4))+(d(3)-d(4))))))+(((d(3)-(((d(3)+d(6))\*(d(1)+d(6)))\*(acos(d(2))\*(d(1)+d(1)))))\*G4C0)+d(3))+((d(4)/((acot((d(5)+d(5)))+((d(2)+d(2))+d(3)))+(atan(d(2))-(d(1)\*G5C0))))-d(3))+((d(3)\*((acos(G6C0)+d(5))+(d(2)+d(5))))\*(((d(2)-d(5))+G6C0)\*atan((d(5)+d(5)))))+  ((((G7C0-d(4))\*(d(4)\*G7C0))\*((d(2)-G7C0)-d(6)))\*(d(4)+(d(5)/(d(4)+G7C0))))+(((acos(d(5))+(G8C0-d(3)))\*(atan(d(2))+d(3)))-((d(2)+(d(1)\*d(5)))+(d(4)-G8C0)))+(acos(d(4))-asin(G9C0)) | G1C0 = -0.275406389348363;  G2C0 = 0.374414084078494;  G3C0 = 5.66059799009814e-02;  G4C0 = -2.33416282580454e-02;  G5C0 = 0.429057043476716;  G6C0 = -0.358256782738731;  G7C0 = -0.252234219644235;  G8C0 = -0.284828964110233;  G9C0 = 0.797103926874057 |
| GEP-9 | ((((d(2)-(d(1)\*(d(3)-d(5))))+(G1C0-(1.0/(G1C0))))-d(4))\*d(1))+(((((d(4)/G2C0)+(d(1)-d(2)))\*((d(2)+d(2))+tanh(d(5))))\*((d(2)\*d(1))\*(G2C0-d(6))))+d(3))+(d(2)\*(G3C0-((((d(2)\*d(6))+(G3C0+G3C0))\*((d(1)+d(1))\*(d(2)-d(4))))+d(4))))+((d(3)\*(d(1)-d(4)))/(d(4)-(((d(3)+d(1))-(d(5)-d(1)))\*(G4C0+d(3)))))+((d(6)\*atan(d(2)))-((((G5C0+G5C0)-atan(G5C0))+G5C0)+(1.0/((1.0/(G5C0))))))+  atan((d(6)+tanh((((d(3)\*(d(6)-G6C0))/(atan(d(4))-d(2)))/(1.0/(G6C0))))))+((((d(3)\*G7C0)\*G7C0)\*((d(6)+G7C0)-atan(d(5))))\*(((G7C0\*G7C0)+d(6))\*(d(6)\*d(5))))+(d(1)\*(d(1)\*(G8C0-((d(1)+(d(1)+d(1)))\*((d(2)-d(4))\*(d(5)/G8C0)))))) | G1C0 = 0.371762928228581;  G2C0 = 1.77342737616124;  G3C0 = -0.236819368964381;  G4C0 = 1.0390048933439;  G5C0 = -0.421081407489064;  G6C0 = 5.57955581552089e-02;  G7C0 = -1.56178949278465;  G8C0 = 0.612887362044183 |

d(1): Bandgap (eV), d(2): Thickness (nm), d(3): Cs, d(4): Pb; d(5): I; d(6): Br

شکل 5: تصویر GEP-5 به عنوان درخت بیان 

در جدول 6، مقادیر آزمایشی و تخمینی PCE ارائه شده توسط دو مدل GEP مقایسه شده است. این مقایسه کارایی بالای GEP-5 و GEP-9 را تایید می کند. علاوه بر این، شکل 6 به صورت شماتیک تمام داده های تجربی را در دو مرحله آزمایش و آموزش بیشتر برای دو مدل فوق نشان می دهد. همانطور که نشان داده شد، پیش‌بینی PCE توسط GEP-5 دقیق‌تر از GEP-9 بود.

جدول 6: نمایش بازده تبدیل توان پیش بینی شده (PCE) و مقادیر باقیمانده به دست آمده از مدل های GEP-5، GEP-9

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| No. | Experimental PCE (%) |  | Predicted PCE (%) | |  | Absolute residual error (%) | |
| **GEP-5** | **GEP-9** | **GEP-5** | **GEP-9** |
| 1 | 13.40 |  | 12.529 | 12.668 |  | 0.871 | 0.732 |
| 2 | 13.50 |  | 12.456 | 12.323 |  | 1.044 | 1.177 |
| 3 | 6.40 |  | 6.375 | 6.394 |  | 0.025 | 0.006 |
| 4 | 6.00 |  | 5.975 | 5.985 |  | 0.026 | 0.015 |
| 5 | 9.70 |  | 9.716 | 9.448 |  | -0.016 | 0.252 |
| 6 | 4.10 |  | 4.075 | 4.360 |  | 0.025 | -0.260 |
| 7 | 10.10 |  | 10.153 | 10.045 |  | -0.053 | 0.055 |
| 8 | 10.30 |  | 10.177 | 10.405 |  | 0.123 | -0.105 |
| 9 | 9.60 |  | 9.707 | 9.603 |  | -0.107 | -0.003 |
| 10 | 9.90 |  | 9.934 | 9.858 |  | -0.034 | 0.042 |
| 11 | 6.70 |  | 6.843 | 6.757 |  | -0.143 | -0.057 |
| 12 | 13.30 |  | 13.083 | 11.690 |  | 0.217 | 1.610 |
| 13 | 10.00 |  | 9.880 | 9.934 |  | 0.120 | 0.066 |
| 14 | 11.20 |  | 10.993 | 11.219 |  | 0.207 | -0.019 |
| 15 | 13.50 |  | 12.806 | 12.668 |  | 0.694 | 0.832 |
| 16 | 7.70 |  | 7.829 | 7.632 |  | -0.129 | 0.068 |
| 17 | 11.30 |  | 11.181 | 11.270 |  | 0.119 | 0.030 |
| 18 | 13.70 |  | 12.870 | 12.889 |  | 0.830 | 0.811 |
| 19 | 5.50 |  | 5.492 | 5.502 |  | 0.008 | -0.002 |
| 20 | 11.47 |  | 11.480 | 11.471 |  | -0.010 | -0.001 |
| 21 | 11.53 |  | 11.633 | 11.539 |  | -0.103 | -0.009 |
| 22 | 10.80 |  | 10.771 | 10.785 |  | 0.029 | 0.015 |
| 23 | 12.00 |  | 11.631 | 12.046 |  | 0.369 | -0.046 |
| 24 | 8.02 |  | 8.026 | 8.016 |  | -0.006 | 0.004 |
| 25 | 13.88 |  | 13.335 | 12.891 |  | 0.545 | 0.989 |
| 26 | 7.36 |  | 7.345 | 7.375 |  | 0.015 | -0.015 |



شکل 6: مقایسه مقادیر تجربی و نظری محاسبه شده توسط GEP-5 و GEP-9 برای تست و آموزش

تحلیل حساسیت یکی از روش های رایج برای تعیین و مقایسه اثر پارامترهای عملیاتی بر کمیت خروجی است. اساس این روش ایجاد نویز به یکی از آن­ها است پارامترهای عملیاتی در این روش پس از تعیین بهترین مدل، درصدهای مختلفی از میانگین مقدار ورودی به آن اضافه می شود و مقدار سایر پارامترهای ورودی ثابت نگه داشته می شود. در مقدار متوسط فاصله مورد بررسی [82]. انتظار می رود که همین تغییر در پارامتر موثرتر باعث تغییر بیشتر در خروجی شود. با توجه به اینکه GEP-5 به عنوان بهترین مدل انتخاب شد ، برای تعیین میزان و سهم پارامترهای انتخابی لایه پروسکایت بر PCE سلول‌های خورشیدی استفاده شد. شکل 7 نتایج مربوط به نویز 5 و 10 درصدی هر پارامتر عملیاتی را نشان می دهد. همانطور که نشان داده شد، گاف نواری، درصد جرمی سزیم (Cs)، سرب (Pb) و ید (I) موثرترین پارامترها بر روی PCE هستند و سایر پارامترها تأثیر کمتری داشتند.



شکل 7: تجزیه و تحلیل حساسیت به عنوان درصد تغییر PCE در مقادیر مختلف نویز داده شده به هر پارامتر عملیاتی (5٪ و 10٪).

نتیجه تحلیل حساسیت با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. برای مثال سلطانی و همکاران، گزارش داده اند که پروسکایت CsGeBr3 سنتز شده در دمای سنتز 120 درجه سانتی گراد و زمان واکنش 360 دقیقه منجر به بالاترین بازده سلول خورشیدی سیلیکونی می شود [81]. علاوه بر این، همانطور که میررشادی و همکاران نشان دادند [84،85]، تنظیم شکاف باند نوری پروسکایت‌های CH3NH3PbX3، (C4H9NH3)2PbX4 و (C6H5(CH2)2NH3)2PbX4 را می‌توان با جایگزینی X = Cl توسط Br. بخش آلی در ساختارها بنابراین، نتایج آن­ها توضیح داد که قابلیت تنظیم خواص نوری و مهندسی ساختارهای نواری پروسکایت­ها منجر به دستیابی به راندمان بالا در سلول­های خورشیدی مبتنی بر پروسکایت می­شود.

**نتیجه گیری**

علی­رغم بهبود قابل توجه در PCE و پایداری سلول های خورشیدی پروسکایت غیرآلی، آن­ها همچنان عملکرد پایین­تری نسبت به نوع آلی دارند. بر این اساس، درک عوامل موثر بر لایه پروسکایت در PCE نقش مهمی در درک رفتار این سلول‌های خورشیدی دارد. اثر پارامترهای عملی و اجزای لایه پروسکایت غیرآلی تهیه شده با روش پوشش چرخشی بر روی سلول‌های خورشیدی پروسکایت با استفاده از GEP مدل‌سازی شد که PCE را می‌توان تابعی از ترکیب شیمیایی، پهنای باند و ضخامت لایه پروسکایت تخمین زد. در این راستا 9 مدل GEP معرفی شد. نتایج نشان می دهد که GEP-5 با 2R ، RMSE، MSE و RRSE برابر با 0.9111، 0.0878، 0.0077 و 0.2996، در مرحله آموزش و 3.3455، 0.7069، 0.4997 و 9.2198 برای آزمون مناسب ترین مدل است.

سپس با استفاده پیش بینی PCE از مدل GEP-5، آنالیز حساسیت برای تعیین اثر پارامترهای انتخاب شده بر PCE سلول­های خورشیدی پروسکایت انجام شد. نتایج نشان داد که درصد جرمی سزیم و درصد جرمی برم به ترتیب بیشترین و کمترین پارامتر را در PCE داشتند. با توجه به دقت بالای مدل پیشنهادی، می توان از آن برای طراحی و تخمین PCE سلول­هایی که لایه پروسکایت آن­ها در محدوده ترکیب شیمیایی تغییر می کند، استفاده کرد.

**مراجع و منابع**

[1] R. Montecucco, E. Quadrivi, R. Po, G. Grancini, All-Inorganic Cesium-Based Hybrid Perovskites for Efficient and Stable Solar Cells and Modules, Adv. Energy Mater. 11 (2021) 2100672. https://doi.org/10.1002/aenm.202100672.  
 [2] W.-L. Xu, H. Yuan, X.-Y. Yang, Y. Zhang, M. Zheng, Tin-based all-inorganic perovskite photodetectors fabricated by chemical vapor deposition, Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures. 134 (2021) 114843. https://doi.org/10.1016/j.physe.2021.114843.

[3] H. Mehdi, A. Mhamdi, A. Bouazizi, Effect of annealing treatment on the properties of inverted solar cells based on mixed halide perovskite, Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures. 119 (2020) 114000. doi:https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114000.

[4] N. A. N. Ouedraogo, Y. Chen, Y. Y. Xiao, Q. Meng, C. B. Han, H. Yan and Y. Zhang, Stability of all-inorganic perovskite solar cells, Nano Energy. 67 (2020) 104249. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104249.

[5] X. Gu, W. Xiang, Q. Tian, S. Liu, Rational Surface‐Defect Control via Designed Passivation for High‐Efficiency Inorganic Perovskite Solar Cells, Angewandte Chemie. 133(2021) 23348-23354. https://doi.org/10.1002/ange.202109724.

[6] J.  Tian, Q.  Xue, Q.  Yao, N.  Li, C. J.  Brabec, H.-L.  Yip, Inorganic Halide Perovskite Solar Cells: Progress and Challenges, Adv. Energy Mater. 10 (2020) 2000183. https://doi.org/10.1002/aenm.202000183.

[7] H. Abdulsalam, G. Babaji, H. T. Abba, The Effect of Temperature and Active layer thickness on the Performance of CH3NH3PbI3 Perovskite Solar Cell: A Numerical Simulation Approach, J. Found. Appl. Phys. 5 (2018) 141-151.  
[8] Z. Yang, A. Rajagopal, S. B. Jo, C.-C. Chueh, S. Williams, C.-C. Huang, J.K. Katahara, H.W. Hillhouse, A.K.-Y. Jen, Stabilized wide bandgap perovskite solar cells by tin substitution, Nano Lett. 16 (2016) 7739-7747. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03857.  
[9] A. Hima, A. Khechekhouche, I. Kemerchou, N. Lakhdar, B. Benhaoua, F. Rogti, ITelli,A.Saadoun, GPVDM simulation of layer thickness effect on power conversion efficiency of CH3NH3PbI3 Based planar heterojunction solar cell, Int. J. Energetica. 3 (2018) 37-41. doi:<https://www.ijeca.info/>.  
[10] R. Chen, Y. Hui, B. Wu, Y. Wang, X. Huang, Z. Xu, P. Ruan, W. Zhang, F. Cheng, W. Zhang, J. Yin, J. Li, N. Zheng, Moisture-tolerant and high-quality α-CsPbI3 films for efficient and stable perovskite solar modules, J. Mater. Chem. A. 8 (2020) 9597-9606. https://doi.org/10.1039/D0TA01968B.  
[11] X. Liu, X. Tan, Z. Liu, H. Ye, B. Sun, T. Shi, Z. Tang, G. Liao, Boosting the efficiency of carbon-based planar CsPbBr3 perovskite solar cells by a modified multistep spin-coating technique and interface engineering, Nano Energy. 56 (2019) 184–195. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.053.  
[12] C. F. J. Lau, X. Deng, Q. Ma, J. Zheng, J. S. Yun, M. A. Green, S. Huang, A. W. Y. Ho-Baillie, CsPbIBr2 Perovskite Solar Cell by Spray-Assisted Deposition, ACS Energy Lett. 1 (2016) 573–577. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00341.  
[13] Y. Fan, J. Fang, X. Chang, M.-C. Tang, D. Barrit, Z. Xu, Z. Jiang, J. Wen, H. Zhao, T. Niu, D.-M. Smilgies, S. Jin, Z. Liu, E. Q. Li, A. Amassian, S. Liu, K. Zhao, Scalable Ambient Fabrication of High-Performance CsPbI2Br Solar Cells, Joule, 3 (2019) 2485-2502. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.015.  
[14] J. B. Hoffman, G. Zaiats, I. Wappes and P. V. Kamat, CsPbBr3 Solar Cells: Controlled Film Growth through Layer-by-Layer Quantum Dot Deposition, Chem. Mater. 29 (2017) 9767-9774. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03751.

[15] A. Swarnkar, A. R. Marshall, E. M. Sanehira, B. D. Chernomordik, D. T. Moore, J. A. Christians, T. Chakrabarti and J. M. Luther, Quantum dot–induced phase stabilization of α-CsPbI3 perovskite for high-efficiency photovoltaics, Science. 354 (2016) 92-95. https://doi.org/10.1126/science.aag2700.

[16] J. Zhang, D. Bai, Z. Jin, H. Bian, K. Wang, J. Sun, Q. Wang and S. F. Liu, 3D–2D–0D Interface Profiling for Record Efficiency All-Inorganic CsPbBrI2 Perovskite Solar Cells with Superior Stability, Adv. Energy Mater. 8 (2018) 1703246. https://doi.org/10.1002/aenm.201703246.  
[17] C.Y. Chen, H.Y. Lin, K.M. Chiang, W.L. Tsai, Y.C. Huang, C.S. Tsao, H.W. Lin, All-Vacuum-Deposited Stoichiometrically Balanced Inorganic Cesium Lead Halide Perovskite Solar Cells with Stabilized Efficiency Exceeding 11%, Adv. Mater. 29 (2017) 1605290. https://doi.org/10.1002/adma.201605290.  
[18] Q. Ma, S. Huang, X. Wen, M.A. Green, A.W.Y. Ho-Baillie, Hole transport layer free inorganic CsPbIBr2 perovskite solar cell by dual source thermal evaporation, Adv. Energy Mater. 6 (2016) 1502202. https://doi.org/10.1002/aenm.201502202.

[19] J. Lei, F. Gao, H. Wang, J. Li, J. Jiang, X. Wu, R. Gao, Z. Yang, S. Liu, Efficient planar CsPbBr3 perovskite solar cells by dual-source vacuum evaporation, Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 187 (2018) 1–8. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.009.

[20] L.A. Frolova, D.V. Anokhin, A.A. Piryazev, S.Y. Luchkin, N.N. Dremova, K.J. Stevenson, P.A. Troshin, Highly efficient all-inorganic planar heterojunction perovskite solar cells produced by thermal coevaporation of CsI and PbI2, J. Phys. Chem. Lett. 8 (2017) 67–72. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.6b02594.  
[21] W.J. Chen, J.W. Zhang, G.Y. Xu, R.G. Xue, Y.W. Li, Y.H. Zhou, J.H. Hou, Y.F. Li, A Semitransparent Inorganic Perovskite Film for Overcoming Ultraviolet Light Instability of Organic Solar Cells and Achieving 14.03% Efficiency, Adv. Mater. 30 (2018) 1800855. https://doi.org/10.1002/adma.201800855.

[22] J. Li, R. R. Gao, F. Gao, J. Lei, H. X. Wang, X. Wu, J. B. Li, H. Liu, X. D. Hua, S. Z. Liu, Fabrication of efficient CsPbBr3 perovskite solar cells by single-source thermal evaporation, J. Alloys Compd. 818 (2020) 152903. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152903.

[23] B. Gao, J. Meng, High efficiently CsPbBr3 perovskite solar cells fabricated by multi-step spin coating method, Solar Energy. 211 (2020) 1223–1229. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.045.  
[24] J. Zheng, M. Zhang, C.F.J. Lau, X. Deng, J. Kim, Q. Ma, C. Chen, M.A. Green, S. Huang, A.W.Y. Ho-Baillie, Spin-coating free fabrication for highly efficient perovskite solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 168 (2017) 165–171. http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.029.

[25] O. Granas, D. Vinichenko and E. Kaxiras, Establishing the limits of efficiency of perovskite solar cells from first principles modeling, Sci. Rep. 6 (2016) 36108. https://doi.org/10.1038/srep36108.

[26] J.L. Duan, H.Z. Xu, W.E.I. Sha, Y.Y. Zhao, Y.D. Wang, X.Y. Yang, Q.W. Tang, Inorganic perovskite solar cells: An emerging member in photovoltaic community, J. Mater. Chem. A. 7 (2019) 21036- 21068. https://doi.org/10.1039/C9TA06674H.

[27] Q. Tao, P. Xu, M. Li, W. Lu, Machine learning for perovskite materials design and discovery, npj Comput. Mater. 7 (2021) 23. https://doi.org/10.1038/s41524-021-00495-8.

[28] A. Muradov, D. Frolushkina, V. Samusenkov, G. Zhamanbayeva, S. Kot, Methods of Stability Control of Perovskite Solar Cells for High Efficiency, Energies. 14 (2021) 2918. https://doi.org/10.3390/en14102918.

[29] E. M. Sanehira, A. R. Marshall, J. A. Christians, S. P. Harvey, P. N. Ciesielski, L. M. Wheeler, P. Schulz, L. Y. Lin, M. C. Beard, J. M. Luther, Enhanced mobility CsPbI3 quantum dot arrays for record-efficiency, high-voltage photovoltaic cells, Sci. Adv. 3 (2017) eaao4204. https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4204.  
[30] C. F. J. Lau, X. Deng, J. Zheng, J. Kim, Z. Zhang, M. Zhang, J. Bing, B. Wilkinson, L. Hu, R. Patterson, S. Huang, A. Ho-Baillie, Enhanced performance via partial lead replacement with calcium for a CsPbI3 perovskite solar cell exceeding 13% power conversion efficiency, J. Mater. Chem. A. 6 (2018) 5580-5586. https://doi.org/10.1039/C7TA11154A.

[31] E. M. Hutter, R. J. Sutton, S. Chandrashekar, M. Abdi-Jalebi, S. D. Stranks, H. J. Snaith and T. J. Savenije, Vapour-Deposited Cesium Lead Iodide Perovskites: Microsecond Charge Carrier Lifetimes and Enhanced Photovoltaic Performance, ACS Energy Lett. 2 (2017) 1901-1908. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00591.

[32] M. Kulbak, D. Cahen and G. Hodes, How Important Is the Organic Part of Lead Halide Perovskite Photovoltaic Cells? Efficient CsPbBr3 Cells, J. Phys. Chem. Lett. 6 (2015) 2452-2456. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.5b00968.

[33] J. Duan, Y. Zhao, B. He,Q. Tang, High-Purity Inorganic Perovskite Films for Solar Cells with 9.72 % Efficiency, Angew. Chem. Int. Ed. 57 (2018) 3787-3791. https://doi.org/10.1002/anie.201800019.

[34] J. Duan, Y. Zhao, B. He, Q. Tang, Simplified Perovskite Solar Cell with 4.1% Efficiency Employing Inorganic CsPbBr3 as Light Absorber, Small. 14 (2018) 1704443. https://doi.org/10.1002/smll.201704443.  
[35] J. Duan, Y. Zhao, X. Yang, Y. Wang, B. He, Q. Tang, Lanthanide Ions Doped CsPbBr3 Halides for HTM-Free 10.14%-Efficiency Inorganic Perovskite Solar Cell with an Ultrahigh Open-Circuit Voltage of 1.594 V, Adv. Energy Mater. 8 (2018) 1802346. https://doi.org/10.1002/aenm.201802346.  
[36] H. Yuan, Y. Zhao, J. Duan, Y. Wang, X. Yang, Q. Tang, All-inorganic CsPbBr3 perovskite solar cell with 10.26% efficiency by spectra engineering, J. Mater. Chem. A. 6 (2018) 24324-24329. https://doi.org/10.1039/C8TA08900K  
[37] Y. Zhao, Y. Wang, J. Duan, X. Yang, Q. Tang, Divalent hard Lewis acid doped CsPbBr3 films for 9.63%-efficiency and ultra-stable all-inorganic perovskite solar cells, J. Mater. Chem. A. 7 (2019) 6877-6882. https://doi.org/10.1039/C9TA00761J.

[38] Y. Li, J. Duan, H. Yuan, Y. Zhao, B. He, Q. Tang, Lattice Modulation of Alkali Metal Cations Doped Cs1−xRxPbBr3 Halides for Inorganic Perovskite Solar Cells, Sol. RRL, 2 (2018) 1800164. https://doi.org/10.1002/solr.201800164.

[39] R. Beal, D. Slotcavage, T. Leijtens, A. Bowring, R. Belisle, W. Nguyen, G. Burkhard, E. Hoke, M. McGehee, Cesium Lead Halide Perovskites with Improved Stability for Tandem Solar Cells, J. Phys. Chem. Lett. 7 (2016) 746-751. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.6b00002.

[40] C. Liu, W. Li, C. Zhang, Y. Ma, J. Fan, Y. Mai, All-Inorganic CsPbI2Br Perovskite Solar Cells with High Efficiency Exceeding 13%, J. Am. Chem. Soc. 140 (2018) 3825-3828. https://doi.org/10.1021/jacs.7b13229.

[41] J. K. Nam, S. U. Chai, W. Cha, Y. J. Choi, W. Kim, M. S. Jung, J. Kwon, D. Kim, J. H. Park, Potassium Incorporation for Enhanced Performance and Stability of Fully Inorganic Cesium Lead Halide Perovskite Solar Cells, Nano Lett. 17 (2017) 2028-2033. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00050.

[42] C. F. J. Lau, M. Zhang, X. Deng, J. Zheng, J. Bing, Q. Ma, J. Kim, L. Hu, M. A. Green, S. Huang, A. H. Baillie, Strontium-Doped Low-Temperature-Processed CsPbI2Br Perovskite Solar Cells, ACS Energy Lett. 2 (2017) 2319-2325. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00751.

[43] D. Bai, J. Zhang, Z. Jin, H. Bian, K. Wang, H. Wang, L. Liang, Q. Wang, S. F. Liu, Interstitial Mn2+-Driven High-Aspect-Ratio Grain Growth for Low-Trap-Density Microcrystalline Films for Record Efficiency CsPbI2Br Solar Cells, ACS Energy Lett. 3 (2018) 970-978. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b00270.

[44] Q. Ma, S. Huang, S. Chen, M. Zhang, C. F. J. Lau, M. N. Lockery, H. K. Mulmudi, Y. Shan, J. Yao, J. Zheng, X. Deng, K. Catchpole, M. A. Green, A. W. Y. HoBaillie, The Effect of Stoichiometry on the Stability of Inorganic Cesium Lead Mixed-Halide Perovskites Solar Cells, J. Phys. Chem. C. 121 (2017) 19642-19649. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b06268.

[45] J. Liang, P. Zhao, C. Wang, Y. Wang, Y. Hu, G. Zhu, L. Ma, J. Liu, Z. Jin, CsPb0.9Sn0.1IBr2 Based All-Inorganic Perovskite Solar Cells with Exceptional Efficiency and Stability, J. Am. Chem. Soc. 139 (2017)14009-14012. https://doi.org/10.1021/jacs.7b07949.

[46] W. Xiang, Z. Wang, D. J. Kubicki, W. Tress, J. Luo, D. Prochowicz, M. Grätzel, Europium-Doped CsPbI2Br for Stable and Highly Efficient Inorganic Perovskite Solar Cells, Joule. 3 (2019) 205-214. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.008.

[47] C. Liu, W. Li, J. Chen, J. Fan, Y. Mai, R. E. Schropp, Ultra-thin MoOx as cathode buffer layer for the improvement of all-inorganic CsPbIBr2 perovskite solar cells, Nano Energy. 41 (2017) 75-83. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.048.

[48] S. Gupta, T. Bendikov, G. Hodes, D. Cahen, CsSnBr3, A Lead-Free Halide Perovskite for Long-Term Solar Cell Application: Insights on SnF2 Addition, ACS Energy Lett. 1 (2016) 1028-1033. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00402.

[49] W. Li, J. Li, J. Li, J. Fan, Y. Mai, L. Wang, Addictive-assisted construction of all-inorganic CsSnIBr2 mesoscopic perovskite solar cells with superior thermal stability up to 473 K, J. Mater. Chem.A. 4 (2016) 17104-17110. https://doi.org/10.1039/C6TA08332C.

[50] Y. Hu, S. Zhang, T. Shu, T. Qiu, F. Bai, W. Ruan, F. Xu, Highly efficient flexible solar cells based on a room-temperature processed inorganic perovskite, J. Mater. Chem. A. 6 (2018) 20365-20373. https://doi.org/10.1039/C8TA06719H.

[51] N. Li, Z. Zhu, J. Li, A. K. Y. Jen, L. Wang, Inorganic CsPb1−xSnxIBr2 for Efficient Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells, Adv. Energy Mater. 8 (2018) 1800525. https://doi.org/10.1002/aenm.201800525.

[52] F. Yang, D. Hirotani, G. Kapil, M. A. Kamarudin, C. H. Ng, Y. Zhang, Q. Shen, S. Hayase, All-Inorganic CsPb1-x GexI2 Br Perovskite with Enhanced Phase Stability and Photovoltaic Performance, Angew. Chem., Int. Ed. 57 (2018) 12745-12749. https://doi.org/10.1002/anie.201807270.

[53] F. Igbari, R. Wang, Z.-K. Wang, X.-J. Ma, Q. Wang, K.-L. Wang, Y. Zhang, L.-S. Liao, Y. Yang, Composition Stoichiometry of Cs2AgBiBr6 Films for Highly Efficient Lead-Free Perovskite Solar Cells, Nano Lett. 19 (2019) 2066-2073. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00238.

[54] Y. Guo, F. Zhao, J. Tao, J. Jiang, J. Zhang, J. Yang, Z. Hu, J. Chu, Efficient and Hole-Transporting-Layer-Free CsPbI2Br Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells through Rubidium Passivation, Chem Sus Chem. 12 (2019) 983-989. https://doi.org/10.1002/cssc.201802690.

[55] W. Li, M. U. Rothmann, A. Liu, Z. Wang, Y. Zhang, A. R. Pascoe, J. Lu, L. Jiang, Y. Chen, F. Huang, Phase Segregation Enhanced Ion Movement in Efficient Inorganic CsPbIBr2 Solar Cells, Adv. Energy Mater. 7 (2017) 1700946. https://doi.org/10.1002/aenm.201700946.

[56] L. Chen, L. Wan, X. Li, W. Zhang, S. Fu, Y. Wang, S. Li, H.-Q. Wang, W. Song, J. Fang, Inverted All-Inorganic CsPbI2Br Perovskite Solar Cells with Promoted Efficiency and Stability by Nickel Incorporation, Chem. Mater. 31 (2019) 9032-9039. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b03277.

[57] J. Liang, Z. Liu, L. Qiu, Z. Hawash, L. Meng, Z. Wu, Y. Jiang, L. K. Ono, Y. Qi, Enhancing Optical, Electronic, Crystalline, and Morphological Properties of Cesium Lead Halide by Mn Substitution for High-Stability All-Inorganic Perovskite Solar Cells with Carbon Electrodes, Adv. Energy Mater. 8 (2018) 1800504. https://doi.org/10.1002/aenm.201800504.

[58] Z. Sundararajan, R. Knoll, P. Hombach, M. Becker, J.L. Schultze, T. Ulas, Shiny-seq: Advances guided transcriptome analysis, BMC Res. Notes. 12 (2019) 432. https://doi.org/10.1186/s13104-019-4471-1.

[59] C. Ferreira, Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems, Complex Systems. 13 (2001) 87–129.  
[60] C. Ferreira, Automatically Defined Functions in Gene Expression Programming. In: Nedjah N., Mourelle L..M., Abraham A. (eds) Genetic Systems Programming. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg. 13 (2006), pp. 21-56. https://doi.org/10.1007/3-540-32498-4\_2.  
[61] C. Ferreira, Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence, Springer, Berling, Heidelberg New York. 2006, 478 pp.

[62] B.M. Hasni Zade, N. Mansouri, M.M. Javidi, SAEA: A security-aware and energy-aware task scheduling strategy by Parallel Squirrel Search Algorithm in cloud environment. Expert Systems with Applications, 176 *(*2021) 114915. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114915.

[63] S.Y. El-Bakry, E.S.A. El-Dahshan, S.A. Al-Awfi, M.Y. El-Bakry, Gene expression programming approach to laser-guided atoms, IL NUOVO CIMENTO. 125 B, N. 10 (2010) 1143-1151. https://doi.org/10.1393/ncb/i2010-10925-0.

[64] Q. Zhang, C. Zhou, W. Xiao, Nelson PC Improving gene expression programming performance by using differential evolution. In: William C (ed), Sixth international conference on machine learning and applications (ICMLA 2007). https://doi.org/10.1109/ICMLA.2007.62  
[65] L. Iliadis, I. Maglogiannis, G. Tsoumakis, I. Vlahavas, M. Bramer, Artificial intelligence applications and innovations: proceedings of the 5th IFIP conference on artificial intelligence applications and innovations, Springer, Incorporated. 2009.

[66] L.Teodorescu, D. Sherwood, High Energy Physics event selection with Gene Expression Programming, Comput. Phys. Commun. 178 (2008) 409-419. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.10.003.

[67] M. Sarıdemir, Effect of specimen size and shape on compressive strength of concrete containing fly ash: Application of genetic programming for design, Mater Des. 56 (2014) 297-304.  
[68] S. Jafari, S.S. Mahini, Lightweight concrete design using gene expression programming, Constr Build Mater. 139 (2017) 93-100. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.120.  
[69] A. Okhovat, S.M. Mousavi, Modeling of arsenic, chromium and cadmium removal by nanofiltration process using genetic programming, Appl Soft Comput. 12(2) (2012) 793-799. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.10.012.

[70] M. Zadshakoyan, V.Pourmostaghimi, Genetic equation for the prediction of tool–chip contact length in orthogonal cutting, Eng Appl Artif Intel. 26 (2013) 1725-1730. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.10.016.

[71] G. Khalaj, A.Nazari, S.M.M. Khoie, M.J. Khalaj, H. Pouraliakbar, Chromium carbonitride coating produced on DIN 1.2210 steel by thermo-reactive deposition technique: thermodynamics, kinetics and modeling, Surf Coat Technol. 225 (2013) 1-10. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.030.

[72] C. Zhou, W. Xiao, T.M. Tirpak, P.C. Nelson, Evolving accurate and compact classification rules with gene expression programming, IEEE Trans. Evolut. Comput. 7 (2003) 519-531. https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.819261.

[73] L. Teodorescu, Gene Expression Programming Approach to Event Selection in High Energy Physics, IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 2221-2227. https://doi.org/ 10.1109/TNS.2006.878571.

[74] M. Mahdavi Jafari, S. Soroushian, G.R. Khayati, Hardness Optimization for Al6061-MWCNT Nanocomposite Prepared by Mechanical Alloying Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm, Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured. 50 (2017) 23-32. [https://doi.org/10.7508/jufgnsm.2017.01.04](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02744).

[75] İB. Topçu, M.Sarıdemir, Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic, Comput Mater Sci, 41 (2008) 305-311. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.04.009.

[76] M. Sarıdemir, Genetic programming approach for prediction of compressive strength of concretes containing rice husk ash, Constr Build Mater. 24 (2010) 1911-1919. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.011.

[77] A. Hunter, L. Kennedy, J. Henry, I. Ferguson, Application of neural networks and sensitivity analysis to improved prediction of trauma survival, Comput Meth Prog Biomed. 62 (2000) 11-19. https://doi.org/10.1016/S0169-2607(99)00046-2.

[78] R. Sattari, G.R. Khayati, Prediction of the size of silver nanoparticles prepared via green synthesis: A gene expression programming approach, Scientia Iranica. 27 (2020) 3399-3411. https://doi.org/10.24200/SCI.2020.53209.3112.

[79] H. Hasibia, A. Mahmoudianb, G. R. Khayati, Modified Particle Swarm Optimization-Artificial Neural Network and Gene Expression Programing for Predicting High Temperature Oxidation Behavior of Ni–Cr–W-Mo Alloys, IJE TRANSACTIONS B: Applications. 33 (2020) 2327-2338. https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.11B.23.

[80] H. Eshtiagh-Hosseini, M.R. Housaindokht, M. Chahkandi, Effects of parameters of sol–gel process on the phase evolution of sol–gel-derived hydroxyapatite, Mater Chem Phys. 106 (2007) 310-316. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.06.002.

[81] A. Bigi, E. Boanini, K. Rubini, Hydroxyapatite gels and nanocrystals prepared through a sol–gel process, J Solid State Chem. 177 (2004) 3092-3098. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2004.05.018.

[82] M. Dehestani, [G.R. Khayati](https://scholar.google.com/citations?user=OZKpH5wAAAAJ&hl=en&oi=sra), S. Sharafi, An improved optimization model to predict the microhardness of Ni/Al2O3 nanocomposite coatings prepared by electrodeposition: A hybrid artificial neural network-modified particle swarm optimization approach, Measurement. 179 (2021) 109423. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109423.

[83] M.H. Soltani, A. Reyhani, A. Taherkhani, S. Mirershadi, S.Z. Mortazavi, Efficiency enhancement of Si solar cell based on spectral down-shifting property of CsGeBr3 optimized by time and temperature of synthesis, J Mater Sci: Mater Electron. 32 (2021) 15675-15686. https://doi.org/10.1007/s10854-021-06120-0.

[84] S. Mirershadi, F. Sattari, Effect of organic cation composition and halogen atom type on 2D-layered organic–inorganic hybrids for luminescent solar concentrator, J Mater Sci: Mater Electron. 32 (2021) 12939-12950. https://doi.org/10.1007/s10854-020-04899-y.

[85] S. Mirershadi, F. Sattari, S.G. Sorkhabi, A.M. Shokri, Pressure-Induced Optical Band Gap Transition in Methylammonium Lead Halide Perovskites, J. Phys. Chem. C. 123 (2019) 12423-12428. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02744>.