غزني تخنيکي پوهنتون

د علمي څېړنو او مجلې معاونيت

د علمي مجلې آمريت

د علمي مجلې عمومي مديريت

زرکشان انجنيري مطالعاتو علمي، څیړنیز ژورنال

لومړی کال، دوهمه(۲) ګڼه، ۱۴۰۵ل پسرلی، مطابق ۱۴۴۷ق

بسم الله الرحمن الرحيم

زرکشان

د غزني تخنيکي پوهنتون علمي- څېړنيزه مجله

مجله علمی- تحقیقی پوهنتون تخنیکی غزنی

د ليکنې هيئت غړي/ اعضای هیئت تحریر

پوهنمل محمدنعیم سروري

پوهنمل سیدعدنان موسوی

پوهنمل دوست محمدسروری

پوهنیار محمدلطیف رحیمی

پوهنیار وحیدالله زغم

پوهنیار محمدحنیف رحیمی

پوهنیار محمد ضیا جمال

نوماند پوهنیار سلیمان احمدی

نوماند پوهنیار حاجی محمد همت

د امتیاز خښتن	غزني تخنيکي پوهنتون
مسؤل مدير	پوهنمل اسدالله شاکر
سردبير	پوهندوی مسعود دانشمل
د مجلې عمومي مدير	خالداحمد احساس
د مجلې د نشريي مدير	رحمت الله ساجد
ويب سايټ	www.teug.edu.af
ايميل	research.gtu@teug.edu.af info@teug.edu.af
د اړيکو شمېرې	۰۷۰۰۰۵۵۷۸۸ / ۰۷۹۵۶۶۲۵۶۵
پته	غزني تخنيکي پوهنتون، د علمي څېړنو او مجلې معاونيت

د غزني تخنیکي پوهنتون د علمي څېړنو او مجلې معاونیت پیغام

الحمدُ للهِ ربِّ العالمین، والصلاةُ والسلامُ علی سیِّدِنا محمدٍ، وعلی آلهِ وأصحابِه أجمعین.

أمّا بعد: قال اللهُ تعالی في محکمِ تنزیلِه إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ(سورة آل عمران: ۱۹۰)

په معاصر علمي نظام کې علمي ـ څېړنیزې مجلې د پوهې د تولید، پراختیا او معیاري کولو بنسټیز رول لري. دا مجلې نه یوازې د څېړنیزو موندنو د خپرولو اغېزمن میکانیزم ګڼل کېږي، بلکې د علمي تفکر د ودې، نوښت د پیاوړتیا او د علمي بنسټونو ترمنځ د اړیکو د ټینګښت مهمه وسیله هم ده.

د همدې ارزښتناک هدف په رڼا کې، د غزني تخنیکي پوهنتون د علمي څېړنو او مجلې معاونیت په خوښۍ سره د خپلې علمي مجلې **زرکشان د انجنیري مطالعاتو علمي او څېړنیز ژورنال** د دوهم ټوک د خپرېدو زېری له علمي ټولنې سره شریکوي. دا مجله چې په ۱۴۰۴ هـ ش کال کې یې د رسمي چاپ جواز تر لاسه کړی، نن د یاد ټوک په خپرېدو سره د علمي فعالیتونو راپېل شوي هڅې ته دوام ورکوي.

زرکشان د انجنیري مطالعاتو علمي څېړنیز ژورنال د انجنیري علومو او اړوندو تطبیقي څانګو په برخه کې د معیاري علمي مقالو د خپرولو لپاره رامنځته شوی، څو د هېواد د پوهنتونونو استادانو، څېړونکو، محصلینو او مسلکي څېړنیزو مرکزونو ته یو باوري علمي منبر برابر کړي. دا ژورنال هڅه کوي چې د ملي اړتیاوو، تخنیکي ستونزو او علمي نوښتونو ترمنځ علمي اړیکه رامنځته کړي او د نظري او تطبیقي څېړنو ترمنځ واټن راکم کړي.

د مقالې ارزونه په دې مجله کې د علمي امانت، بې‌طرفۍ او دقیقې علمي کره کتنې (Peer Review)پر اصولو ولاړه ده، څو خپرېدونکې لیکنې د کیفیت، نوښت او علمي ارزښت له پلوه د باور وړ وي. موږ باور لرو چې دا مجله به د څېړنیز کلتور د پیاوړتیا، د علمي تولید د زیاتوالي او د غزني تخنیکي پوهنتون د علمي اعتبار د لوړولو لپاره دوامداره اغېزمن ګامونه پورته کړي.

په پای کې، د علمي څېړنو او مجلې معاونیت د دې مجلې د دوهم ټوک د چاپ په بهیر کې د لوړو زده کړو قدرمن وزارت، د څېړنې، تألیف او ژباړې ریاست، د پوهنتون رهبري، د مجلې د مسؤل مدیر، د تحریر پلاوي، د علمي داورانو او ټولو هغو استادانو او څېړونکو څخه صمیمانه مننه کوي چې د خپلو ارزښتناکو علمي آثارو او همکارۍ له لارې یې د دې علمي ژورنال د ایښودل شوي بنسټ د محکم کولو او دوهم ټوک د خپرېدو زمینه برابره کړې ده. هیله ده چې « زرکشان د انجنیري مطالعاتو علمي څېړنیز ژورنال» د علم، څېړنې او تخنیکي پرمختګ په لاره کې دوامداره بریاوې خپلې کړي او د هېواد د علمي او تخنیکي ودې لپاره اغېزمن خدمت ترسره کړي والسلام...

پوهنیار ذبیح الله عابد

د غزني تخنیکي پوهنتون د علمي څېړنو او مجلې معاونیت مرستیال

د مطالبو لړلیک

ګڼه	د مقالې عنوان	لیکوال / لیکوالان	صفحې
١	په غزني ولایت کې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو تر منځ تخنیکي او اقتصادي ارزونه	پوهنمل دوست محمد سروری، پوهنیار محمد یاسین کمالی، پوهنیار محمد عادل عدیل، نوماندپوهنیار عتیق الله حمیم، نوماندپوهنیارمحمد صدیق نظری	٢-٢٨
٢	د لمریزو فوتوولتائیک حجرو د نسلونو مقایسوي څېړنه او د پرمختګ بهیر	فدامحمدمحمدي، رحمت الله لیوال او حمیدالله هوډیال	٣٠-٥٧
٣	حل معادلات دیفرانسیل کسری از نوع مشتق کاجوګامپولا، با استفاده از روش تکرار تغییرات بهبود یافته	عباس پویا، محمدعلی زیرک، سید عدنان موسوی	٥٩-٧٨
4	Economic and Environmental Optimization of Ghazni's Electricity Distribution Network Using Low-Loss Transformers	Massoud Danishmal, M. Yasin Kamaly, Dost Mohammad Sarwari, Atiqullah Hamim & Mohammad Adeel Adeel	80-92
5	Long-term forecasting of residential electric load for the Wazirabad area of Kabul city	Atiqullah Hamim, Amin Gul Hanif, Fazal Hamid Habibi &Massoud Danishmal	94-103
6	Energy Assessment and Economic Evaluation of Fixed-Tilt and Tracking Solar Photovoltaic Systems for Enhanced Energy Yield and Cost-Effectiveness	Wahidullah Zgham, Massoud Danishmal, Samiullah Popal, Dost Mohammad Sarwary,	105-123

	Khalilullah Haqfal, Zarbat Shah Ulfat		
125-134	*Samiullah Popal, Asadullah Shakir, Wahidullah Zgham, Haji Mohammad Hemat. Nik Mohammad Rishten & Shear Ahmed Atif*	Optimizing Energy Efficiency in Residential Buildings: A Comprehensive Analysis of Heating and Cooling Loads Using HAP Software in Ghazni, Afghanistan	7

په غزني ولایت کې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو تر منځ تخنیکي او اقتصادي ارزونه

پوهنمل دوست محمد سروری [1*]، پوهنیار محمد یاسین کمالی [1]، پوهنیار محمد عادل عدیل [1]، نوماندپوهنیار عتیق الله حمیم [1]، نوماند پوهنیار محمد صدیق نظری [2]

۱. برېښنا انجنیري څانګه، الکترومیخانیک پوهنځی، غزني تخنیکي پوهنتون

۲ . برېښنا انجنیري څانګه، انجنیري پوهنځی، دعوت پوهنتون

د مسئول ایمیل آدرس: dostmsarwari@gmail.com

لنډیز

دا څېړنه د غزني ولایت په مرکزي سیمې (قلعه جوز) کې ترسره شوې، څو د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو تخنیکي او اقتصادي پرتلنه وکړي. غزني ولایت د برېښنا له کمښت او ټیټ کیفیت رسوني سره مخ دی، نو د پاکو او نوې کیدونکو سرچینو کارول د انرژۍ خپلواکۍ، چاپېریال ساتنې او اقتصادي ودې لپاره مهم دي. په دې څېړنه کې دواړه سیستمونه د ۵۰۰ کیلوواټه ظرفیت سره ډیزاین شوي دي. د دغه سیستمونو تحلیل د HOMER Pro او PV syst سافټویرونو په وسیله ترسره شوې، چې پکې اقلیمي معلومات، تولید، لګښتونه، عواید او د پانګې بېرته ترلاسه کولو موده ارزول شوې ده. پایلې ښیي چې سولر فوتوولتائیک سیستم په کال کې ۲۲۱۶ ساعته کار کوي، ۴۵۷ کیلوواټه تولیدي طاقت لري او ۱۰۵۲۸۰۰ کیلوواټ-ساعت برېښنا تولیدوي. لومړنی لګښت یې ۹.٦۷۸ میلیونه افغانۍ، کلنی لګښت ۰.۸ میلیونه افغانۍ او عواید ۴.۴٦۴ میلیونه افغانۍ دي. بادي سیستم په کال کې ٦٦۸۷ ساعته کار کوي، ۱۷۳ کیلوواټه طاقت تولیدوي او ۱۵۱۹۵۰۴ کیلوواټ-ساعت برېښنا تولیدوي، لومړنی لګښت ۴۹.۷۵ میلیونه افغانۍ، کلنی لګښت ۲ میلیونه افغانۍ او عواید ۵.۵۹۷۵ میلیونه افغانۍ دی. سره له دې چې بادي سیستم زیات تولید لري، د هر کیلوواټ-ساعت لګښت یې لوړ ،چې د سولر فوتوولتائیک سیستم ۱.۱۳ افغانۍ او د بادي ۳.۲۹ افغانۍ دی. د سرمایې بېرته ترلاسه کولو موده د سولر فوتوولتائیک سیستم لپاره ۲.۲ کاله او د بادي لپاره ۸.۹ کاله ده. په همدې اساس، سولر فوتوولتائیک سیستم د دوامدارې انرژۍ د تأمین لپاره یو مناسب او اغېزمن انتخاب ګڼل کېږي.

کلیدي کلمې: *اقتصادي ارزونه، بادي انرژي، تخنیکي ارزونه، غزني ولایت، لمریزه انرژي*

۱. سریزه

الحمدلله رب العالمین والصلاة والسلام علی اشرف الانبیا والمرسلین سیدنا محمد و علی اله و اصحابه اجمعین.

د نوي کیدونکې انرژي اصطلاح د انرژي هغه سرچینو ته کارول کیږي چې په طبیعت کې په دوامدار ډول شتون لري او د وخت په تېرېدو سره نه ختمېږي، یا هغه انرژي ته وایي چې د فعالیت له کبله یې ګلخانه‌یي ګازونه نه خپرېږي. په تېرو څو لسیزو کې، د انرژۍ اړتیاوې په نړۍ کې په پراخه کچه زیاتې شوې ده او د دغو اړتیاوو د پوره کولو لپاره نوې او پایدارې سرچینې اړینې ګڼل کیږي. د نوي کېدونکې انرژي کارونه په نړیواله کچه د چاپېریال ساتنې او اقتصادي ثبات لپاره یوه مهمه وسیله ګڼل کیږي. د ډېرو هېوادونو په څېر، په افغانستان کې هم د نوي کېدونکې انرژي سرچینو لکه لمریزه انرژي، بادي انرژي او هایډروپاور ته زیاته پاملرنه نه ده شوې. له اقتصادي پلوه، د نوي کېدونکې انرژي پروژې د کار فرصتونه رامنځ ته کوي او د انرژي لګښتونه کموي. د ځینو څېړنو له مخې، د نوي کېدونکې انرژي کارونه د سوداګریزو او صنعتي فعالیتونو لپاره د انرژي د لګښتونو د کمېدو او د تولید د ودې سبب ګرځي. همداراز، ډېرې مطالعې ښیي چې د نوي کېدونکې انرژي کارونه د فوسیلي سونګ توکو د کارونې په پرتله د چاپېریال د ککړتیا د کمېدو لامل کېږي. د بېلګې په توګه، د سولر فوتوولتائیک انرژي کارول د کاربن ډای‌اکساید د تولید مخنیوی کوي او د هوا د ککړتیا کمښت رامنځته کوي. په اوسني وخت کې، په نړیواله کچه د انرژي تقاضا په بې ساري کچه زیاته شوې، خو له دې سره سره، د فوسیلي سونګ توکو سرچینې د کمېدو په حال کې دي. له همدې امله، د نوي کېدونکو انرژیو لکه بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو اهمیت ډېر شوی دی (ثقفی، ۱۴۰۱).

افغانستان، چې پراخې طبیعي سرچینې لري، د انرژي د بدیل سرچینو لکه بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو د تولید ښه ظرفیت لري، نو اړتیا ده چې پر دغو سرچینو تمرکز وشي. غزني ولایت د افغانستان په جنوب کې، د ۳۳ درجې، ۳۳ دقیقې او ۱۰.۴ ثانیې شمالي عرض البلد او ۶۸ درجې، ۲۷ دقیقې او ۳۳ ثانیې ختیځ طول البلد کې موقعیت لري. د دې ولایت مساحت شاوخوا ۲۲۹۱۵ کیلومتره مربع ددی. د ۲۰۲۰ میلادي کال د اټکل له مخې، د غزني ولایت نفوس شاوخوا ۱۳۶۲۵۶۴ تنه دی، چې د نفوس په لحاظ د افغانستان پنځم پرنفوسه ولایت دی(Zgham et al., 2024). غزني ولایت د انرژی له ځانګړې وضعیت څخه برخمن مګر د برېښنا د کمښت له جدي ننګونو سره مخ دی. د دې ولایت په استوګنیزو او سوداګریزو برخو کې د شبکې برېښنا ډېره محدوده ده. له همدې امله، غزني چې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو لپاره مناسب جغرافیایې او اقلیمي شرایط لري، د انرژي د نوې پراختیا لپاره یو مهم ولایت ګڼل کېږي (Zgham et al., 2024).

د غزني ولایت لپاره دا څېړنه د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو تخنیکي او اقتصادي تحلیل کوي، تر څو د دغو انرژیو ظرفیت وارزوي او د پایدارې انرژۍ مناسب انتخاب وړاندې کړي. دا تحلیل نه یوازې د انرژۍ د تولید د پراختیا لپاره مهم دی، بلکې د اقتصادي ودې، د کارموندنې او د چاپېریال ساتنې لپاره هم ارزښت لري. په پایله کې، په دې څېړنه کې هڅه کیږي چې د انرژۍ د اړتیاوو پوره کولو لپاره عملي او علمي وړاندیزونه وړاندې شي.

۲. د څېړنې مخینه

د غزني ولایت په ګډون، افغانستان د برېښنا له کمښت او د انرژۍ د ټیټ کیفیت له ستونزو سره مخ دی، چې دغه موضوع د بدیلو او دوامدارو انرژیو اړتیا لا زیاته کړې ده. په تېرو کلونو کې، په نړیواله کچه ګڼو څېړنو ښودلې چې لمریزه او بادي انرژۍ د فوسیلي سونګ توکو پر ځای اغېزمن، اقتصادي او چاپېریال ته دوستانه بدیلونه دي. د بېلابېلو هېوادونو تجربې څرګندوي چې که څه هم د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو تخنیکي او اقتصادي پایلې د اقلیمي شرایطو له مخې توپیر لري، خو ډېری وخت لمریزه انرژۍ د لګښت، ساتنې او دوام له پلوه غوره تمامېږي.

په افغانستان او په ځانګړې ډول په غزني ولایت کې، د لمر لوړې وړانګې او مناسب اقلیم د سولر فوتوولتائیک انرژۍ لپاره ښه فرصت برابروي، په داسې حال کې چې بادي انرژۍ هم په ځینو سیمو کې د پام وړ د تولید ظرفیت لري. له همدې امله، د دغو دواړو انرژیو تخنیکي او اقتصادي ارزونه اړینه ده، تر څو د سیمې لپاره تر ټولو مناسب، اقتصادي او پایداره سیستم وټاکل شي.

۳. مخکنیو څېړنو کتنه

د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو په برخه کې د تیرو اثارو تفصیلي کتنه د دې لپاره اړینه ده چې د دې انرژیو تخنیکي ځانګړتیاوې، اقتصادي ګټې او د هغوی د کارونې ستونزې په مختلفو جغرافیایي، اقلیمي او ټولنیزو شرایطو کې په بشپړ ډول وڅېړل شي. په دې برخه کې باید هغو مهمو څېړنو، علمي مقالو، تخنیکي راپورونو، او د انرژۍ د نړیوالو سازمانونو د اسنادو کتنه شوې چې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو د تولید ظرفیت، د پانګونې لګښتونه، د انرژۍ د ترلاسه کولو مؤثریت او د چاپیریال پر اغیزو تمرکز کوي .

په یوه څېړنه کې، چې تمرکز یې د عراق د تکریت ښار د یوې کوچنۍ کورنۍ د اړتیا وړ برېښنا د برابرولو لپاره د ۳ کیلوواټ ساعت سولر فوتوولتائیک انرژۍ او ۳ کیلوواټ ساعت بادي انرژۍ له لارې د برېښنا تولید سیستمونو د اټکلي خالص لګښت او موثریت پر محاسبه او تحلیل شوی وو او د دواړو پایلو پرتله د

HOMER سافټویر په مرسته تر سره شوې ده. پایلو وښودله چې د ۳ کیلوواټه سولر فوتوولتائیک سیستم د نصب خالص لګښت شاوخوا ۱۴۷۹۲ امریکایي ډالره دی، په داسې حال کې چې د بادي سیستم خالص لګښت شاوخوا ۷۳۴۰ امریکایي ډالره دی. پرتله شوې پایلې ښیي چې لمریزه انرژي د بادي انرژي په پرتله د عملي کارونې لپاره اغېزمنه او باوري سرچینه ده اما د سولر فوتوولتائیک سیستم د نصب لګښت د بادي سیستم په پرتله لوړ دی(Mohammed et al., 2019).

په یوه بله څېړنه کې چې د DOE (ډیزاین د تجربو) تحلیل ته ځانګړې شوې وه، څرګنده شوې چې د بادي انرژي د تولید ظرفیت او مؤثر تطبیق په یوه ښه بادي منبع پورې تړلی ده. همدا راز، د سولر فوتوولتائیک سیستم لپاره هم دا موضوع صادقه ده، خو پکې د پیل پانګونه هم اغېزناک فکتور بلل شوې. خو په پای کې تحلیل ښیي چې سولر فوتوولتائیک سیستمونه له مالي پلوه د بادي سیستمونو په پرتله ډېر مناسب دي، حتی په هغو کلیوالو سیمو کې هم چې د باد منبع نسبتاً ښه وي(Sunderland et al., 2018) .

په یوه څېړنه کې چې په نیپال کې تر سره شوې، د سولر فوتوولتائیک او بادي انرژیو د ظرفیت، جغرافیایي او اقتصادي په اساس تحلیل شوی دی، پایلې ښیي چې د لګښت له پلوه د سولر فوتوولتائیک سیستم د بادي سیستم په پرتله قیمت(ګران) دي، خو د بادي انرژي لپاره مناسب ځایونه محدود دي او زیاتره یې په لوړو غرنیو سیمو کې موجود دي(Neupane et al., 2022).

په یوه څېړنه کې د اقتصادي فعالیت د تحلیل پر بنسټ تر سره شوې، له څېړنې څخه دا ثابته شوې چې د چین د هوونان ولایت لپاره د سولر فوتوولتائیک او بادي انرژیو د برېښنا د تولید لګښتونه په ترتیب سره ۰.۵ او ۰.۳۵ چینایي یوانه/ فی کیلوواټ ساعت دي (Liu et al., 2018).

۴. د څېړنې کړنلاره او مواد

۴-۱- د څېړنې کړنلاره

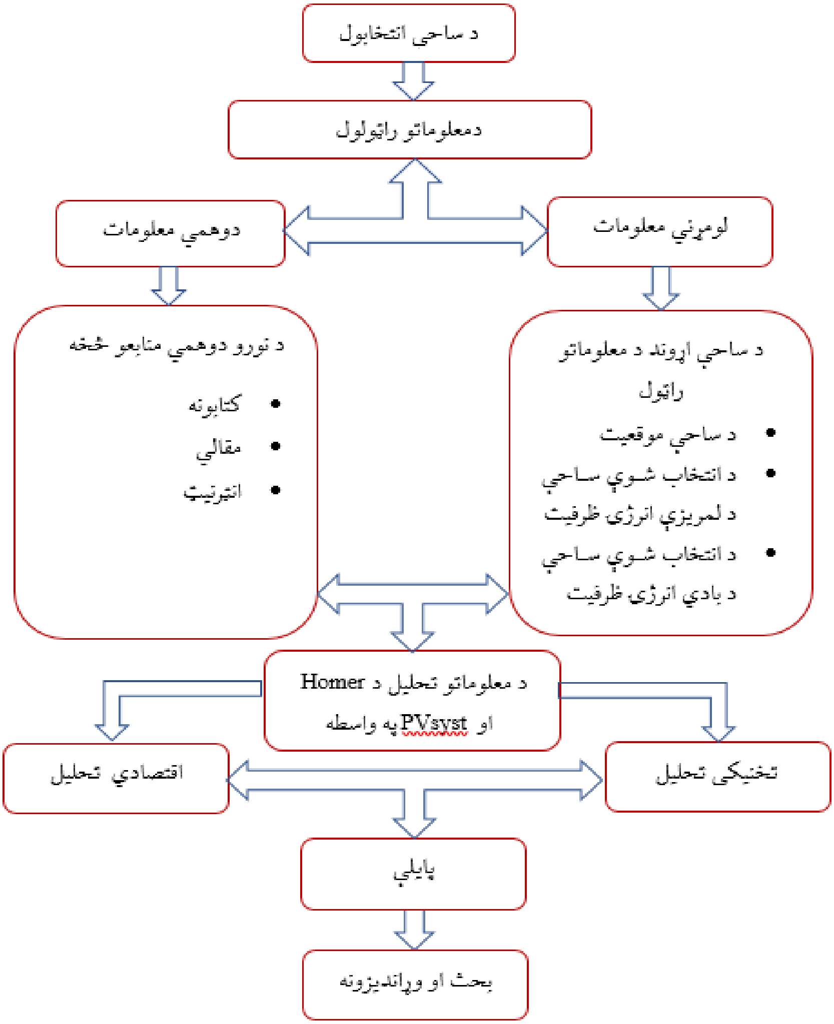
د دې څېړنې موخه دا ده چې په غزني ولایت کې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو ترمنځ تخنیکي او اقتصادي ارزونه ترسره شي. د څېړنې د لاسته راوړنو لپاره اړینه ده چې یوه منظمه او علمي تګلاره تعقیب شي. د څېړنې تګلاره له بېلابېلو پړاوونو څخه جوړه شوېده چې په لاندې ډول یې وضاحت شوی دی:

د څېړنې لومړی مرحله د ساحې ټاکل دي، د ساحې ټاکنه د څېړنې د اړتیاوو او شرایطو پر بنسټ ترسره شوې، چې پکې د غزني ولایت هغه ساحه په پام کې نیول شوې ده چې د سولر فوتوولتائیک او بادي انرژیو د تولید لپاره مناسب د تولید ظرفیت لري.

وروسته له دې، د معلوماتو راټولولو مرحله ده، معلومات دوه ډولونه لري: لومړني او ثانوي معلومات. لومړني معلومات د ساحې د موقعیت، د انرژي سرچینو د انتخاب، د سولر فوتوولټائیک او بادي انرژیو د تولید ظرفیت او د چاپېریال شرایطو په اړه دي، چې دا معلومات له ځايي ادارو، فزیکي سروې، او معتبرو سرچینو څخه ترلاسه شوي دي. ثانوي معلومات بیا له کتابونو، علمي مقالو او انټرنیټي سرچینو څخه اخیستل شوي دي، څو د څېړنې د اعتبار کچه لوړه شي.

د راټول شوو معلوماتو د تحلیل لپاره د PVsyst او HOMER سافټویرونه کارول شوي دي، چې د دغو سافټویرونو په وسیله تخنیکي او اقتصادي تحلیل ترسره شوی، چې پکې د سیستمونو د تولید ظرفیت، لګښت، ساتنې اړتیا، او د پانګونې راګرځېدو موده شاملې دي.

په پای کې، د ټولو تحلیلونو پایلې ارزول شوې او د بادي او سولر فوتوولټائیک انرژیو ترمنځ د مقایسې نتیجه ترلاسه شوې. دغه پایلې د څېړنې په پایله کې بیان شوي او پر بنسټ یې وړاندیزونه وړاندې شوي دي. نو، دا څېړنه یوه منظمه تګلاره تعقیبوي چې د ساحې له ټاکلو نیولې تر تحلیل، پایلو او وړاندیزونو پورې، ټول پړاوونه پکې په علمي ډول واضح شوي دي، لکه څرنګه چې په(۱) شکل کې ښودل شوي دي.



شکل(۱): د څېړنې کړنلاره

۴-۲- د څیړنې مواد

۴-۲-۱- د ساحې انتخاب

په (۲) شکل کې د دغې څیړنې لپاره د غزني ولایت په مرکز کې د قلعه جوز سیمه انتخاب شوې، یاده ساحه د غزني ولایت په مرکز کې په ۳۳.۵۵ درجې شمالي عرض البلد او ۶۸.۴۶ درجې ختیځ طول البلد کې موقعیت لري.

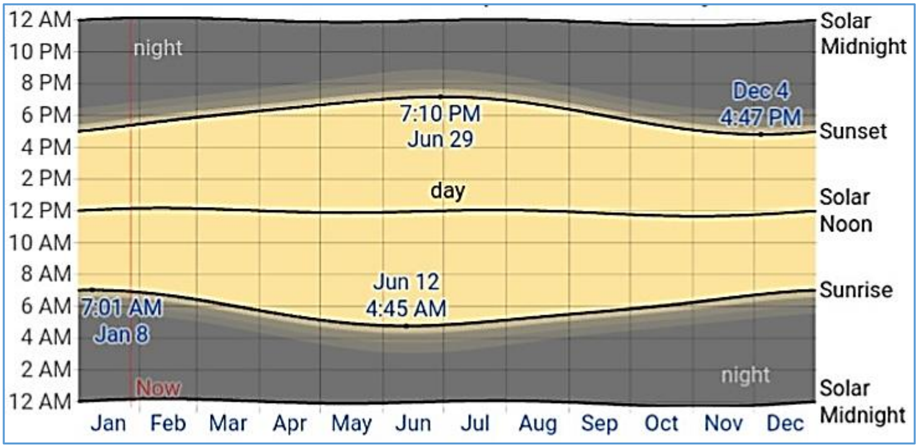
شکل(۲): د غزني ولایت د قلعه جوز ساحې موقعیت (Pvsyst)

۴-۲-۲- د غزني ولایت موسمي شرایط

په غزني ولایت کې اوړی ګرم، وچ او روښانه وي، پداسې حال کې چې ژمی سوړ او د واورې اورښت متوسط وي. د کال په اوږدو کې د تودوخې درجه معمولا د ‎-5°C‎ څخه تر ‎33 ° C‎ پورې بدلون کوي او ډېر کم وختونه له ‎-11°C‎ څخه ټیټه یا له ‎36 °C‎ څخه لوړه وي (Weather Spark).

۴-۲-۳- په غزني ولایت کې د ورځو اوږدوالی او د لمر شتون

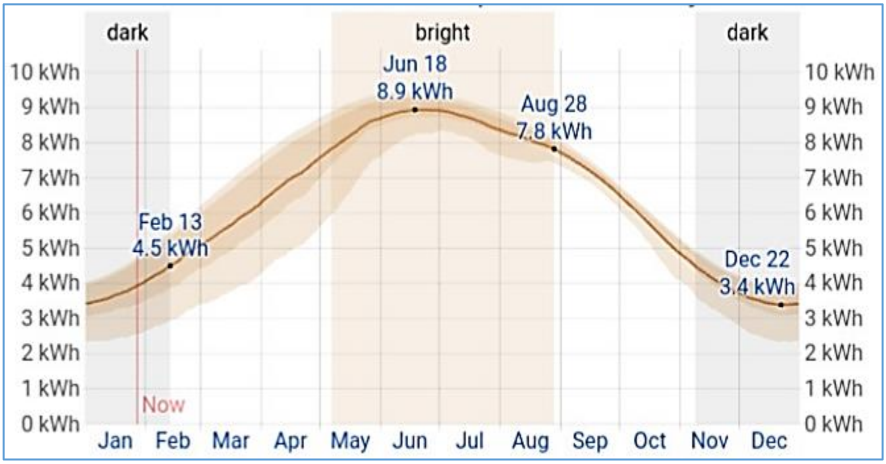
په (۳) شکل کې لیدل کیږي د ورځې اوږدوالی هم د کال په اوږدو کې تغیر کوي تر ټولو لنډه ورځ د دسمبرمیاشتې ۴ ده، چې ۹ ساعته او ۵۶ دقیقې روښنایي لري. تر ټولو اوږده ورځ د جون میاشتې ۲۹ ده، چې ۱۴ ساعته او ۲۳ دقیقې روښنایي لري (Weather Spark).



شکل(۳): په غزني ولایت کې د ورځو اوږدوالی او د لمر شتون (Weather Spark)

۴-۲-۴- په غزني ولایت کې د لمر وړانګې او د سولر فوتوولتائيک انرژي د تولید ظرفیت

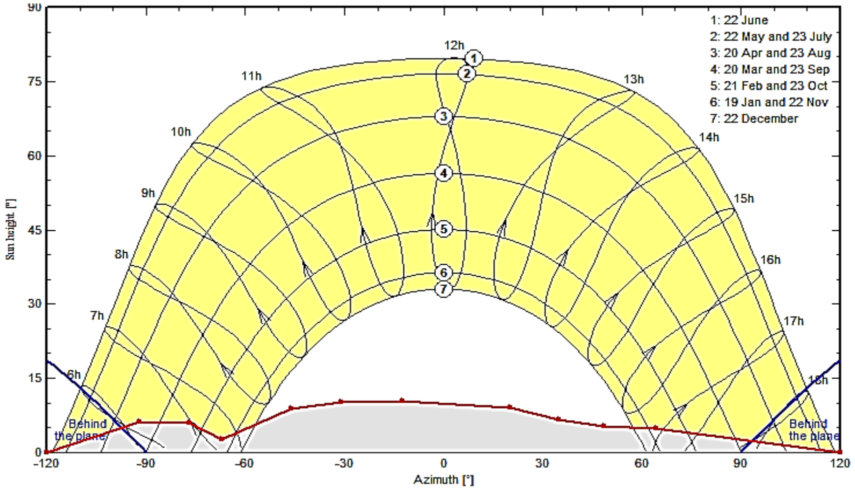
غزني د خپل موقعیت له امله یو نیمه بیاباني اقلیم لري چې په دې اقلیم کې لمر په مختلفو فصلونو کې په مختلفو ډولونو کې څرګندیږي. څرنګه په (۴) شکل کې لیدل کیږي د لمر شدت د کال په مختلفو میاشتو کې تغییر کوي (Weather Spark).



شکل(۴): په غزني ولایت کې د هر متر مربع لپاره د ورځې منځنی لنډې وړانګې انرژي اندازه (Weather Spark)

۴-۲-۵- په غزني ولايت کې د لمر د تګلارې يا حرکت دياګرام

په (۵) شکل کې د لمر د تګلارې يا حرکت دياګرام ښودل شوي، دغه دياګرام د لمر موقعيت د کال په هره مياشت کې راښيي. د دې دياګرام په واسطه د لمر ختلو او لمر لوېدلو وخت د کال په مختلفو وختونو کې معلومولای شو او د ورځې په جريان کې کولای شو د سولر فوتوولتائيک د قطارونو ترمنځ فاصله پيداکړو تر څو يو قطار پر بل باندې سيوری ونه کړي، د لمر د دياګرام څخه د لمر د ارتفاع زاويه (Altitude Angle)او (Azimuth Angle) زاويه مستقيماً په مشخص وخت او ورځ کې پيدا کولای شو (Rahime et al., 2024).



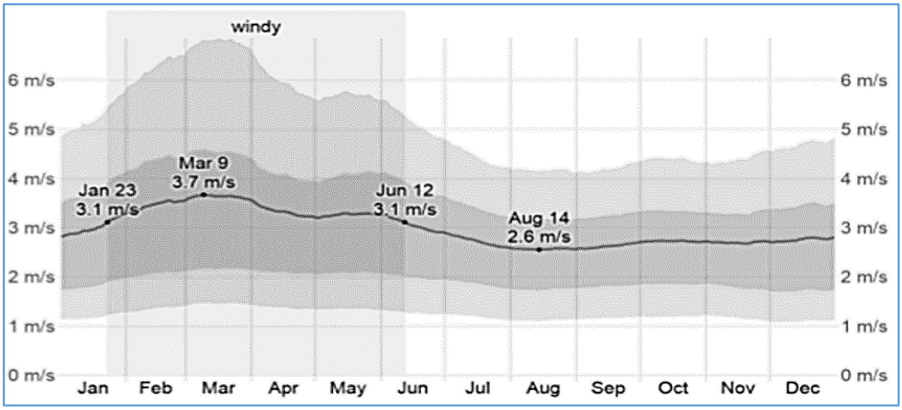
شکل(۵): په غزني ولايت کې د لمر حرکت (Rahime et al., 2024.)

۴-۲-۶- په غزني ولايت کې د باد شدت او دبادي انرژي د توليد ظرفيت

غزني km^2 ۹۳ د باد انرژي سيمه لري، چې MW ۱۹۱ د بادي برېښنا توليد وړتيا لري، او د MW ۴۸ عملي باد انرژي توليد ظرفيت لري (Rahime et al., 2024).

څرنګه چې په (۶) شکل کې ليدل کيږي د غزني ولايت کې د باد سرعتونه د کال له موسمونو سره بدلون کوي. د ژمي او پسرلي په مياشتو کې (په ځانګړي ډول له جنوري تر جون پورې) بادونه زيات شدت لري، او تر ټولو بادلرونکې مياشت مارچ ده چې منځنی سرعت يې m/s ۳.۶ ته رسيږي. برعکس، د اوړي په مياشتو کې بادونه کمزوري وي او باد سرعت له پلوه تر ټولو آرامه مياشت د اګست ده چې باد منځنی سرعت يې

۲.٦ m/s دی. په عمومي ډول، باد لرونکې دوره شاوخوا ۴.۷ مياشتې او آرامه دوره ۷.۳ مياشتې دوام لري. (Weather Spark).



شکل(٦): په غزني ولايت کې د باد سرعت په مختلفو وختونو کې

۴-۳- د معلوماتو تحليل او د سيستمونو ډيزاين

د نوې کېدونکو انرژيو د پروژو په تحليل، طرحه او ارزونه کې سافټويرونه مهم رول لري. په ځانګړي ډول PVsyst او HOMER Pro هغه مشهور تخنيکي سافټويرونه دي، چې د سولر او بادي سيستمونو د ډيزاين، فعاليت تحليل او اقتصادي ارزونې لپاره کارول کېږي. PVsyst زياتره د مختلفو سولر فوتوولټائيک سيستمونو (On-grid، Off-grid او د اوبو را ايستلو) د ډيزاين لپاره کاريږي، په داسې حال کې چې HOMER Pro د هايبرډ انرژي سيستمونو (لمريز، بادي، ډيزلي او بيټرۍ) د تحليل او مقايسې ورتيا لري. دا دواړه سافټويرونه په نړيواله کچه د څېړنو او عملي پروژو لپاره ډېر مهم بلل کېږي.

۴-۳-۱- د سولر فوتوولټائيک سيستم د ډيزاين تخنيکي تحليل

۴-۳-۱-۱ سولر فوتوولټائيک پنلونو انتخاب

د دې لپاره چې د سولر فوتوولټائيک سيستم ثابت ناصبه طاقت ۵۰۰ کيلوواټ دی او د سيستم لپاره مو ۵۸۰ واټ مونو-کريسټالين سولر فوتوولټائيک پنل انتخاب کړی، ځکه چې د غزني لپاره مونو-کريسټالين سولر فوتوولټائيک پنلونه د پولی-کريسټالين سولر فوتوولټائيک پنلونه په پرتله زياته انرژي توليدوي او لوړ د فعاليت نسبت (PR) لري نو د غزني اقليمي شرايطو ته په کتو، د اقتصادي، لوړ د انرژي توليد او ښه فعاليت لرونکي سولر فوتوولټائيک سولر فوتوولټائيک پنلونه د نصب او ډيزاين لپاره بايد د مونو-کريسټالين سولر فوتوولټائيک پنلونه غوره شي (Zgham et al., 2024).

نو د سولر فوتوولتائيک پنلونو شمير د (۱) فورمول په مرسته محاسبه کيږي:

$$\text{Number of solar panels} = \frac{system\ power}{per\ solar\ panel\ power} \quad (۱)$$

$$system\ power = 500kw = 500000w$$

$$\text{Number of solar panels} = \frac{500000}{580} = 662$$

د دغه سیستم لپاره ۸٦۲ سولر فوتوولتائیک پنلونه چې د مونو-کریستالین له نوعو څخه دي انتخابوو او ځانګړتیاوې یې په (۱) جدول کې ښودل شوي دي.

جدول(۱). د سولر فوتوولتائيک پنل ځانګړتیاوې

ځانګړتیاوې	څرګندونې
کمپنی	Jinko solar
موډل	JKM۵۸۰M-۷RL۴-V
طاقت	۵۸۰W
خلاص سرکېټ ولتېج	۵۳.۳۱V
اعظمي ولتېج	۴۴.۱۱V
شارټ سرکېټ جریان	۱۳.۸۳ A
اعظمي جریان	۱۳.۱۵ A
مؤثریت	۲۱.۲۲٪
د موډل مساحت	۲.۷۳۴m2

۴-۳-۱-۲ د اینورټر انتخاب:

د دې لپاره چې د سیستم تولیدي طاقت ۵۰۰ کیلوواټ دی، خو یوه اندازه طاقت د تودوخی او په سولر فوتوولتائیک و باندې د پرتو دوړو له امله ضایع کیږي چې له دې سره د سیستم تولیدي طاقت شاوخوا ۴۵۷ کیلو واټ ته راکمیږي. اینورټر باید د سیستم د تولیدي طاقت څخه د (۱۰- ۱۵) سلنه زیات طاقت لپاره انتخاب شي چې دې ته حفاظتي فکتور (Safety Factor) ویل کیږي. د دغه فکتور ۱۰٪ په نظر کې نیولو سره طاقت ۵۰۲ کیلوواټ کیږي، چې نوموړي طاقت ته اینورټر انتخابیږي. د دغه سیستم لپاره د Growatt (New Energy) کمپنی پنځه داني ۱۰۰ کیلوواټ طاقت لرونکي اینورټرونه انتخاب شوي دي، چې ځانګړتیاوې یې په لاندې جدول کې ښودل شوي دي.

جدول(۲). د انتخاب شوي انورټر ځانګړتياوې

ځانګړتياوې	ځرګندونې
کمپنی	Growatt New Energy
مودل	MAX ۱۰۰KTL۳-X LV
طاقت	۱۰۰ KW (Ac)
ورودي MPPT	۱۰
ولتاژ رينج DC	۱۸۰-۱۰۰۰ ولت
اعظمی DC انپټ ولتا ژ	۱۱۰۰ V
خروجی AC ولتاژ	۳ فاز ۴۰۰ ولټ
مؤثريت	۹۸.۸٪

۴-۳-۱-۳ د ډيزاين شوي سولر فوتوولتائيک سيستم ځانګړتياوې

په لاندې جدول کې د سيستم، د سولر فوتوولتائيک پنلونو او د اينورټر ځانګرتياوې ذکر شوي دي.

جدول(۳). د سولر فوتوولتائيک سيستم ځانګرتياوې

د سيستم ځانګرتياوې	د سيستم ځرګندونې
د سيستم طاقت	۵۰۰KW
د سيستم ولتيج (DC)	۷۹۴ V
د سيستم ولتيج (AC)	۴۰۰ V
د سيستم جريان (DC)	٦٦۴ A
د سيستم جريان (AC)	۲۷۵ A
په هر kWp طاقت باندې توليد شوي انرژي	۵.۷٦ KWh
د سولر فوتوولتائيک و د نصب زاويه	۳۴° / ۱۸۰°
د سولر فوتوولتائيک هندارو شمېر	۸٦۲
د سولر فوتوولتائيک هندارې طاقت	۵۸۰
د سيستم د نصب ساحه	۲۲۳۳ m2
د سولر فوتوولتائيک هندارې اعظمي ولتېج	۴۲.۴۱ V
د سولر فوتوولتائيک هندارې مؤثريت	۲۱.۲۲ ٪
د اينوټر طاقت	۱۰۰ KW (ac)
د اينورټرونو تعداد	۵
د اينورټر ورودي ولتېج	۱۸۰ -۱۰۰۰ V
د اينورټر مؤثريت	۹۸.۸ ٪
کلنی توليد شوي انرژي	۱۰۵۳۰۰۰ kWh
د سيستم عمر	۲۵ کاله

۴-۳-۲- د سولر فوتوولتائیک سیستم د ډیزاین اقتصادي تحلیل

۴-۳-۲-۱ د سیستم مجموعي لګښتونه

د سیستم مجموعي لګښتونه په (۴) جدول کې ښودل شوي دي او په سیستم کې د ټولو موجوده وسایلو د في واحد قیمت او مجموعي قیمتونه تشریح شوي دي. له دې ډلې څخه، سولر فوتوولتائیک پنلونه چې ټول شمېر یې ۸٦۴ دانې دي، د هر یوه قیمت ۴۵۰۰ افغانۍ دی، نو مجموعي قیمت یې ۳.۸۸۸ میلیونه افغانۍ کېږي. د سولر فوتوولتائیک پنلونو لپاره د چوکاټونو مجموعي قیمت ۱.۰۳٦۸ میلیونه افغانۍ دی. انورټرونه پنځه دانې دي، چې د هر یوه قیمت ۰.۵ میلیونه افغانۍ دی، نو مجموعي قیمت یې ۲.۵ میلیونه افغانۍ کېږي. همدارنګه، د نورو اړوندو وسایلو لکه کیبلونو، کمباینر بکسونو، قطع کوونکو او د سیستم نورو مهمو وسایلو شمېر او قیمتونه هم ښودل شوي دي. دغه راز، د وسایلو د انتقال، نصب او ځای پر ځای کولو مصارف هم واضح شوي دي. د پروژې مجموعي ابتدایي لګښت ۹.٦۱۷۸۰۰ میلیونه افغانۍ دی، چې د سیستم د ټولو وسایلو اخیستل، ترانسپورت او نصب پکې شامل دي. د یاد سیستم ارزښت به د ۲۵ کلونو په موده کې ۷.۴۲۴۸ میلیونه افغانۍ ته راکم شي.

په سولر فوتوولتائیک سیستمونو کې د نصب لګښتونه د ټول لګښت (۱۲-۱۴)٪ په نظر کې نیول کیږي (Renewable & Agency, 2019).

جدول(۴). د سولر فوتوولتائیک سیستم مجموعي لومړني لګښتونه

ګڼه	تجهیزات	تعداد	فی واحد قیمت (افغانی)	کُلی قیمت (افغانی)
۱	سولر فوتوولتائیک پنل	۸٦۴	۴۵۰۰	۳۸۸۸۰۰۰
۲	د پنلونو چوکاټ	۸٦۴	۱۲۰۰	۱۰۳٦۰۰۰
۳	اینورټر	۵	۵۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰
۴	کیبل	۴۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰۰۰
۵	کمباینر بکس	۸	۱۰۰۰۰	۸۰۰۰۰
٦	مونیټرنګ سیستم	۱	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
۷	AC قطع کوونکي	۵	۷۰۰۰	۳۵۰۰۰
۸	DC قطع کوونکي	۸	۳۵۰۰	۲۸۰۰۰
۹	نور وسایل	۱	۲۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
۱۰	ترانسپورت	۱	۴۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰
۱۱	د سیستم د نصب مصارف	۱	۱۰۰۰۰۰۰	۱۱۵۵۰۰۰
	جمله			۹٦۱۷۸۰۰

۴-۳-۳- د بادي سیستم د ډیزاین تخنیکي تحلیل

د نوموړي سیستم تخنیکي تحلیل په لاندې ډول ترسره شوی ده:

۴-۳-۳-۱ په انتخاب شوې ساحه کې د باد سرعت

په ټاکل شوې ساحه کې د باد منځنی سرعت د ۵۰ مترو لوړوالي لپاره د هومر سافټویر په مرسته او د ناسا سپوږمکۍ له معلوماتو څخه ترلاسه شوي دي.

۴-۳-۳-۲ بادي توربین انتخاب

د یو بادي برېښنا تولیدي فابریکې (Wind Power Plant) ډیزاین کې یوه مهمه مسئله دا ده چې د ټاکل شوې ساحې د شرایطو مطابق مؤثر بادي توربینونه وټاکل شي. د بادي توربینونو د تولید ظرفیت د باد د سرعت له مکعب سره تناسب لري، یعنې هر څومره چې د باد سرعت زیات شي، د توربین برېښنا تولید هم څو چنده زیاتیږي. همداراز، د باد سرعت معمولاً د لوړوالي په زیاتوالي سره لوړیږي، نو ځکه باید توربینونه د لوړوالي سره سم مناسب انتخاب شي. په غزني ولایت کې د باد منځنی سرعت نسبتاً کم دی، او د لوړ ظرفیت توربینونو انتقال او نصب ستونزمن دی. له همدې امله، په دې ساحه کې ټیټ ظرفیت توربینونه مؤثر ګڼل کیږي. له همدې امله، په دې سیستم کې د kW ۲۰ ظرفیت لرونکي بادي توربینونه کارول کیږي. د یادو توربینونو تخنیکي ځانګړتیاوې په لاندې (۵) جدول کې دې کې ذکر شوي دي.

جدول(۵). د انتخاب شوي بادي توربین ځانګړتیاوې

شماره	مشخصه	څرګندونې
۱	کمپنی	Eocycle
۲	ماډل	۲۰EO
۳	ډول	۳ blades, horizontal axis, downwind
۴	طاقت	۲۰ kW @ ۷.٦ m/s
۵	د طاقت کنترول	Stall control (Constant speed)
٦	د روتور قطر	۱۵.۸ m
۷	د باد سرعت Cut-in	۲.۷۵ m/s
۸	د باد سرعت Cut-out	۲۰ m/s
۹	Maximum ډیزاین	۵۲.۵ m/s
۱۰	د روتور سرعت	۵۳ rpm
۱۱	د توربین مجموعي وزن	۲۵۰۰ kg
۱۲	د جنراتور ډول	Synchronous Permanent Magnet
۱۳	د جنراتور تولیدي ولتاژ	۳φ, ۴۰۰ V ac @ ۵۰ Hz

۱۴	د پايي ارتفاع	۱۷/ ۲۴/ ۳۰/ ۳٦ m

۴-۳-۳-۳ بادي توربین د پايې انتخاب

دا څرګنده خبره ده چې د لوړوالي په زیاتوالي سره د باد سرعت هم زیاتېږي، خو موږ نشو کولای د پايې لوړوالی تر یوه حده زیات کړو، ځکه چې د پایې لوړوالي زیاتوالی د لګښت د زیاتوالي سبب ګرځي، چې دا یو غیر اقتصادي عمل دی. د پايي لوړوالی د انتخاب شوي توربین او د ساحې د شرایطو پر اساس ټاکل کېږي. د دې لپاره، چې د انتخاب شـویو توربینونو د نصـب لوړوالی له ۱۷ تر ۳٦ مترو پورې دی، نو په دې سیستم کې ۳۰ متره لوړوالی په پام کې نیول شوی، په دې لوړوالي کې، لکه څنګه چې پخوا یادونه وشوه، د باد سرعت ۳.۸۴ m/s دی.

۴-۳-۳-۴ بادي توربین د روتور ځانګړتیاوې

د بادي بریښنا تولیدي فابریکې (Wind Power Plant) د ډیزاین لپاره، یو له مهمو برخو څخه د روتور انتخاب دی، چې باید په مناسب ډول انتخاب ترسره شي. دلته هم د روتور د انتخاب لپاره د Siemens له نظریې څخه استفاده شوې ده او د درې پرو (blades) لرونکی روتور غوره شوی، چې ځانګړتیاوې یې په (۵) جدول کې ذکر شوې دی.

۴-۳-۳-۵ د توربینونو د تعداد انتخاب

د دې لپاره چې د سیسـتم طاقت ۵۰۰kW دی نو د توربینونو تعداد د لاسـته راوړلو لپاره د سیسـتم طاقت د یوه توربین په طاقت باندې تقسیم کېږي.

$$\text{Number of } wind \text{ turbines} = \frac{system\ power}{Rated\ Power\ of\ wind\ turbine} \qquad (۲)$$

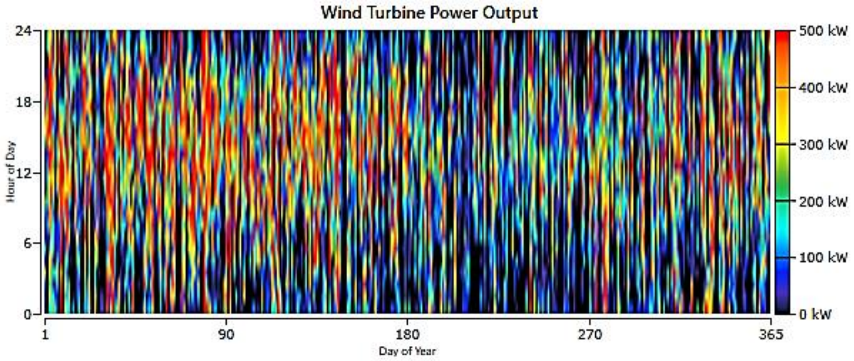
$$\text{Number of } wind \text{ turbines} = \frac{500Kw}{20Kw} = 25$$

په نتیجه کې د ۵۰۰ kW بادي سیستم لپاره ۲۵ عدده ۲۰ kW بادي توربینونه انتخابوو.

۴-۳-۳-٦ د توربینونو په واسطه تولید شوي طاقت او د سیستم ظرفیت فکتور

د HOMER سافټویر د تحلیل له مخې، د هر توربین تولید شوی منځنی طاقت ٦.۹۲ kW دی. په همدې اساس، د ټول سیستم مجموعي تولیدي طاقت ۱۷۳ kW ته رسېږي. څرنګه چې د سیستم تولیدي طاقت معلوم دی، نو د ظرفیت فکتور (Capacity Factor) هم محاسبه کېدای شي، چې د تحلیل له مخې ۳۴.۷٪ سره برابر دی.

په (۷) شکل کې د کال په ټولو ورځو کې، په هر ساعت کې د سیستم له خوا تولید شوی طاقت یا خروجي طاقت اندازه ښودل شوې ده.



شکل(۷): د بادي توربین خروجی طاقت

۴-۳-۳-۷ د سیستم مجموعي مصرف

د اقتصادي تحلیل لپاره مو له مختلفو انټرنټي سرچینو، علمي مقالو او د HOMER سافټویر څخه استفاده کړې ده. له انټرنټي سرچینو څخه د بېلګې په توګه Alibaba.com یادولای شو، له یادو سرچینو څخه د استفادې په نتیجه کې مو په HOMER سافټویر کې د هر توربین لپاره لومړنی لګښت، د عمر له پای ته رسېدو وروسته ترمیمي لګښت، او د عملیاتو پر مهال د کمې خرابۍ د ترمیم لګښتونه، د کال په اوږدو کې شامل کړي چې په پای کې، د دې بادي برېښنا تولیدي سیستم لپاره د یو ۲۰ kW توربین ټول لومړني لګښت چې محاسبه شوی ۱.۹۹ میلیونه افغانۍ دي، چې له جملې څخه ۱.۵ میلیون افغانۍ د یو ۲۰ kW بادي توربین او اړوندو تجهیزاتو بیه ده، ۰.۲۱ میلیونه افغانۍ د ترانسپورټ لګښت دی، ۰.۲۸ میلیونه افغانۍ د نصب لګښت دی. په (٦) جدول کې د توربینونو او اړوندو تجهیزاتو لکه کیبلونو او حفاظتي وسایلو لګښتونه، چې ټولیز لګښت یې ۳۷.۵ میلیونه افغانۍ دی، د ترانسپورټ مجموعي لګښت چې ۵.۲۵ میلیونه افغانۍ دی او د ټول سیستم د نصب مجموعي لګښت چې ۷ میلیونه افغانۍ دی، ښودل شوي دي. نو په نتیجه کې د ټول سیستم مجموعي لومړنی لګښت ۴۹.۷۵ میلیونه افغانۍ دی، چې پدې کې د تجهیزاتو بیه، د ترانسپورټ او نصب لګښتونه شامل دي. د سیستم د لومړنیو لګښتونو تر څنګ، ځینې نورو دوامداره لګښتونه لکه د ځمکې کرایه او د سیستم د حفظ او مراقبت مصارف هم شامل دي، چې د کلنې لګښت په توګه محاسبه کېږي. د ځمکې کرایې لپاره ۰.۳ میلیونه افغانۍ بیه په نظر کې نیول شوې ده، د بادي برېښنا سیستمونو لپاره د حفظ او مراقبت کلنې لګښت د هر کیلوواټ لپاره ۳۰ – ۵۰ امریکایي ډالره ګڼل کېږي چې د ټول سیستم لپاره ۱.۷ میلیونه افغانۍ کېږي(Renewable & Agency, 2019).

جدول(٦). د بادي سيستم مجموعي لومړني او دوامداره کلني لګښتونه

نوم	تعداد	في واحد قيمت په افغاني	مجموعي قيمت په افغاني
توربين او اړوند وسايل	۲۵	۱۵۰۰۰۰۰	۳۷۵۰۰۰۰۰
ترانسپورت	۲۵	۲۱۰۰۰۰	۵۲۵۰۰۰۰
نصب	۲۵	۲۸۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰۰
د سيستم لومړني مجموعي مصارف	-	-	۴۹۷۵۰۰۰۰
دوامداره کلني مصارف	-	-	۲۰۰۰۰۰۰

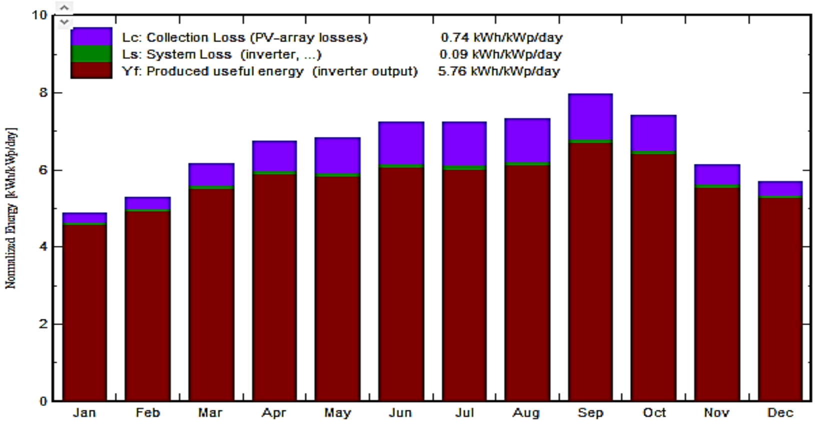
۵. ددې څېړنې موندنې

ددې څېړنې موندنې په لاندې مرحلو کې په لاس راغلې دي:

۵-۱- د ډيزاين شوي سولر فوتوولتائيک سيستم څخه توليد کېدونکې انرژي

څرنګه چې (۸) شکل راښيي چې په نوموړي سيستم کې په هر کيلو واټ طاقت باندې د توليد شوي انرژي څخه ($LC = 0.74$ KWh / KWp / Day) هغه انرژي چې د سولر فوتوولتائيکونو په ترنه کې ضايع ،او ($LS = 0.09$ KWh / KWp /day) هغه ضايعات دي چې په سيستم کې د دخيلو وسايلو په واسطه ضايع کېږي او (5.76 KWh /KWp /day) انرژي د ګټې اخستنې وړ ده چې تر مصرفونکو پورې رسيږي. د دغه سيستم څخه د جون، جولای، اګست، سپتمبر او اکتوبر په مياشتو کې په زياته اندازه، او په مارچ، اپريل، می او نومبر مياشتو کې په متوسط ډول، اوهمدارنګه په جنوری، فبروری او ډسمبر مياشتو کې په کمه اندازه طاقت په لاس راځي. دغه ډيزاين شوي سولر فوتوولتائيک سيستم څخه په کال کې ۱۰۵۳ MWh انرژي توليدوي.

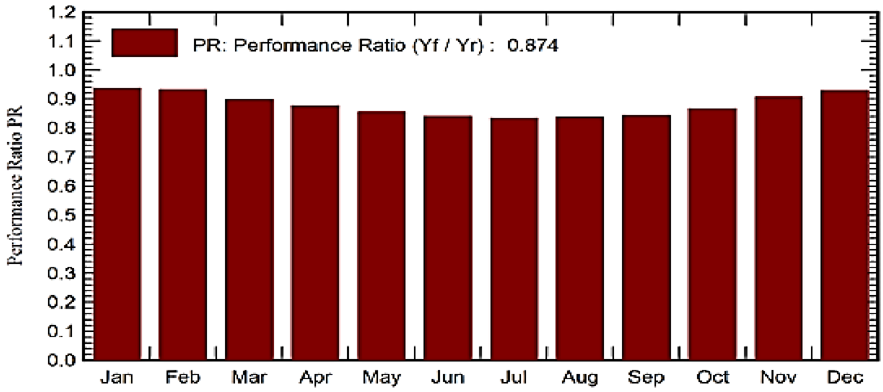
Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 501 kWp



شکل(۸): په يو کيلو واټ باندې په يوه ورځ کې د انرژي د توليد اندازه

۵-۲- د سیستم د فعالیت نسبت (PR)

په (۹) شکل کې د کال په هره میاشت کې د سولر فوتوولتائیک انرژي فعالیت نسبت راښیي چې په هره میاشت کې نظر د هوا حالاتو ته توپیر کوي. په جنوری، فبروری، مارچ، نومبر او ډسمبر میاشتو کې په زیاته اندازه، په اپریل، می او اکتوبر په میاشتو کې په منځنۍ ډول او د جولای میاشت کې په کمه اندازه دی، په کلني ډول د سیستم د فعالیت نسبت اوسط مقدار یې ۰.۸۷۴ دی.

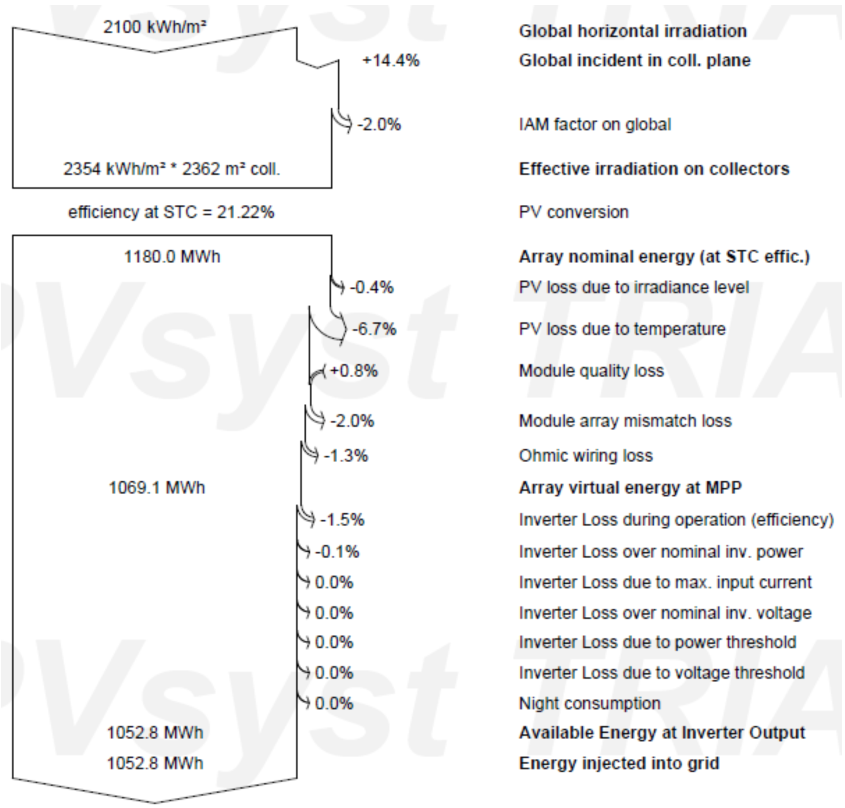


شکل(۹): د دیزاین شوي سولر فوتوولتائیک سیستم د فعالیت نسبت

۵-۳- د دیزاین شوي سولر فوتوولتائیک سیستم د ضایعاتو محاسبه

په سولر فوتوولتائیک سیستمونو کې د طاقت او انرژي ډول ډول ضایعات شتون لري، څرنګه چې (۱۰) شکل کې راښيي چې په سیستم کې مجموعي تولید شوي انرژي په پوره ډول تر مصرف کوونکو پورې نه رسیږي یوه اندازه یې د لرې فاصلې جسمونو (Far shading)، د نیږدې فاصلې جسم (Near shading) ، د ګرد او خاورو (Soiling Losses) د ضـــایعاتو د رامنځته کیدو له امله کمیږي چې د انرژي اندازه MWh ۱۱۸۰ ته راټیټه شوي.

همدارنګه د دغې انرژي یوه برخه په اینورټر کې د عملیاتو په جریان کې ضـایع کیږي چې له امله یې اندازه ۱۰۵۲.۸ MWh ته ټیټه شوي، نو په پایله کې داسي ویلاي شو چې په کلني ډول له سیستم څخه د ترلاسه کیدونکي انرژي اندازه ۱۰۵۲.۸ MWh ده.



شکل(۱۰): د ډیزاین شوي سولر فوتوولتائیک سیستم ضایعات

۴-۵ د ډیزاین شوي سولر فوتوولتائیک سیستم اقتصادي پایلې

د لومړني لګښت تیټوالي له امله، د پانګې بېرته ترلاسه کولو موده هم کمه ده. په(۷) جدول کې د سولر فوتوولتائیک سیستم د ډیزاین عمومي پایلې ښودل شوي دي.

جدول(۷). د سولر فوتوولتائیک سیستم د ډیزاین عمومي پایلې

شماره	ځانګړتیاوې	خرګندوني
۱	د سیستم طاقت	۵۰۰ kW
۲	د سیستم خروجي طاقت	۴۵۷ kW
۳	کلني تولید شوي انرژي	۱۰۵۲۸۰۰kWh
۴	د سیستم د فعالیت نسبت	۸۷٪
۵	د سیستم مفیده عمر	۲۵ کاله
٦	د سیستم مجموعي اولیه مصارف	۹٦۱۷۸۰۰؋

۷	د سیستم دوامداره کلنی لګښت	۸۰۰۰۰۰؋
۸	سیستم خخه ترلاسه کیدونکي کلني عواید	۴۴۶۴۰۰۰؋
۹	د یو کیلوواټ ساعت انرژي ارزښت	۱.۱۳ Af/kWh
۱۰	د سیستم د سر ګټلو موده (PP)	۲.۲ کاله
۱۱	د سیستم خالص اوسني ارزښت (NPV)	۲۰۱۴۲۲۰۰
۱۲	د سیستم د ګټې او مصرف نسبت (B/C)	۳.۰۹۴
۱۳	د سیستم پانګوني ګټه (ROI)	۱۰.٦

۵-۵- د ډیزاین شوي بادي سیستم تخنیکي او اقتصادي پایلې

د ۵۰۰ kW بادي سیستم تخنیکي او اقتصادي تحلیل پایلې په(۸) جدول کې ښودل شوي دي.

جدول(۸). د بادي سیستم د ډیزاین عمومي پایلې

شماره	ځانګړتیاوې	اندازه
۱	د سیستم طاقت	۵۰۰ kW
۱	د سیستم خروجي طاقت	۱۷۳ kW
۲	کلني تولید شوي انرژي	۱۵۱۹۵۰۴kWh
۳	د سیستم د ظرفیت فکتور	۳۴.۷٪
۴	د سیستم مفیده عمر	۲۰ کاله
۵	د یو کیلوواټ ساعت انرژي ارزښت	۳.۲۹ Af/kWh
٦	د سیستم مجموعي اولیه مصارف	۴۹۷۵۰۰۰۰؋
۷	د سیستم دوامداره کلني مصارف	۲۰۰۰۰۰۰؋
۸	سیستم خخه ترلاسه کیدونکي کلني عواید	۵۵۹۷۵۲۰؋
۹	د سیستم د سر ګټلو موده (PP)	۸.۹ کاله
۱۰	د سیستم خالص اوسني ارزښت (NPV)	۸۰۵۰۰۰۰؋
۱۱	د سیستم د ګټې او مصرف نسبت (B/C)	۱.۱٦
۱۲	د سیستم پانګوني ګټه (ROI)	۱.۲۵

٦. مناقشه

دا څېړنه چې په غزني ولایت کې ترسره شوې، څرګندوي چې د بادي او سولر فوتوولتائیک انرژیو ترمنځ انتخاب باید یوازې د نظري تولید پر بنسټ ونه شي، بلکې د سیمې واقعي اقلیمي او اقتصادي شرایطو ته اړتیا ده.

که څه هم د بادي سیستمونو کلني فعالیت ساعتونه تر لمریز سیستم ډېر ښودل شوي، خو د باد ټیټ منځنی سرعت ۳.۸۴ متر بر ثانیه د دې سبب شوی چې عملي تولید کم او بې‌ثباته وي، چې دا د بادي انرژي د

تخنيکي محدوديتونو څرګندونه کوي. برعکس، د غزني ولايت د لوړ لمريز شعاعيت او شاوخوا ۳۰۰ لمرينو ورځو شتون د دې لامل شوی چې لمريز سيستمونه ثابت، باوري او د تطبيق وړ انتخاب وګرځي.

له اقتصادي اړخه، تحليل ښيي چې بادي سيستمونه د لوړ ابتدايي لګښت، ساتنې مصارفو او اوږدې پانګې بېرته ترلاسه کولو مودې له امله د پانګونې لپاره مناسب نه دي، په داسې حال کې چې سولر فوتوولتائيک سيستمونه د ټيټ لګښت، لوړ ROI او مناسب B/C نسبت له امله اقتصادي برتري لري. دا پايلې له نړيوالو مطالعاتو سره همغږي لري، چې ښيي په هغو سيمو کې چې د باد سرعت له ٦ متر بر ثانيه څخه کم وي، بادي انرژي اقتصادي توجيه نه لري.

سربېره پر دې، تخنيکي او عملياتي اړخونه هم د سولر فوتوولتائيک سيستم په ګټه دي، ځکه دا سيستمونه ساده جوړښت لري، لږ ساتنې ته اړتيا لري او د محلي تخنيکي پرسونل له خوا په اسانۍ اداره کېداى شي. په مقابل کې، بادي سيستمونه د چاپېريال، شور او تخنيکي پيچلتيا له امله محدوديتونه لري. نو ځکه، دا څېړنه دا روښانه کوي چې د غزني ولايت لپاره سولر فوتوولتائيک انرژي نه يوازې تخنيکي بلکې اقتصادي او عملي لحاظه هم تر ټولو مناسب انتخاب دی.

په دغه څېړنه کې په غزني ولايت کې د سولر فوتوولتائيک او بادي انرژيو تخنيکي او اقتصادي ارزونه ترسره شوه، تر څو معلومه شي چې کومه انرژي د دې ولايت لپاره غوره انتخاب دی. ددې لپاره د PVsyst او HOMER سافټويرونو څخه استفاده وشوه او د دواړو سيستمونو اړوند مختلف تخنيکي، اقتصادي او چاپېريالي اړخونه په دقت سره وارزول شول. دې څېړنې درې اهداف درلودل چې عبارت دي له د سولر فوتوولتائيک او بادي انرژيو تخنيکي، د سولر فوتوولتائيک او بادي انرژيو اقتصادي تحليل او ارزونه او د غزني ولايت لپاره د غوره انرژي انتخاب. دغه اهداف د سولر فوتوولتائيک او بادي انرژيو لپاره د مناسبې ساحې په انتخاب او د سولر فوتوولتائيک او بادي سيستمونو په ډيزاين څخه ترلاسه شول. د دغو اهدافو پايلې په لاندې ډول په تفصيل سره بيانوو.

د عراق د تکريت ښار په اړه (Mohammed et al., 2019) څېړنه هم ورته پايلې وړاندې کوي. هغوی څرګنده کړې وه چې د سولر فوتوولتائيک سيستم موثريت د بادي سيستم په پرتله لوړ دی، که څه هم د نصب لومړنی لګښت يې نسبتاً زيات و. په دواړو څېړنو کې دا نتيجه ترلاسه شوې چې لمريزه انرژي د بادي انرژي په پرتله د عملي کارونې لپاره اغېزمنه او باوري سرچينه ده. همدارنګه، د (Sunderland et al., 2018) څېړنې وښودله چې سولر PV سيستمونه له مالي پلوه د بادي انرژي په پرتله مناسب دي، حتی په هغو

سيمو کې چې د باد سرچينې نسبتاً مناسبې وي.د غزني د څېړنې پايلې هم دا تاييدوي چې د سولر سيستم د توليد لګښت کم او اقتصادي ګټه يې زياته ده.

د (Liu et al., 2018) څېړنه بيا څرګندوي چې په چين کې د بادي انرژي د توليد لګښت د سولر انرژي په پرتله لږ و، چې دا د غزني د څېړنې له پايلو سره توپير لري. د دې توپير اساسي علت د اقليمي شرايطو، د باد سرعت، تخنيکي زيربناوو او د تجهيزاتو د قيمتونو اختلاف بلل کېږي. په چين کې د باد مناسب سرعت او پرمختللې تخنيکي اسانتياوې د بادي انرژي اقتصادي موثريت لوړ کړی، خو په غزني کې د باد کم سرعت او د تجهيزاتو لوړ لګښت د بادي سيستم اقتصادي اغېزمنتيا راکمه کړې ده.

٦-١- د سولر فوتوولتائيک سيستم او بادي سيستم تر منځ تخنيکي ارزونه

په دغه څېړنه کې سولر فوتوولتائيک او بادي دواړه سيستمونه د kW ۵۰۰ په ظرفيت سره ډيزاين شوي، نو په نتيجه کې وليدل شوه چې د سولر فوتوولتائيک سيستم د فعاليت ساعتونه تر بادي سيستم شاوخوا دری چنده کم دي. دا ځکه چې د سولر فوتوولتائيک سيستمونو فعاليت د لمر په شتون پورې تړلی دی او لمر د ورځې په اوږدو کې شتون لري په داسې حال کې چې باد ممکن په ټوله ورځ او شپه کې شتون ولري. له همدې امله د بادي سيستم د فعاليت ساعتونه زيات دي، څرنګه چې په (۸) جدول کې ليدل کيږي چې د بادي سيستم کلنی توليد شوی انرژي ۱۵۱۹۵۰۴ kWh هم د سولر فوتوولتائيک سيستم د کلني توليدي انرژي ۱۰۵۲۸۰۰ kWh څخه زياته ده. که چيرته د دواړو سيستمونو خروجي طاقتونو ته وګورو نو د سولر فوتوولتائيک سيستم خروجي طاقت ۴۵۷ kW دی، په داسې حال کې چې د بادي سيستم خروجي طاقت ۱۷۳ kW دي، دا ځکه چې په غزني ولايت کې د باد منځنی سرعت په ۳۰ متره ارتفاع کې يوازې ۳.۸۴ متره فی ثانيه دی. د سولر فوتوولتائيک سيستم مفيده عمر هم نسبت بادي سيستم ته زيات دی.

په نتيجه کې داسي ويلای شو چې که څه هم د بادي سيستم د فعاليت ساعتونه او کلني توليدي انرژي مقدار تر سولر فوتوولتائيک سيستم زياته ده خو د بادي سيستم خروجي طاقت د کم باد سرعت له امله له سولر فوتوولتائيک سيستم څخه ډير کم دي چې دغه ټکی له تخنيکي نظره د غزني ولايت لپاره د سولر فوتوولتائيک سيستم غوره والي ثابتوي.

جدول(۹). د سولر فوتوولتائيک سيستم او بادي سيستمونو تخنيکي مقايسه

شماره	ځانګړتياوې	سولر فوتوولتائيک سيستم	بادي سيستم
۱	د کلني افقي وړانګو اندازه / د باد متواسط کلنی سرعت	۲۰۹۹.۸	۳.۸۴ m/s

۲	د سیستم طاقت	۵۰۰ kW	۵۰۰ kW
۳	د سیستم خروجي طاقت	۴۵۷ kW	۱۷۳ kW
۴	کلني تولید شوي انرژي	۱۰۵۲۸۰۰kWh	۱۵۱۹۵۰۴kWh
۵	د سیستم د فعالیت نسبت / ظرفیت فکتور	۸۷٪	۳۴.۷٪
٦	د سیستم د فعالیت ساعتونه په کال کې	۲۲۱٦	٦۸۸۷
۷	د سیستم مفیده عمر	۲۵ کاله	۲۰ کاله

٦-۲- د سولر فوتوولتائیک سیستم او بادي سیستم تر منځ اقتصادي ارزونه

په غزني ولایت کې د سولر فوتوولتائیک او بادي انرژیو اقتصادي تحلیل او ارزونه د ۵۰۰ kW سولر فوتوولتائیک او بادي سیستمونو په ډیزاین سره ترسره شوې. د سولر فوتوولتائیک او بادي سیستمونو د اقتصادي تحلیل پایلې په جدول (۱۰) کې ذکر شوې دي، لیدل کیږي چې د بادي سیستم اولیه مصارف نظر سولر فوتوولتائیک سیستم ته پنځه چنده زیات دي او همدارنګه د بادي سیستم دوامداره کلني مصارف هم نظر سولر فوتوولتائیک سیستم ته ۲.۵ چنده زیات دي. د زیاتو اولیه او دوامداره مصارفو له امله د بادي سیستم د یو kWh انرژي قیمت او همدارنګه د سیستم د سر ګټلو موده هم نسبت سولر فوتوولتائیک سیستم ته زیاته ده. د سولر فوتوولتائیک سیستم د ګټې او مصرف نسبت (B/C) او همدارنګه د پانګونې ګټه (ROI) تر بادي سیستم ډیره لوړه ده.

جدول(۱۰). د سولر فوتوولتائیک سیستم او بادي سیستمونو اقتصادي مقایسه

شماره	ځانګړتیاوې	سولر فوتوولتائیک سیستم	بادي سیستم
۱	د یو کیلوواټ ساعت انرژي ارزښت	۱.۱۳ ؋/kWh	۳.۲۹؋ /kWh
۲	د یو کیلوواټ ساعت انرژي د خرڅلاو بیه	۵ افغانۍ	۵ افغانۍ
۳	د سیستم مجموعي اولیه مصارف	؋۹٦۱۷۸۰۰	؋۴۹۷۵۰۰۰۰
۴	د سیستم دوامداره کلني مصارف	؋۸۰۰۰۰۰	؋۲۰۰۰۰۰۰
۵	سیستم څخه ترلاسه کیدونکي کلني عواید	؋۴۴٦۴۰۰۰	؋۵۵۹۷۵۲۰
٦	د سیستم د سر ګټلو موده (PP)	۲.۲ کاله	۸.۹ کاله
۷	د سیستم خالص اوسني ارزښت (NPV)	۲۰۱۴۲۲۰۰	۸۰۵۰۰۰۰
۸	د سیستم د ګټې او مصرف نسبت (B/C)	۳.۰۹۴	۱.۱٦
۹	د سیستم پانګونې ګټه (ROI)	۱۰.٦	۱.۲۵

۷. څېړنې عمومي پایلې

په غزني ولایت کې د سولر فوتوولتائیک او بادي انرژیو تخنیکي او اقتصادي تحلیل او ارزونه د kW ۵۰۰ سولر فوتوولتائیک او بادي سیستمونو په ډیزاین سره ترسره شوې، د دغې ارزونې پایلې ښیي چې په

غزنۍ ولایت د افغانستان له هغو سیمو څخه دی، چې د کال په اوږدو کې په منځنۍ توګه هره ورځ ٦-٧ ساعته لمر لري. دا لمر د سولر فوتوولتائیک پنلونو لپاره کافي دی چې برېښنا تولید کړي. په داسي حال کې چې په غزنۍ ولایت کې مناسب باد شتون نه لري او د باد اوسط سرعت ډېر ټیټ دی نو ځکه د غزني ولایت لپاره سولر فوتوولتائیک انرژي له تخنیکي نظره غوره انتخاب دی. د اقتصادي نظره هم د غزني ولایت لپاره سولر فوتوولتائیک انرژي نظر بادي انرژي ته غوره انتخاب دی، ځکه چې د بادي سیستم اولیه او دوامداره مصارف تر سولر فوتوولتائیک سیستم څو چنده زیات دي او همدارنګه د بادي سیستم د یو kWh انرژي ارزښت او د سرګېلو موده تر سولر فوتوولتائیک سیستم څو چنده زیاته ده. که څه هم بادي سیستمونه ممکن د کلني تولید له نظره لوړ رقم وړاندې کړي، خو د غزني د جغرافیايي، اقلیمي، اقتصادي شرایطو او تخنیکي محدودیتونو له مخې، دا سیستمونه مناسب نه دي. برعکس، سولر فوتوولتائیک سیستمونه هم د فعالیت او هم د لګښت له نظره تر بادي سیستم غوره دي. د ترلاسه شویو پایلو په نتیجه کې داسې ویلای شو چې د غزني ولایت لپاره د سولر فوتوولتائیک سیستمونو له تخنیکي او اقتصادي پلوه تر بادي سیستمونو غوره انتخاب دی.

ماخذونه

ثقفی، م .(۱۴۰۱ ه.ش) منابع انرژی تجدید پذیر. انتشارات دانشگاه تهران.

Ahady, S., Dev, N., & Mandal, A. (2020). An overview of the opportunities and challenges in sustaining the energy industry in Afghanistan. In E3S Web of Conferences (Vol. 173, p. 03006). EDP Sciences.

Ahmadi, M. H., Hosseini Dehshiri, S. S., Hosseini Dehshiri, S. J., Mostafaeipour, A., Almutairi, K., Ao, H. X., ... & Techato, K. (2022). A thorough economic evaluation by implementing solar/wind energies for hydrogen production: a case study. Sustainability, 14(3), 1177.

Anwarzai, M. A., & Nagasaka, K. (2017). Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 150-160.

Adnan, M., Ahmad, J., Ali, S. F., & Imran, M. (2021). A techno-economic analysis for power generation through wind energy: A case study of Pakistan. Energy Reports, 7, 1424-1443.

Amiri, A. A. (2021). Comparative analysis of economic aspects of concentrated solar power versus photovoltaic in Afghanistan-Case study: Kang district, Nimruz. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, 4(2), 111-119.

Biçen, T., & Vardar, A. (2022). Technical and Economic Analysis of Electricity Production with Solar Panels: Bursa Example. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 36(1), 59-73.

Dellosa, J. T., Panes, M. J. C., & Espina, R. U. (2021, September). Techno-economic analysis of a 5 MWp solar photovoltaic system in the Philippines. In 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE

Davis, P., & Green, R. (2019). Wind and solar energy: A techno-economic assessment of their potentials in developing countries. Journal of Renewable Energy.

Durrani, T. et al. (2019). "Renewable Energy Development in Afghanistan: Opportunities and Challenges." Journal of Energy and Power Engineering.

Ershad, A. M. (2014). Potential of solar photovoltaic and wind power plants in meeting electricity demand in Afghanistan (Master's thesis, University of Dayton).

Ershad, A. M., Brecha, R. J., & Hallinan, K. (2016). Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. Renewable Energy, 85, 445-453.

Haidari, A. (2020). Renewable Energy (Solar) and Its Impact on Rural Households' Welfare (Case Study of Badakhshan Province, Afghanistan). Journal of Economics and Business, 3(2).

Ibrahim, M. M. (2022). Technical and economic comparison between solar and wind energy supplying a desalination system. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 10(2), 1-24.

Jahangiri, M., Haghani, A., Mostafaeipour, A., Khosravi, A., & Raeisi, H. A. (2019). Assessment of solar-wind power plants in Afghanistan: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 99, 169-190.

Jürgensen, H., et al. (2020). "Cost comparison of solar and wind energy in different geographical regions." Energy Economics.

Khajah, A. M., & Philbin, S. P. (2022). Techno-economic analysis and modelling of the feasibility of wind energy in Kuwait. Clean Technologies, 4(1), 14-34.

Liu, G., Li, M., Zhou, B., Chen, Y., & Liao, S. (2018). General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. Energy conversion and management, 156, 416-426.

Mohammed, N. Q., Ahmed, M. S., Mohammed, M. A., Hammood, O. A., Alshara, H. A. N., & Kamil, A. A. (2019, May). Comparative analysis between solar and wind turbine energy sources in IoT based on economic and efficiency considerations. In 2019, the 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS) (pp. 448-452). IEEE.

M., & Ahadi, M. H. (2020). Renewable energy potential for sustainable development in Afghanistan. Journal of Sustainable Energy Revolution, 8-15.

Mehrad, A. T. (2021). Assessment of solar energy potential and development in Afghanistan. In E3S Web of Conferences (Vol. 239, p. 00012). EDP Sciences.

Neupane, D., Kafle, S., Karki, K. R., Kim, D. H., & Pradhan, P. (2022). Solar and wind energy potential assessment at the provincial level in Nepal: Geospatial and economic analysis. Renewable Energy, 181, 278-291.

Weather spark.

Noorzad, N. (2018). Renewable energy: Power generation and opportunities for a sustainable future in Afghanistan. Master of Science Thesis. Muğla Sıtkı Koçman University, Turkey, 15-38.

Naseri, E., Altan, B. D., & Güngör, A. (2024). Investigating Solar Energy Potential in Afghanistan under Certain Climatic and Geometrical Parameters of Cities and Buildings. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 16(4), 179-194.

Pourasl, H. H., & Khojastehnezhad, V. M. (2021). Techno-economic analysis of wind energy potential in Kazakhstan. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 235(6), 1563-1576.

Qasimi, A. B., Isazade, V., & Toomanian, A. (2022). A Review of Sustainable and Renewable sources of energy for Afghanistan. Journal of Renewable Energy and Mechanics, 5(02), 60-75.

Safi, R., & Sharma, M. P. (2019). Energy scenario of Afghanistan. Energy, 9(4).

Sediqi, M. M., Howlader, H. O. R., Ibrahimi, A. M., Danish, M. S. S., Sabory, N. R., & Senjyu, T. (2017). Development of renewable energy resources in Afghanistan for economically optimized cross-border electricity trading. Aims Energy, 5(4).

Serat, Z., Danishmal, M., & Mohammadi, F. M. (2024). Optimizing hybrid PV/wind and grid systems for sustainable energy solutions at the university campus: Economic, environmental, and sensitivity analysis. Energy Conversion and Management: X, 24, 100691.

Slimankhil, A. K., Anwarzai, M. A., Sabory, N. R., Danish, M. S. S., Ahmadi, Harrucksteiner, A., Thakur, J., Franke, K., & Sensfuss, F. (2023). A geospatial assessment of the techno-economic wind and solar potential of Mongolia. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 55, 102889.

Tayeb, M. B., Rahnuma, M. S., & Ghafourzay, H. (2024). The Impact of Renewable Energy on Sustainable Economic Growth in Afghanistan. Nangarhar University International Journal of Biosciences, 362-367.

Zgham, W., Shirzad, S., & Fatemi, S. A. Z. (2024). Energy Assessment & Comparative Study of Mono and Poly Solar PV Technologies Using Advanced PVsyst Software. Archives of Advanced Engineering Science, 1-7.

Zhang, L., et al. (2021). "Techno-economic analysis of wind energy potential in China: A case study in the Xinjiang region." Renewable Energy.

Technical and Economic Evaluation of Solar Photovoltaics and Wind Energy in Ghazni Province

Dost Mohammad Sarwari[1*], Mohammad Yasin Kamaly[1], Mohammad Adel Adeel[1], Atiqullah Hamim[1] and Mohammad Siddique Nazari[2]

1. Electrical Power Engineering Department, Electromechanics Faculty, Ghazni Technical University, Ghazni, Afghanistan
2. Electrical Power Engineering Department, Engineering Faculty, Dawat University, Kabul, Afghanistan

sarwari@teug.edu.af

Abstract

This research was conducted in Qalai Jouz, the central area of Ghazni province, to compare the technical and economic aspects of wind and solar energy. Ghazni and Afghanistan in general face electricity shortages and low-quality supply. Therefore, using clean and renewable domestic resources is important not only for energy independence but also for reducing environmental costs and strengthening the economy. In this study, both wind and solar systems were designed with a capacity of 500 kW. The goal was to analyze and compare both resources and determine the most suitable and sustainable energy option for Ghazni province. The analysis was done using HOMER Pro and Pvsyst software, which assessed climate data, production capacity, costs, revenues, and payback period. The results show that the solar system operates for 2,216 hours annually, with an output power of 457 kW and an annual production of 1,052,800 kWh. Its initial cost is 9.678 million AFN, with annual expenses of 0.8 million AFN and annual revenue of 4.464 million AFN. The wind system operates for 6,687 hours per year, with an output of 173 kW and total generation of 1,519,504 kWh. Its initial cost is 49.75 million AFN, annual expenses are 2 million AFN, and annual revenue is 5.5975 million AFN. The higher generation and revenue of the wind system are due to more operating hours. The cost of electricity per kWh is 1.13 AFN for the solar system and 3.29 AFN for the wind system. The payback periods are 2.2 years for solar and 8.9 years for wind. Although the wind system produces more electricity, the solar system's lower cost, faster payback, and higher efficiency indicate that it is the better choice for Ghazni. The study recommends prioritizing solar energy in Ghazni's center and continuing wind energy studies only in areas with high wind potential.

Keywords: *Economic Analysis, Ghazni Province, Solar Energy, Technical Analysis, Wind Energy*

د لمریزو فوتوولتائیک حجرو د نسلونو مقایسوي څېړنه او د پرمختګ بهیر

پوهندوی فدامحمد محمدي [۱*]، پوهنمل رحمت الله لیوال [۲]، حمیدالله هوډیال [۳]

۱- فزیک څانګه، ښووني او روزنې پوهنځی، غزني پوهنتون

۲- فزیک څانګه، ښووني او روزنې پوهنځی ، پکتیکا پوهنتون

۳- د چین د ساینس او تیکنالوژي پوهنتون د دوکتورا محصل

د لیکوال ایمیل ادرس : fadamohammad1987@gmail.com

لنډیز

دا څېړنه د کېفي میتود په اساس د لمریزو حجرو د نسلونو ترمنځ پرتله کول دي. د انرژي د زیاتیدونکو اړتیاوو له امله لمریزه انرژي زیات ارزښت لري چې د فوسیل سون توکو لپاره یو مناسب، پایدار او پاک بدیل ګڼل کیږي. لمریزه فوتوولتائیک تکنالوژي د بریښنا د تولید لپاره یوه مخکښه طریقه ده چې په دې وروستیو کلونو کې یې بیې را ټیټې او اغېزمنتیا یې لوړه شوې ده. فوتوولتائیک لمریزې حجرې تر اوسه څلور نسلونه لري. لومړی نسل لمریزې حجرې چې مونوکریسټالین، پولی‌کریسټالین او ګالیم آرسنایډ حجرې دي. دویم نسل لمریزې حجرې چې د نازک فلم ټکنالوژي آمورف سیلیکان، کادمیم ټیلورایډ او مس ، ایندیم ، ګالیم او سلنایډ حجرې دي. درېیم نسل لمریزې حجرې چې پرمختللې حجرې پیروسکایټ، کوانټم ټکی، څو پیوندیزې حجرې دي. څلورم نسل لمریزې هایبریډ حجرې دي. د بیې د کمېدو، تکنالوژي د پراخېدو او د نړیوالو بازارونو پراخ ملاتړ له امله لمریزې انرژي ته پانګونه ورځ تر بلې زیاتیږي. دې نتیجې ته رسیږو چې ترټولو یې درېیم نسل تر اوسه د ټیټې بیې ، مؤثریت، نوري او الکترونیکي ځانګړتیاو له اړخه بهترین انتخاب دي.

کلیدي کلمې: پیرووسکایټ حجرې، لمریزه انرژي، فوتوولتائیک حجرې، مونوکریسټالین سلیکان، نازک فلم حجرې.

۱. سریزه

الحمدُ للهِ ربِّ العالمين، الذي علَّم بالقلم، علَّم الإنسانَ ما لم يعلم، والصلاةُ والسلامُ على نبيِّنا محمدٍ، وعلى آلهِ وصحبِهِ أجمعين. أمّا بعدُ:

په وروستيو لسيزو کې د انرژي اړتياوې مخ پر زياتېدو دي چې پايدارو او پاکو انرژيو ته اړتيا ډېره محسوس شوې ده. په عصري نړۍ کې د انرژي غوښتنه ورځ تر بلې زياتيږي او د تجديد وړ سرچينو لکه لمريزې انرژي پراخې کارونې ته اړتيا پيدا شوې ده. لمريزه انرژي د چاپېريال لپاره پاکه او باثباته سرچينه ده د لمريزې انرژي څخه د برېښنا د توليد لپاره لمريز فوتوولتائيک سيستمونه ډېر مهم رول لري. لمر د انرژي يوه بډايه او پراخه سرچينه ده. انسانان د لمر له انرژي څخه يوازې يوه کوچنۍ برخه ګټه اخلي، خو دا امکان شته چې د ځمکې سطحې ته رسېدونکې لمريزې وړانګې د انرژي د لوړېدونکو اړتياوو پوره کولو ظرفيت ولري.

په ۲۰۲۲ ميلادي کال کې د لمريزې فوتوولتائيک انرژي په توليد کې د پام وړ زياتوالی راغلی وو چې شاوخوا (GW) ۲۸۶ګيګاواټه نوی توليدي ظرفيت ور اضافه شو يعنې شاوخوا ٪۲۶ وده يې کړې ده. د دې زياتوالي له امله د سولر PV مجموعي توليد شاوخوا ۱۲۰۰ ګيګاواټه ته ورسېد، دا لومړی ځل وو چې د لمريزې انرژي توليد د بادي انرژي په پرتله زيات مطلق توليد وړاندې کړ (IRENA, 2023), (Sharma & Mishra, 2025).

د څېړنو له مخې او اړتياوو ته په کتو سره به په دې هيوادونو هند او متحده ايالاتو کې د ۲۰۲۲ څخه تر ۲۰۲۷ ميلادي کلونو پورې لمريز PV توليدي سکتور ته له ۲۵ ميلياردو امريکايي ډالرو څخه ډېره پانګونه وشي. دا پانګونه د تېرو پنځو کلونو په پرتله اووه چنده زياته ده. په هند کې د نويو توليدي ظرفيتونو په زياتولو سره به د بادي او لمريزې برېښنا د توليد کچه د ۱۴۵ ګيګاواټه په اندازه لوړه شي، چې دا به د هند هېواد روان ظرفيت نږدې دوه چنده کړي چې د ۲۰۲۲ څخه تر ۲۰۲۷ کلونو پورې به ترسره شي. په راتلونکو پنځو کلونو کې به د بادي او لمريزې فوتوولتائيک برېښنا په توليد کې د پام وړ زياتوالی راشي چې د موجوده توليد په پرتله به دوه چنده زيات شي. د ۲۰۲۷ ميلادي کال تر پای پورې اټکل کېږي چې د دغه نوې کيدونکې انرژي سرچينې به د نړۍ د ټولې برېښنا د توليد شاوخوا ٪۲۰ برخه جوړه کړي (Sharma & Mishra, 2025), (IRENA2023), (IEA, 2022).

د بشريت په تاريخ کې انسانانو تل د انرژي پر دوديزو سرچينو لکه فوسيل سون توکو، سکرو، طبيعي ګاز، کرنيزو فاضله موادو او نورو منابعو ډېره تکيه کړې ده. د انرژي د دې محدودو زيرمو پراخ استعمال د چاپېريال بېلابېلو ستونزو ته لاره هواره کړې ده، چې د فضا ککړتيا، اوبو ککړتيا، اقليمي بدلونونه او د ژونديو موجوداتو پر ډولونو منفي اغېزې پکې شاملې دي له همدې امله دا مهمه ده

چې د انرژي چاپیریال دوستانه یا غیر دوديزې سرچینې د استفادې په موخه انتخاب کړل شي، لکه لمر، باد، بایوماس، ځمکنۍ تودوخې او سمندري څپو څخه بیا بیا انرژي ترلاسه کېدای شي. لمریزې انرژي ته د نړۍ په هر ځای کې لاسرسی ممکن دی له همدې امله د فوسیل سون توکو لپاره تر ټولو مناسب بدیل ګڼل کېږي(Matsuyama et al., 2013).

د نړیوالې انرژي ادارې (IEA) د وروستي راپور له مخې لمریزه انرژي په ۲۰۲۲ کال کې هم د نړۍ د نوی کیدونکو انرژیو ظرفیت د پراخوالي اصلي برخه وه چې د ۲۸۶ ګیګاواټه ظرفیت سره مخته ولاړه. د ۲۰۲۴ کال تر پای پورې به دا ظرفیت له ۳۱۰ ګیګاواټه څخه زیات شي. د دې ودې اصلي لاملونه د سولرونو ډولونو د بیو راکمېدل د مختلف PV سیستمونو زیات تطبیق او د حکومتونو له لوري د سترې کچې PV پروژو پراخ تطبیق ته توجه ده. د نړیوالې انرژي ادارې د اصلي اټکل له مخې تمه کېږي چې د ۲۰۲۲ څخه تر ۲۰۲۷کلونو پورې د نړیوالو نوی کیدونکو انرژیو ظرفیت شاوخوا ۲۴۰۰ ګیګاواټه څخه زیات شي، چې دا به نږدې٪۷۵ وده وي (Sharma & Mishra, 2025), (IEA), 2023), (IEA, 2022).

د نړۍ د انرژي اړتیاوې د پوره کولو او د چاپیریال د ساتنې لپاره د نوي کیدونکو انرژیو تکنالوژي ډېرستر ضرورت لري. سربېره پر دې، دا ټکنالوژي اوسمهال تر ټولو د مؤثرې او ګټورې نوې کیدونکې انرژي سرچینه ده. د لمریز فوتوولتائیک ټکنالوژي په پرمختیایي هېوادونو کې کلیوالو سیمو ته د برېښنا رسولو یوه مهمه سرچینه ده (Sharma & Mishra, 2025), (Ahuja & Tatsutani, 2009).

د فوتوولتائیک(PV) حجرو د کارولو اصلي ګټه دا ده چې د لمر انرژي په مستقیم ډول مستقیم جریان (DC) برېښنا ته اړوي. سربېره پر دې د لمریزې انرژي کارول ډېر ساده دي، مستقیماً د کار په ځایونو کې کارول کېدای شي، د جوړونې لپاره کم لګښت ته اړتیا لري، په هر ځای کې حتی د استوګنې په سیمو کې هم خوندي دي.

د لمریزو حجرو یوه بله مهمه ځانګړنه داده چې دا سیستمونه غږیزه ککړتیا نه تولیدوي، چې دا یې له عمومي برېښنایي پمپ کولو سیستمونو سره توپیر ورکوي. فوتوولتائیک (PV) پینلونه د دې له امله چې میخانیکي برخې نه لري، په پراخه توګه د لږ ساتنې او کم عملیاتي لګښتونو لرونکي سیستمونه ګڼل کېږي. د لمریزې فوتوولتائیک تکنالوژي یوه بله ګټه دا ده چې دا وړتیا لري چې اضافي سولر پینلونه د ودانیو پر چتونو او نورو بېلابېلو سطحو پرته له دې چې د شاوخوا خلکو د ژوند چاپېریال ته کوم خنډ یا مزاحمت ور واړوي، نصب شي (Thakur et al., 2022), (Boyle, 2004). په هند کې ځمکې ته د لاسرسي او د چتونو د نصبولو د اسانتیا له امله د سولر برېښنا بیه له ۱۸ ډالر کیلوواټه پر ساعت (په ۲۰۱۱ کال کې) څخه راکمه شوې ده، تر دې چې د ۲۰۲۲ په دسمبر کې دا بیه تر ټولو ټیټې کچې ۲.۲۹ کیلو واټه پر ساعت ته راټیټه شوه (Sharma & Mishra, 2025),

(IRENA, 2023). هند چې په استوايي سيمه کې موقعيت لري د کال په اوږدو کې نسبتاً باثباته لمريزې وړانګې ترلاسه کوي او په اوسط ډول هر کال له ۲۸۰۰ څخه تر ۳۰۰۰ ساعتونو پورې د لمر وړانګې لري. دغه سيمه هره ورځ له ۴ څخه تر ۷ کيلوواټه ساعت د لمر وړانګې د هر متر مربع سطحې لپاره ترلاسه کوي(Pastuszak & Węgierek, 2022). د ۲۰۲۳ تر دسمبر ۳۱ پورې، د هند د لمريزې برېښنا نصب شوی ظرفيت ۷۳.۱۰۹ ګيګاواټه ته رسېدلی دی. د دې پرمختګ اصلي دليل د سولر پينل د بيې ټيټوالی دی. د دې ځانګړي انرژۍ سرچينې د توليد بيې په تېرو لسو کلونو کې په ښکاره توګه راټيټې شوې دي، چې دا نه يوازې اقتصادي ده، بلکې ډېر وخت د برېښنا توليد تر ټولو ارزانه انتخاب ګڼل کېږي. د ۲۰۱۰ او ۲۰۲۲ کلونو ترمنځ، د سولر ماډيولونو بيې تر ٪۸۸ پورې راکمې شوې دي، په همدې موده کې په پراخه اندازه د سولر PV پروژو لپاره د برېښنا توليد منځنۍ نړيوال لګښت (LCOE) هم ٪۸۸ راټيټ شوی دی. د ۲۰۲۳ کال په جريان کې د نويو نصب شوو پراخې کچې سولر PV برېښنا فابريکو څخه د برېښنا توليد لګښت ۰,۰۵۳ ډالر کيلوواټه پر ساعت ته راټيټ شوی دی. تمه کېږي چې تر ۲۰۵۰ کال پورې دا لګښت ۰,۰۲۱ ډالر کيلوواټه پر ساعت ته راکم شي.

د ۲۰۱۱ او ۲۰۲۳ کلونو ترمنځ د ۲۰۲۳ کال تر پای پورې، په ټوله نړۍ کې د سولر PV مجموعي نصب شوی ظرفيت ۱،۴۱۸،۰۱۶ ميګاواټه ته رسيږي، چې پکې تر ټولو زياته برخه د چين ده (۶۰۹،۹۲۱ ميګاواټه)، بيا د امريکا متحد ايالتونه (۱۳۹،۲۰۵ ميګاواټه)، جاپان (۸۹،۰۷۷ ميګاواټه)، جرمني (۸۱،۷۳۹ ميګاواټه)، او هند (۷۳،۱۰۹ ميګاواټه) دي. په اروپا کې هم د PV سولر نصبونه د پام وړ ده چې مجموعاً ۲۸۸،۶۴۴ ميګاواټه ته رسيږي (Sharma & Mishra, 2025). (IRENA, 2024) ,(IRENA, 2023)

د دې څېړنې موخې د لمريزو فوتوولتائيک حجرو د مختلفو نسلونو پيژندنه او تشريح کول دي. چې د هر نسل جوړښت، موادو، مؤثريت، لګښت او عملي کارونې ترمنځ مقايسه ترسره شي. په ورته ډول د فوتوولتائيک ټکنالوژۍ پرمختګونه او ستونزې بيانول د درېيم او څلورم نسل پرمختللو ټکنالوژيو اهميت روښانه کول او د نوي نانومواد، پيرو سکايټ او هايبريډ حجرو د استعمال اړتيا تحليلول شامل دي. دا موخې د لمريزې انرژۍ د پرمختګ په برخه کې ارزښتمنې لارښوونې چمتو کوي.

۲. د څېړنې ميتود

دا څېړنه د لمريزو فوتوولتائيک حجرو د نسلونو د څېړنې لپاره کيفي ميتود څخه استفاده کړې چې د دوهمي معلوماتو پر اساس ولاړه ده دا ميتود په ساينسي څېړنو کې د پراخو موضوعاتو د تحليلي

ارزوني لپاره مناسب بلل کيږي .چې د تجربوي معلوماتو پرته د موجوده علمي موادو څخه پکې استفاده شوې.

د معلوماتو راټولولو مرحلې کې له ګوګل سکالر ، معتبرو مقالاتو، معتبرو علمي کتابونو او ويبسايټونو څخه له ۱۰۰ مختلفو منابعو څخه معلومات راټوله شوې چې د لمريزو حجرو دفوتوولتائيک جوړښت، مؤثريت، لګښت او پرمختګونو په اړه يې پراخه معلومات لرل. بيا د غوراوي معيارونو له مخې لکه د انتشار نيټه، اعتبار او موضوع سره نږدېوالی په اساس له دې څخه ۵۰ تر ټولو معتبرې او اړوند منابع غوره شوې چې تحليلی عمق يې تضمين کړي.

په تحليلی مرحلې کې راټول شوي معلومات د جدولونو او تشريحاتو له لارې تحليل او مقايسه شوي چې د نسلونو جوړښت، مقايسه، پرمختګونه، ستونزې او نوي ټکنالوژيو اهميت روښانه او د دريېم او څلورم نسل اهميت يې وارزول شي.

۳.فوتوولتائيک ټکنالوژي

الکساندر ايدموند بيکرېل چې يو فرانسوی فزيک پوه و، په ۱۸۳۹ م کال کې يې د فوتوولتائيک اغېز وموند کله چې يې په يوه الکتروليتي حجره کې تجربه کوله. دا حجره له دوو فلزي الکترودونو جوړه وه چې په يوه برېښنا انتقالوونکي مايع محلول کې ځای پرځای شوي وو. په همدې تجربه کې نوموړي د ولتاژ کشف وکړ. فوتوولتائيک اغېز له همدې ځايه پېژندل شوی، دا پېښه د فوتوولتائيک(PV) اغېز په نوم يادېږي. د لمريزې حجرې تکنالوژي بنسټ د PV اغېز دی. په کلکو موادو کې لکه سيلينيم د PV اغېز لومړی ځل په ۱۸۷۰ کال کې څېړل شوی و. هغه وخت دا ټکنالوژي ګرانه وه او يوازې ٪ ۱-۲ اغېزمنتيا يې درلوده. د ۱۹۴۰ او ۱۹۵۰ کلونو په منځ کې د Czochralski(CZ) پروسه رامنځته شوه چې د سليکان د پاکو کرسټالونو د ترلاسه کولو لپاره کارول کېږي.

په PV اغېز کې هغه فوتونونه چې انرژي يې د نيمه هادي موادود انرژي سويه سره مساوي وي جذب کېږي، چې په نتيجه کې الکترونونه اوخاليګاوي (حفرو) د چارج انتقالونکو ذراتو په توګه توليدېږي او لوړ انرژي حالت ته ځي. کله چې n - ټايپ او p - ټايپ نيمه هادي مواد يوځای شي يو جوړه شوی نښلوونکي ساحه رامنځته کېږي چې د برېښنايي ساحې د توليد سبب کېږي. دغه برېښنايي ساحه د دې له امله رامنځته کېږي چې الکترونونه د مثبت چارج لرونکي p - خوا ته حرکت کوي

او سوري یا خالیګاوې د منفي چارج لرونکي n - خوا ته خوځيږي دا پېښه د منفي چارج لرونکو ذراتو یو لور ته حرکت او د مثبت چارج لرونکو ذراتو برعکس حرکت رامنځته کوي. دغه د الکترون حرکت په حجرو کې برېښنايي جريان توليدوي. هره فوتوولتائيک (PV) حجره د څو نيمه هادي موادو طبقې لري. د برېښنا توليد هغه مهال کيږي کله چې د لمريزې وړانګې د حجري پر سطحې دلګيدو په وخت کې د نيمه هادي موادو په بېلابېلو طبقو کې یو برېښنايي ساحه رامنځته شي. هغه ځواک چې حجره ترلاسه کوي د لګيدونکې نور په شدت پورې تړلی دی. د ځمکې وړتیا د لمریز ځواک د ترلاسه کولو لپاره شاوخوا ۱.۸×۱۰^{۱۱} ميګاواټه اټکل شوې چې دا د اوسني توليد له اندازی څخه ډېر زيات دی.

د نړۍ د انرژي د مصرف په کچه کې د فوتوولتائيک(PV) حجرو ونډه ډېره مهمه ده. د PV حجرو جوړښت د نيمه هادي موادو لکه سلیکان څخه کیږي. سليکان چې څلور ولانسه الکترونونه لري اکثره په PV حجرو کې کارول کيږي. کله چې د n-ټايپ ځانګړتیا لرونکی ورکونکي لکه فاسفورس چې پنځه ولانسه الکترونونه لري، د حجري په يوه خوا کې ور اضافه شي نو سليکان مواد په خپل ولانس کې ازاد الکترونونه ترلاسه کوي، چې د منفي چارج لرونکو ذرو زیاتوالی رامنځته کوي.

بورون چې درې ولانسه الکترونونه لري، د سليکان په پرتله د الکترون جذبولو توان لري او د p – ورکوونکې په توګه عمل کوي. کله چې دp - ډول سليکان نږدې دn - ډول سليکان شي د الکترونونو خپرېدل رامنځته کيږي، چې دلته د(p–n) الحاق جوړښت رامنځته کوي.

د خپرېدو پروسه د سوري یا خالیګاه او الکترونونو بیا یوځای کېدل دي چې د p–n جوړښت کې واقع کيږي. د برېښنايي ساحې شتون د يو ډايوډ جوړولو لامل ګرځي چې جريان يوازې په يوه لوري کې تېريږي.د(ARC) يوه نازکه شفافه پوښ یاطبقه ده چې د سليکان سطحې باندې د نور د انعکاس دکميدو او جذب دزیاتیدو له کبله د نور د ضايع کېدو د مخنيوي لپاره کارول کيږي. د دې طبقې په مرسته دنور د تېرېدو اندازه زياتيږي چې په نتیجه کې د سولر حجرو عمومي اغېزمنتيا ښه کيږي.

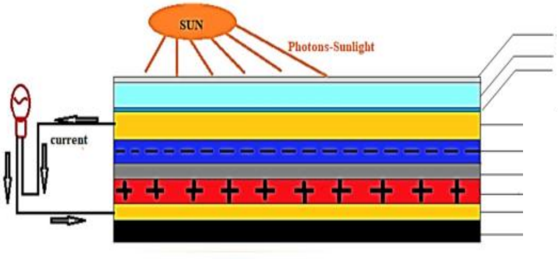
د سولر حجرو د n - او p- ټايپ برخو د نښلولو لپاره فلزي شبکه کارول کيږي چې بهرني بار سره وصل شي. کله چې فوتونونه پر حجرو ولګيږي په حجرو کې موجود بار وړونکي ذرات انرژي

ترلاسه کوي. برېښنايي ساحی الکترونونه او سوري يا خالیگاوې چې بیلابیل چارج لرونکي ذرات دي له یو بل څخه جلا کوي. کله چې د خارجي بار نښلونه تکمیل شي برېښنا تولید یږي.

د فوتوولتائیک(PV) لمریزې حجرې په جذب کوونکي طبقه کې د لمر وړانگې نیولو او برېښنايي انرژۍ ته د بدلون مهم رول لري. د دې طبقي فزیکي ځانگړتیاوې په ځانگړې توگه الکترونیکي ځانگړتیاوې لکه د انرژي تشه، د انرژي د چارج انتقالونکو ذراتو حرکت، د چارج انتقالونکو د ژوند وخت، د بیا یوځای کېدو مقدار، د ناخالصي اندازه او برېښنايي هدایت او همدارنگه نوري ځانگړتیاوې لکه د جذب اندازه، نورانعکاس ضریب، نوري د انرژي تشه، انعکاس او فوتولو مینسانس د لمریزې حجرې د اغېزمنتیا او عمومي کړنې د ارزونې لپاره ډېر مهم دي.

هغه مواد چې غیر زهري وي په پراخه کچه شتون ولري او د جذب لوړه اندازه يي $۱۰۵cm^{-۱}$ او مناسبه د انرژي تشه(۱.۵ev) ولري د PV جذب کونکي طبقې لپاره د پام وړ توجه ترلاسه کړې ده. سلیکان ، CZTS، CdTe، پرووسکایټ، کوانټم ډاټس او رنگین (dye-sensitized) حجرې بېلابېل هغه جذب کونکي مواد دي چې د PV لمریزې حجرې جذب کونکي طبقې په توگه کارول کیږي.

د PV نیمه هادي موادو د انرژي خالیگا معلومول ډېر مهم دي ځکه چې دا د نور هغه ځانگړې څپې اوږدوالي ښیي چې جذب کېدای شي.



د انعکاس ضد پوښ
کلک پوښ شیشه
چسپناکه شفافه
p-n د موادو نښلولو فلزی چوکاټ
n - ډول سیلیکان (الکترونونه)
p-ډول سیلیکان(سوري)
p- ډول سیلیکان(سوري)
د ملاتړ لپاره اساس
جریان

۱شکل: د PV نیمه هادي جوړښت

۴. د لمريزو حجرو نسلونه

د فوتوولتائيک حجرو نسلونه په لاندې توګه تشريح کېږي:

۴-۱- د فوتوولتائيک حجرو نسلونه

په تېرو لسو کلونو کې فوتوولتائيک تکنالوژي د انرژي د بدلون په بهير کې يو مهم رول خپل کړی دی. د موادو او د توليدي ميتودونو پرمختګونو په دې برخه کې اساسي ونډه لرلې ده. خو سره له دې لا هم ګڼ شمېر ستونزې شته چې له امله يې فوتوولتائيک تکنالوژي نشي کولی په بشپړ ډول پاکه او ارزانه انرژي وړاندې کړي. په همدې برخه کې څېړني پر هغو اغېزمنو فوتوولتائيک وسايلو تمرکز لري لکه څو پيونديزي حجرې، د ګرافين يا منځنۍ انرژي خاليګا لرونکې حجرې او د چاپ وړ لمريز مواد لکه کوانتم ډاټونه(Tsakalakos, 2010). د فوتوولتائيک حجرې اصلي دنده دا ده چې د لمر وړانګې د خالص نور په بڼه جذب کړي او په يو جريان يې بدلې کړي چې د فوتوولتائيک اغېز بلل کېږي، دا انرژي برېښنا ته واړوي. د فوتوولتائيک حجرو د توليد په بهير کې بېلابېل تخنيکونه کارول کېږي، چې پکې د موادو بدلون هم شامل دی، څو د حجرې په مختلفو برخو کې فوتو الکتريک بدلون مؤثريتونه ترلاسه کړي. د نوو غير دوديزو توليدي ميتودونو له راڅرګندېدو سره چې د فعاليت وړ لمريزې حجرې توليدوي، فوتوولتائيک تکنالوژي په څلورو عمده نسلونو وېشل شوې دي چې په ۲ شکل کې ښودل شوي دي(Almosni et al., 2018).

۲ شکل: د لمریزوحجروبیلابیل ډولونه او په دې برخه کې اوسني پرمختګونه (IRENA, 2023).

د فوتوولتائیک حجرو نسلونه اساساً د دې تکنالوژي د پرمختګ مرحلې بیانوي. د لمریزو حجرو له اختراع راهیسې په تېرو څو لسیزو کې دا تکنالوژي په څلورو اصلي کټګوریو یا نسلونوباندې ویشل شوېده، چې د فوتوولتائیک ټکنالوژي د پرمختګ تاریخ بیانوي (Sharma & Mishra, 2025).

۴-۲- دفوتوولتائیک حجرو لومړی نسل

دا کټګوري هغو فوتوولتائیک تکنالوژیو ته اشاره کوي چې د مونوکریستالین او پولي کریستالین سلیکان او د ګالیم آرسنایډ (GaAs) پر بنسټ ولاړې دي په سلیکان ولاړې فوتوولتائیک حجرې د لمریزې انرژي د تخنیکونو هغه لومړنی سکتور و، چې بازار ته وړاندې شو کوم چې د مایکرو

الکترونیک صنعت له لوري د چمتو شوو موادو او تولیدي تجربو څخه ګټه پورته کړه. اوس مهال د سلیکان پر بنسټ جوړې شوې لمریزې حجرې د نړۍ له ٪۸۰ څخه زیات نصبول شوې ظرفیت جوړوي او شاوخوا ٪۹۰ بازار یې نیولی دی. د نسبتاً لوړ مؤثریت له امله دا حجرې تر ټولو زیات کارېدونکې دي.

د فوتوولتائیک حجرو لومړی نسل له هغو موادو څخه جوړ شوي دي چې د سلیکان د ضخیمو کریسټالینو طبقو پر بنسټ ولاړ دي. دا نسل په لاندې ډول حجرې رانغاړي مونوکریسټالین، پولی کریسټالین، ملټي کریسټالین سلیکان او همداراز د III-V کورنۍ یو-پیوندیزی لمریزې حجرې لکه ګالیم آرسنایډ(IRENA2023), (Sharma & Goyal, 2020).

۴-۳- دلومړي نسل فوتوولتائیک حجرو مقایسه

د ذکر شوي نسل فوتوولتائیک حجرو مقایسه په لاندې توګه ترسره کوو:

۴-۳-۱- د مونوکریسټالین سلیکان پر بنسټ لمریزې حجرې

مونوکریسټالین لمریزې حجرې د یو واحد کرسټال له سلیکان څخه جوړېږي ځکه یې جوړښت ډېر منظم او پاک وي. د همدې ځانګړنې له امله د دغو حجرو مؤثریت لوړ وي چې شاوخوا ٪۱۵ تر ٪۲۴ پورې رسېږي. د دوی بانډګیپ شاوخوا 1.1 eV دی چې د لمر د انرژي د اغېزمن جذب لپاره مناسب اندازه ګڼل کېږي. د دغو حجرو د ژوند موده نږدې ۲۵ کاله ده، چې د اوږدې مودې لپاره د ثبات او ښه فعالیت تضمین کوي. د دې ډول حجرو اصلي ګټې په لوړ فعالیت اوږد کاري عمر او د انرژي د تولید په ثبات کې نغښتې دي. سره له دې د تولید لوړ لګښت، د تودوخې لوړې کچې ته حساسیت، د رڼا د جذب ستونزې او د موادو ضایع کېدل یې مهم محدودیتونه دي.

۴-۳-۲- د پولی کریسټالین سلیکان پر بنسټ لمریزې حجرې (P-Si)

پولی کریسټالین لمریزې حجرې د ګڼو کوچنیو سلیکان کرسټالونو له یوځای کېدو جوړېږي. د دوی د جوړښت منظم والی د مونوکریسټالین په اندازه نه وي له همدې امله یې مؤثریت نسبتاً ټیټ وي او د ٪۱۰ تر ٪۱۸ ترمنځ بدلون کوي. د دغو حجرو بانډګیپ شاوخوا 1.7 eV دی. د ژوند موده یې نږدې ۱۴ کاله ده، چې د مونوکریسټالین په پرتله کمه ده. د دوی اصلي ګټې په ساده تولیدي پروسه، ټیټ لګښت، د سلیکان د ضایعاتو په کمولو او د رڼا د جذب نسبي لوړې کچې کې دي. خو د ټیټ مؤثریت او لوړې تودوخې ته د ډېر حساسیت له امله یې کارونې محدودې شوې دي.

۴-۳-۳- د ګالیم آرسنایډ پر بنسټ لمریزې حجرې (GaAs)

د ګالیم آرسنایډ لمریزې حجرې د نیمه‌هادي موادو پر بنسټ جوړېږي او د مؤثریت له نظره د نورو ډولونو په پرتله ډېرې اغېزمنې دي. د دوی مؤثریت نږدې ۲۸٪ تر ۳۰٪ پورې رسېږي، چې د سوداګریزو لمریزې حجرو تر ټولو لوړه کچه ګڼل کېږي. د دوی باندګیپ شاوخوا ۱.۴۳eV دی، چې د لمریز طیف د انرژي د جذب لپاره ډېر مناسب دی. د دغو حجرو د ژوند موده شاوخوا ۱۸ کاله اټکل کېږي. د ګالیم آرسنایډ حجرو اصلي ځانګړتیا په لوړ مؤثریت او د ځانګړو شرایطو لپاره د ښه فعالیت په وړتیا کې ده، خو د تولید لوړ لګښت یې یو مهم خنډ ګڼل کېږي، ځکه له همدې امله د عامې استفادې پرځای زیاتره په ځانګړو برخو لکه فضایي ټیکنالوژۍ کې کارول کېږي. لوړ ثبات د حرارت کم حساسیت، د مونوکریستالین په پرتله غوره جذب او لوړ مؤثریت لري. ډېر زیات لوړ لګښت د لومړي نسل فوتوولتائیک حجرې په اصل کې د p-n الحاق یا یوځای کېدنې پر بنسټ ولاړې دي چې عمدتاً د مونوکریستالین یا پولی‌کریستالین سلیکان په پلیټونو ولاړې لمریزې حجرې پکې شاملې دي.

د مونوکریستالین سلیکان لمریزې حجرې له دې لارې جوړېږي چې له کوچنیو مونوکریستالین سلیکاني ټوټو څخه د سلیکان تختو ته وده ورکړل شي او وروسته دا تختې پرې کړل شي، څو د مونوکریستالین سلیکان پلیټونه جوړ شي. دا ټوټې د Czochralski پروسې په کارولو سره تولیدېږي. مونوکریستالین مواد له دې امله ډېر کارول کېږي چې د څوکریستالین موادو په پرتله لوړ مؤثریت لري.

په مونوکریستالین سلیکان کې اساسي تخنیکي ستونزې دا دي:

- د موادو د پاکوالي لپاره سخت معیارونه.
- د حجرې د تولید پر مهال د موادو لوړ مصرف.
- د تولیدي بهیرونو پېچلتیا.
- د دغو حجرو څخه جوړېدونکو ماډیولونو د اندازې محدودیتونه (Matsuyama, Nakamura, Nishiwaki, Fujita, & Maruyama, Year)
- د څوکریستالین سلیکان تختې ددې پروسې له لارې تولیدېږي چې لوړ پاکوالی لرونکی سلیکان ویلې کېږي او بیا د Directional Solidification په نوم یو لوري ته جامد کېږي چې په یوه لوی کریوسیبل (کڅوړه) کې ترسره کېږي په دې بهیر کې د کریسټال ځانګړې

جهت ټاکل شوې نه وي لکه څنګه چې د zochralski C پروسې کې وي له همدې امله د سلیکان مواد د بېلابېلو جهتونو سره تولیدېږي. د لمریزې حجرې لپاره تر ټولو ډېره کارېدونکې بنسټیزه ماده د بورون سره ناخالص شوې p – ټایپ سلیکان (سبسټریټونه) ښیښې زیر لایې دي. د n - ټایپ سلیکان لاندنۍ لایه هم د لوړمؤثریت لرونکو لمریزې حجرو په جوړولو کې کارول کېږي، خو دوی نورې تخنیکي ستونزې هم لري لکه د p - ټایپ سبسټریټونو په پرتله د سلیکان تختې په اوږدو کې د یوشان ناخالصي ترلاسه کول .(Taguchi, Yano, & Tohoda, 2013)

۵. دوهم نسل لمریزې حجرې

د دوهم نسل لمریز حجرو اصلي هدف د تولید لګښتونه کمول دي، کوم چې د لومړي نسل حجرو لپاره یو لویه ستونزه وه. دا هدف د نازک فلم تکنالوژۍ په کارولو سره ترلاسه کېږي، چې پکې د موادو مقدار کم او کیفیت لوړول یې شامل دي.

۵-۱- آمورف سلیکان لمریزې حجرې

د ډېرزیات کریستالین ټکنالوژۍ ګران تمامېږي ځکه چې په هغوی کې خالص کریستالین سلیکان ډېر کارول کېږي. د خالص سلیکان ترلاسه کول یوه سخته او ګرانه پروسه لري. آمورف لمریز پینلونه د غیر کریستالین سلیکان د یوې طبقې په توګه پر یوه زیر لایه (لکه ښیښه، پلاستیک یا فلز) کېښودل کېږي، چې دا د مونو- یا پولی کریستالین لمریز پینلونو د کلک سلیکان د ډېر زیات کارولو سره توپیر لري. د اموف لمریز پینل د سلیکان طبقه اندازه کولای شي یوازې یو مایکرو میتر وي، چې دا د انسان د ویښتانو له قطر څخه ډېر کوچنی دی. د لمریزو حجرو بیه د دې ډول نازک سلیکان طبقو په کارولو سره کمېدای شي چې یوازې ۱ مایکرو میتر ضخامت ولري.د ډېر زیاتوالي پر بنسټ تیکنالوژۍ په پرتله د نازک فلم ټکنالوژۍ خورا لږ مقدار سلیکان کاروي.د a-Si نازک فلم جوړولو لومړنۍ هڅه د R. Chittick لخوا شوې وه ,Lin & Ravindra) .(Ghosh & Yadav, 2021) 2020), د a-Si نازک فلم لمریزې حجرې د دې له امله چې په ټیټه بیه بریښنا تولیدوي او لږ سلیکان کاروي د فوتوولتائیک څېړونکو پام ځانته راګرځولی دی (Ahamed, Gupta, Qamruzzaman, & Matin, 2019).

a-Si (امورف سلیکان) د کریستالین پر بنسټ لمریز پینلونو په پرتله د مقاومت د تودوخې غوره ضریب لري او د نورو نازک فلم لرونکو حجرو په پرتله د سیوري پر وړاندې ښه مقاومت ښیي. په

يوه عادي PN تړون لرونکي لمریز حجره کې د فوتون جذب له امله د اقليت انتقالونکې توليد کېږي چې دغه انتقالونکي د P او N سيمو په اوږدو کې د تړون له يوې پايلې څخه تر بلې پورې خپرېږي هلته چې نوري جذب پيښيږي. دخپريدلو پروسه د لويو اوږدو ليونو په شتون کې ترسره کيږي چې معمولا شـــاوخوا ۲۰۰مايکروميتروي. خو په يوه a-Si لمريز حجره کې د لږکي چارج کونکو difusion اوږدوالی ډېر محدود وي، شـــاوخوا ۰.۱مايکرومتر اندازه لري. له همدې امله يوازې د نفوذ يا خپريدو په مرســـته د لږ چارج کونکي را يوځای کيدنه ناشـــوني کيږي (Li, Aierken,Liu,Zhuang,etal.,2021).

د حجرو د تودوخې له زياتيدو سره د اغېزمنتيا کموالی نســبتاً لږ دی، چې دا د a-Si حجرو د ټيټ بريښــنا د تودوخې ضريب (۰.۱-۰.۲٪ فيصـده پر يوه درجه ســانتي ګراد وي) له دې امله د نازک فلم ټکنالوژي د څو الحاقونه ، هيټرو پيوند او هموپيوند لمريزو حجرو په جوړولو کې هم کارول کيږي. د نازک فلم لمريزې حجرې ټکنالوژي زياتې ګټې لري چې مخکښيو څېړنو لخوا ښــودل شوي دي(Efaz, Rahman, et al., 2021).

د موادو لږ اســتعمال د انرژي د بيرته ورکولو وخت کمښــت لږ پاتې شــوني فا ضله مواد د يوځای کولو وړتيا او په يوه واحد کې مدغم کېدل د لويې ســـطحې لرونکو واحدونو کارول د ښـــه تطابق لپاره د موادو ځانګړتياوو بدلول د ماډيولونو دننه د فضـــا د کاروني ښـــه ترتيب دټيټ حرارت په ځانګړتياوو سره د پروسو پلي کول د شفافو واحدونو جوړول ممکن دي.

د پورتنيو واردو له امله دا ټکنالوژي زياته جذابه دی خو د هغې اغېزمنتيا له ۱۰٪ څخه تر ۱۳٪ پورې ده چې نسبتاً ټيټه ده(Wu et al., 2020).

۵-۲- د دويم نسل فوتوولتائيک حجرو مقايسه

۵-۲-۱- د اموروف سليکان پر بنسټ لمريزې حجرې(Amorphous Silicon Solar Cells, a-Si):

اموروف سليکان د لمريزې حجرو هغه ډول دی چې کرستالي جوړښت نه لري او د غير منظم جوړښت له امله يې توليدي لګښت ټيټ وي. د دغو حجرو مؤثريت د ۵٪ تر ۱۲٪ پورې رسېږي او د بانډګيپ اندازه يې شاوخوا 1.7 eV دی. د عمر اوږدوالی نږدې ۱۵ کاله اټکل کېږي. د دې ډول حجرو اصلي ګټې ټيټه بيه، د موادو په پراخه شتون، د زهريت نشتوالي او د نور د جذب په لوړ ضريب کې نغښتي دي. سره له دې د ټيټ مؤثريت ، د ګډېدونکي موادو د ټاکلو ستونزه د اقليت

بار وړونکو د ژوند کمښت او د اوږدمهاله ثبات نشتوالی یې مهم محدودیتونه ګڼل کېږي ,(Kowalski et al., 2005)(اذرم، ۱۹۹۶).

۵-۲-۲- د کادمیم ټیلوراید/کادمیم سلفاید پر بنسټ لمریزې حجرې (Cadmium Telluride / Cadmium Sulfide Solar Cells, CdTe/CdS)

دغه ډول لمریزې حجرې د ۱۵٪ تر ۱۶٪ پورې مؤثریت لري او د (بانډګیپ) دانرژی ممنوعه ساحی اندازه یې شاوخوا 1.45 eV دی. د ژوند موده یې نږدې ۲۰ کاله ده. د دې حجرو مهمه ګټه د رڼا د جذب لوړ ظرفیت دی، ځکه لږ ضخامت هم د کافي انرژي د تولید لپاره بسنه کوي. د تولید لپاره یې د موادو لږ اړتیا دا ډول حجرې اقتصادي ګرځوي. سره له دې د کادمیم ډېر زهري کېدل د ټیلوریم کموالی او د تودوخې لوړې کچې پر وړاندې د حجرو حساسیت د دوی له اصلي ستونزو څخه دي. د همدې دلیل له امله که څه هم اقتصادي دي، خو د چاپېریال د ککړتیا اندېښنې یې د پراخ استعمال مخه نیسي(Zhao et al., 2022), (Kuczyńska-Łażewska et al., 2021) .

۵-۲-۳- د مس-انډیم-ګالیم-سیلینایډ پر بنسټ لمریزې حجرې (Copper Indium Gallium Selenide Solar Cells, CIGS)

CIGS لمریزې حجرې د نیمه‌هادي مرکبونو پر بنسټ جوړېږي او د لوړ مؤثریت له امله ډېرې ارزښتمنې ګڼل کېږي. د دوی مؤثریت نږدې ۲۰٪ دی، چې د نری‌فلم لمریزې تکنالوژي په ډله کې لوړه اندازه ښئ. د بانډګیپ اندازه یې شاوخوا 1.7 eVدی او د ژوند موده نږدې ۱۲ کاله اټکل کېږي. د دې حجرو مهمه ګټه دا ده چې د تولید لپاره لږ موادو ته اړتیا لري، چې د لګښت په برخه کې یو نسبي امتیاز ګڼل کېږي. خو د لوړې بیې، ناپایدارتیا د تودوخې پر وړاندې د لوړ حساسیت ستونزې د دې ټیکنالوژۍ د عملي پراختیا لپاره لوی خنډونه دي(Crabtree & Lewis, 2018).

٦. دریم نسل لمریزې حجرې

لمریزو حجرو د خپلو فعالیتونو د ښه کولو لپاره درې دورې پرمختګونه کړي دي څو د لمر نور په اخیستلو کې اغیزمنتیا لوړه کړي. د اقتصادي ګټې د زیاتولو لپاره څېړونکي اوس مهال د فوتوولټاییک (PV) په مختلفو برخو په پرمختګ باندې تمرکز کوي لکه څو-پیوندیزې لمریزې حجرې، متوسط انرژي تشه حجرې، پروسکایټ مواد، متمرکز شوي لمریز حجرې او چاپیدونکې لمریزې حجرې لکه کوانتم ټکې. دریم نسل PV حجرې ټکنالوجي داسې واحد پیوند لمریزې حجرې رانغاړي چې د شاکلي-کوایسر حد (۳۱٪–۴۱) څخه د بریښنا فعالیت لوړولو وړتیا لري. د

فعالیت د ښه کولو لپاره ضروري ده چې په لمریزه حجره باندي لګیدونکي نور ټول فوتونونه جذب کړي. د دې ستونزې حل د یواځې دیوي لمریزې حجرې په توان کې نه دی. له همدې امله څو پیوندیزي لمریزه حجري د دې ستونزې لپاره یو احتمالي حل ګڼل کیږي. په عمومي ډول دریم نسل لمریزې حجرې په لاندي ډول وېشل کیږي:

۱ .څو پیوندیزي لمریزه حجره(Multiple Junction Solar Cell - MJSC)

۲ .کوانټم نقطه لمریزې حجرې(Quantum Dot Solar Cells - QDSC)

۳ .په رنګ حساس شوي لمریزې حجرې(Dye-Sensitized Solar Cells - DSCC)

۴ .پروسکایټ لمریزې حجرې(Perovskite Solar Cell - PSC)

۵ .متمرکز شوې فوتوولتاییک(Concentrated PV - CPV)

٦-۱- دریم نسل فوتوولتائیک حجرې:

د لمریزو حجرو دریم نسل چې پکې ټنډیم، پیرووسکایټ، د رنګ حساسه شوي(DSSC)، ارګانیکي او نورې نوې طرحې شاملې دي بېلابېل تخنیکونه او مفکورې رانغاړي. دا تخنیکونه له ارزانه، خو ټیټ مؤثریت لرونکو سیستمونو لکه DSSC او ارګانیکي حجرې څخه نیولي تر هغو ګران بیو خو لوړ مؤثریت لرونکو سیستمونو پورې رسیږي لکه III-V څو پیوندیزي حجرې چې په فضایي برخو کې کارول کیږي. دریم نسل حجرې ډېر وخت د نوې مفکورې بلل کېږي، ځکه چې که څه هم پر ځینو یې له ۲۵ کلونو زیاتې څېړنې رواني دي خو بیا هم بازار ته یې محدود لاسرسی شوی دی(IRENA, 2023).

په سلیکاني لمریزو حجرو کې تازه پرمختګونه د نیمه هادي موادو د انرژی تشه کې د اضافي انرژي کچو رامنځته کولو طریقې ته متوجه شوي دي. تولیدي تکنالوژي او مؤثریت ښه والي نوې څېړنې همدا اوس په دریم نسل لمریزو حجرو ته متمرکزې دي.

اوس مهال یو له نوو طریقو څخه د فوتوولتائیک حجرو د مؤثریت لوړولو لپاره د نیمه هادي موادو په (بانډګیپ) دانرژی خالي ساحه کې د اضافي انرژي اندازه (IBSC) او IPV حجرې معرفي کول دي او د تولید په پروسه کې د آیون ځای پرځای زیات کارول دي. نور نوښتګرخولې پیژندل شوي تجارتي "راټوکېدونکي" تخنیکونه یې په لاندي ډول دي(IRENA 2023).

٦-۲- په رنگ حساسه شوې فوتوولتائيک حجرې(DSSC) :

ددې لمريزو حجرو مؤثريت: ٪۵ – ٪۲۰ دی . دېرمختللو تکنالوژيو څخه شميرل کيږي .گټې يې ټيټه بيه، د کم نور او پراخي زاويې سره کار کول د تودوخې په ټيټه اندازه کار کول، کلکوالی او اوږد عمرلري.همدارنگه محدوديتونه يې د تودوخې د ثبات ستونزې، زهرجن اوپه بخار بدليدونکي مواد دي .

٦-۳- د کوانټم ډاټ فوتوولتائيک حجرې(QD)

ددې لمريزو حجرو مؤثريت: ٪۱۱ – ٪۱۷او گټې يې د توليد ټيټه بيه، ټيټه انرژي مصرف ، انعطاف منونکی اود نور زيات جذب لرونکې دي. په همدې ډول ددې حجرو محدوديتونه زرجن طبيعت، تخريب چې تر اوسه دڅيړنو او ازمايښتي حالت کې قرار لري(Rehman, Syed, et al., 2023) .

٦-۴- عضوي او پوليمريک لمريزې حجرې:(OSC)

دا د دريم نسل لمريزو حجرو څخه دي چې مؤثريت يې ٪۹ - ٪۱۱ دی . گټې يې د ټيټې پروسس لگښت، سپک وزن، انعطاف، حرارتي ثبات چې تر ۸۵ درجې دسانتي گراد پوري خپل لومړنی موثرئت ساتلو توان لری، محدوديتونه يې د ټيټ مؤثريت لرونکې دي(Wuet al., 2020) .(Rehman, Syed, et al., 2023)

٦-۵- پيرووسکايټ لمريزې حجرې:

د نن ورځ په نړۍ کې تر ټولو چټک پرمختگ کوونکې حجری دي چې مؤثريت: ٪۲۱ دی.گټې يې ټيټه بيه، ساده جوړښت، سپک وزن، انعطاف، لوړ مؤثريت ، ټيټ توليدي لگښت همدارنگه محدوديت يې بې ثباتې دی. عمر يې تراوسه ندی ټاکل شوی . نوموړي لمريزې حجرې ددې نسل تر ټولو مهمه او ښه تکنالوژې دی(Wuet al., 2020 Rehman, Syed, et al., 2023).

٦-٦- څو پيونديزې لمريزې حجرې:

دا لمريزې حجرې پراخه اندازه نور جذبوي مؤثريت يې ٪۳٦ يا زيات دی چې فضايې تکنالوژې کې استفاده کيږي څکه د کمې ساحی څخه زياته بريښنا توليدوي، لوړ فعاليت مگر څينې محدوديتونه هم لري چې پيچلې تکنالوژې او گرانې دي.

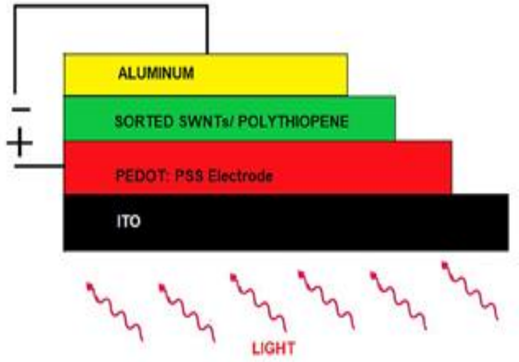
۷. څلورم نسل لمريزو حجرو ټکنالوژي

د "هايبريد غيرعضوي حجرو" اصطلاح اکثره د څلورم نسل فوتوولټائيک حجرو لپاره کارول کېږي. دغه حجرې د دې وړتيا لري چې د پوليمرنری فلمونو د ټيټ لګښت او تطبيق وړتيا د عضوي نانو جوړښتونو لکه فلزي نانوذراتو، فلزي آکسايډونو، کاربن نانوټيوبونو، ګرافين او د څو فعاليتي سيستمونو پر اساس جوړشوي دی. دغه نانوفوتوولټائيک برخې کولای شي د شمسي ټکنالوژي لپاره يو نوي هيلهبښونکي دوره راولي (Wuet al., 2020), (Mamgai et al., 2012).

۷-۱- د کاربن نانوټيوب پربنسټ لمريزي دوه بعدي حجرې:

د دوهبعدي موادو لکه موليبدينم ډای سلفايډ(MoS_2) ، ګرافين، ټنګستين ډای سلفايډ(WS2) او ټنګستين ډای سيلينايډ (WSe2) استثنايي نوري ځانګړتياوې، کوچني قطرونه او ټيټ وزن د څلورم نسل فوتوولټائيک ټکنالوژي په برخه کې ډېر پام ځانته اړولی دی. د دې دوهبعدي موادو ميخانيکي قوت، د بانډګيپ تنظيمېدونکي وړتيا، شفافيت، ښه تودوخه او برېښنايي هدايت، لوړ چارج انتقال وړتيا؛ د کوانټوم هال اغېزه او مقناطيسي انيزوټروپي(anisotropy) پېژندل شوي ځانګړتياوې دي (Rehman, Syed, et al., 2023), (Hasan et al., 2018).

د خپلو غوره نوري او برېښنايي ځانګړتياوو له امله کاربن نانوټيوبونه(CNTs) د شمسي حجرو په جوړولو کې ډېر هيلهبښونکي مواد ګرځېدلي دي. CNTs معمولاً په شمسي حجرو کې د نازکو فلمونو په توګه يا د فعالو طبقو په منځ کې کارول کېږي چې د چارج انتقال طبقې يا د الکترود د انترفېس طبقې په توګه د چارج د استخراج لپاره مرسته کوي (Wieland, Li, Rust, Chen, & Flavel, 2021), (Wang et al., 2017).



۳ شکل: د کاربن نانوټيوب پر بنسټ شمسي حجرې جوړښت.

۸. یو واحد دیواله کاربن نانوټیوب(SWCNT):

په دې انځور کې د هادي الکترودونه عموماً د انډیم ټین اکساید (ITO) پوښل شوي وي، چې بیا پرې د ۴۰ نانومیتر نری فرعي طبقه د پولی(۳,۴-ایتیلین ډای اوکسي تیوفین) (PEDOT) او پولی(ستایرین سلفونیت)(PSS) څخه جوړه شوي وي. PEDOT او PSS د ITO سطحې نرمښت لوړوي، چې له امله یې د خالیګاوو(pinholes) شمېر کمېږي او د جریان د لیکېدو د مخنیوي لپاره د شارټ کیدونکو لارو ستونزه حل کېږي (Abohamzeh, Sheikholeslami, Al Hajaj, & Saghir, 2021).

کاربن نانوټیوبونه (CNTs) د مختلفو ډولونو شمسي حجرو کې کارېدلی شي لکه د سلیکان شمسي حجرې، رنګ حس کوونکي شمسي حجرې، عضوي شمسي حجرې او پیرووسکایټ شمسي حجرې چې دا د فعالي طبقې د موادو پر اساس تاکل کېږي (Qian, Xie, Zhang, & Zhang, 2020) (Liang, Li, Ye, & Zhu, 2023) (Jiang, Zheng, Qin,). یو تجربه ترسره کړه ترڅو د CNTs- spiroطبقې د شاملولو اغېز د رنګ لرونکو کاربن پر بنسټ PSCs په انرژي بدلون مؤثریت (PCE)باندې و ارزوي. څېړونکو موندلې چې د CNTs-spiro طبقې لرونکي PSCs مؤثریت ۱۰.۴۵٪ ؤ، چې د دې طبقې پرته PSCs په پرتله (۸.۶۲٪) کې ۱۷.۵۱٪ زیاتوالی ښیي.

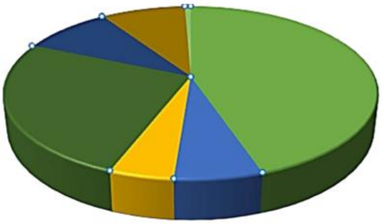
(Zhao, Xu, Wu, et al., 2022) د TiO_2 پوښلو او HNO_3 یوځای کولو ترکیب استعمال کړ ترڅو د شمسي حجرو مؤثریت له ۱۸٪ څخه لوړ کړي، چې د فعاله ساحې ۰.۰۹ سانتي‌متره مربع لاندې او د هوا د کچې ۱.۵ او د ۱۰۰ mW/cm^2 وړانګې کثافت د معیاري شرایطو لاندې ترسره شو. د آکسایډ پیاوړو شویو کاربن نانوټیوب-سلیکان شمسي حجرو یوځای کول د راتلونکي پرمختللي سلیکان پر بنسټ PV سیستمونو د جوړولو لپاره یوه ژمنه‌بښونکې لاره ده. دغه حجرې د دودیزو نیمه هادیو او نوي نانوجوړښتونو ګټې یو ځای کوي، چې د لوړ فعالیت لرونکو فوتوولټائیکس ټکنالوژیو ترلاسه کولو لپاره یو ممکنه لار برابروي.

د ټری فلیک اسید مخلوط شوي CNTs د پیروسکایټ شمسي حجرو کې د شفافو الکترودونو په توګه د خپلو فلزي سیالانو په پرتله غوره فعالیت ښیي چې د ۱۸.۸٪ PCE ترلاسه کولو سره یې دا ثابته کړې (Jeon, Shawky, et al., 2020).

۹. د لمریزو حجرو د بیلابیلو نسلونو پرتله

د فوتوولتائیک(PV) لمریزو حجرو مؤثریت یا حاصل ورکونه د موادو او جوړښت د بدلون له لارې د بیلابیلو تکنالوژیو په مرسته لوړېدای شي. د نوو موادو کارول دا هدف لري چې د رڼا د حس کوونې وړتیا، د چارج انتقالونکي ذراتو تولید، د سپک طیف جذب، انعطاف‌پذیري او اوږدمهاله پاېښت لوړ کړي او په عین حال کې د تخریب کچه، انرژي ضایعات د تولید لګښتونه راکم کړي. یو بل مهم اړخ د چاپېریال سره د دوستانه موادو کارول دي.

په راتلونکي کې تمه ده چې د نوښتګرو لمریزو تکنالوژیو بازار ته پراخې ونډې پیدا کړي. ۴ شکل د ۲۰۳۰ کال لپاره د مختلفو لمریزو PV ماډیولونو د تکنالوژیو له مخې وړاندې شوی ویش ښیي. تر ۲۰۳۰ کال پورې به د کرستالین سیلیکان ونډه له ٪۹۰ څخه ٪۷۰.۴ ته راټیټه شي (Pastuszak & Węgierek, 2022), (Bahaidarah et al., 2013).



۴ شکل: د فیصدي په اساس د لمریزو حجرو تولید.

د سیلیکان پر بنسټ(C-Si) ، ٪ ۴۴.۸۰) په کې شامل دي:

مونو، پولي او(a-Si کریستالاین سیلیکان) پرمختللي(c-si٪ ۲۵.۶۰)، د CIGS بدیلونه، درانه فلزات لکه پرووسکایټ، پرمختللي III-V، ٪ ۹.۲۰، عضوي Dye-sensitised/ PV حجرې(OPV)، ٪۸.۷۰، د مسو ـ انډیم ـ ګالیوم (ډای) سیلینایډ پر بنسټ نری فلم(CIGS)، ٪ ۶.۴۰ ، د کاډمیم ټیلوراېډ پر بنسټ نری فلم(CdTe)، ٪ ۴.۷۰، د لمر تمرکزي لمریز بریښنا(CPV) ، ٪۰.۶۰.

۲ جدول د لمریزو حجرو د پرله‌پسې نسلونو ترمنځ د مؤثریت، لګښت، انرژي ممنوعه ساحی، د لوړو تودوخو لاندې فعالیت د موادو د استفادې او نورو ګټو او زیانونو له اړخه یو پراخه تحلیلي پرتله وړاندې کوي.

۱۰. دلمریزو حجرو دنسلونو ترمنځ مقایسوي جدولونه:

۲ جدول د فوتوولتائیک حجرو د پرلپسي نسلونو ترمنځ هر اړخیز مقایسوي تحلیلي جدول

نسل	کاربدونکي مواد	نیمګړتیاوي	ګټې	د تودوخي فعالیه	باندګیپ (eV)	بیه/لګښت	مؤثریت (%)	د حجرې ډول
لومړی نسل	مونوکریستالین سیلیکان	لوړ لګښت، ضایعات	لوړ مؤثریت ، پراخ شتون	۱۰–۱۵٪ کمښت	۱۱.۱	د pc په پرتله ګراني	۲۰–۲۲	مونوکریستالین (mc)لمریز حجرې
لومړی نسل	پولی‌کریستالین سیلیکان	کم مؤثریت ، زیات ځای	ارزانه، ثبات، ټیټ زهریت	۲۰٪ کمښت	۱۲.۱	د mc په پرتله ارزانه	۱۵–۱۷	پولی‌کریستالین (pc)لمریز حجرې
دویم نسل	اموروف سیلیکان	کم مؤثریت	لږ مواد، انعطاف	کم بدلون	۷.۱	ارزانه	۱۰–۱۲	اموروف سیلیکان (a-Si) لمریز حجره
دویم نسل	کیډمیم، تیلوراید	زهریت، کم مؤثریت	ټیټه بیه، لوړ جذب	چټک کمښت	۵.۱	ارزانه	۶.۱۸	کیډمیم تیلوراید (CdTe)
دویم نسل	مس، اندیم، ګالیم، سیلیناید	ګران، زهري	لوړ جذب، ښدیم امکان	ثابت مؤثریت	۵۵.۱	ارزانه	۸.۲۰–۳.۲۲	مس اندیم ګالیم سیلیناید (CIGS)
دویم نسل	مس، زینک، ټین، سلفاید	کم مؤثریت	لوړ جذب، ښه ثبات	کمېږي، جریان زیات	۴.۱	ارزانه	۱۰	مس زینک ټین سلفاید(CZTS)
دریم نسل	ګالیم اندیم فاسفاید، اندیم ګالیم آرسناید	پیچلتیا، لوړ لګښت	لوړ مؤثریت	کم حساسیت	۶۷.۰–۸۸.۱	ډېر ګران	۳۴–۱.۴۷	څو-جنکشن لمریز حجرې (MJSC)

۱۱. دویمه برخه: د درېیم او څلورم نسل فوتوولټائیک حجرو مقایسوي تحلیل

جدول: د درېیم او څلورم نسل شمسي حجرو پرتلیز تحلیل

نسل	کاربدونکي مواد	نیمګړتیاوي	ګټې	د تودوخي فعالیه	باندګیپ (eV)	بیه / لګښت	مؤثریت (%)	د حجرې ډول
درېیم نسل	CdS، CdSe، PbS، PbSe، Ag2S	شدید زهریت، چاپېریال ته خطرناک	لوړ جذب، باندګیپ تنظیمېدونکی، سپک	په زیاتېدونکي تودوخي سره دوامداره کمښت	۳.۱–۵.۲	ټیټ لګښت	۱۰–۱۵	کوانتم ډاټ لمریزي حجرې (QDSC)

دریيم نسل	TiO2، Redox couple، TCO	زهري الکترولایت، ټیټ مؤثریت ، د تودوخي او رطوبت پر وړاندي حساس	په کم نور کې کار کوي، ارزانه مواد، اسانه تولید، انعطاف	په زیاتېدونکي تودوخي سره دوامدار کمښت	۳.۱–۲.۲	د موادو او تولید ټیټ لګښت	۱۳	د رنګ حساسه لمریزي حجري (DSCC)
دریيم نسل	Cs^+، Cl،Pb^{2+}	د پراخي کاروني لپاره بې ثباته	ټیټه بیه، اسانه تولید، لوړ جذب، باندګیپ تنظیمېدونکی	په زیاتېدونکي تودوخي سره کمېږي	۵.۱–۳.۲	د دوديزو حجرو له نیمایي ارزانه	۲۲–۲۵	پیرووسکایټ لمریزي حجري (PSC)
دریيم نسل	GaAs، CdTe، CIGS، شیشه	لوړ ناکامی کچه، زهریت، PCE	لوړ مؤثریت ، کوچنی سطح، چاپېریال ته دوستانه	په لوړو تودوخو کې کمزوری فعالیت	۴.۱–۵.۱	ټیټ لګښت	۷–۲۵	متمرکز فوتوولټائيکس (CPV)
څلورم نسل	WO_3، MoS_2، TiO_2	ټیټ مؤثریت ، کم بدلون اغېزمنتیا	ثبات، ډېر نري، انعطافپذیر، پراخ جذب، باندګیپ تنظیمېدونکی	په زیاتېدونکي تودوخي سره کمېږي	۳.۰–۷.۲	ټیټ لګښت	۷–۸.۱۸	کاربن نانوتیوب لمریزي حجري (CNT)
څلورم نسل	ګرافین	کم ثبات، کم مؤثریت	ډېر اړخيز، اقتصادي، لوړ جذب، انعطافپذیر، سپک، شفاف	په زیاتېدونکي تودوخي سره کمېږي	۴۲.۱	لوړ لګښت	۱۲–۶۵.۱۸	ګرافین لمریزي حجري

۱۲. برېښنايي او نوري ځانګړتیاوې

په۳ دریيم جدول کې د هغو مختلفو جذبوونکو موادو برېښنايي او نوري ځانګړتیاوې ښودل شوي چې د فوتوولټائيک لمریزو حجرو په جوړښت کې کارول کېږي. دا مواد لکه پیروسکایټ، کوانټم ټکي په رنګ‌حساس مرکبات، ګرافین او د کاربن تیوبونو، د دې لپاره کارول کېږي چې د حجرو مؤثریت له اوسني حد څخه پورته یوسي.

دغه پرمختللي مواد داسې ځانګړتیاوې لري چې د حجرو فعالیت ته وده ورکوي؛ په شمول د انرژۍ تشه، د نور د جذب ضریب، د چارج انتقالونکو ذراتو حرکت، د لمریزي حجري اعظمي توان یا ډکوالي فکتور، د بیا یوځای کېدو اندازه، د انکسار ضریب او نور تخنیکي خواص. یعني دا ټولې ځانګړتیاوې یو ځای د دې باعث کېږي چې لمریزې حجرې لا مؤثرې، چټکې او د انرژۍ په تولید کې ډېرې باوري شي.

۳ جدول: د فوتوولتائیک لمریزو حجرو د موادو الکترونیکي او نوري ځانګړتیاوې

ځانګړتیا	کاربن نانوټیوبونه (CNT)	ګرافین	CIGS لمریزي حجرې	CdTe لمریزي حجرې	پروفوسکایټ لمریزي حجرې	کریسټالین سیلیکان (c-Si)
الکترونیکي ځانګړتیاوې						
د بانډګیپ انرژي	0.3–2.7 eV	0 eV	1.55 eV	1.5 eV	1.5 – 2.3 eV	1.1 eV
د بار وړونکو خوځښت	~100,000 $cm^2/V\cdot s$	~200,000 $cm^2/V\cdot s$	~100–300 $cm^2/V\cdot s$	~320 $cm^2/V\cdot s$ (الکترونونه)	~10–30 $cm^2/V\cdot s$	~1350 $cm^2/V\cdot s$ (الکترونونه)
د بار وړونکو عمر	~100 ps–1 ns	~1 fs	~1–10 ns	~2–10 ns	~1 µs	~1–10 ms
د بار وړونکو خپرېدو واټن	~100 nm–1 µm	~1–5 µm	~1–5 µm	~1–5 µm	~1 µm	~100–300 µm
د خلاص سرکټ ولتاژ	0.6–0.9 V	0.7–1.0 V	~0.7–0.8 V	~0.85 V	1.0–1.2 V	0.6–0.7 V
ډکوالي فکتور (FF)	0.6–0.8	0.6–0.85	0.7–0.8	0.7–0.8	0.75–0.85	0.75–0.85
د بیا یوځای کېدو کچه	منځنۍ	ډېره ټیټه	منځنۍ	منځنۍ	منځنۍ	ټیټه
نوري ځانګړتیاوې						
د جذب ضریب	~10^5 cm^{-1}	~10^5 cm^{-1}	~10^5 cm^{-1}	~10^5 cm^{-1}	10^4–10^5 cm^{-1}	~10^4 cm^{-1} په 1.1 µm کې
د جذب ساحه	200–1800 nm	200–2500 nm	300–1200 nm	400–860 nm	300–850 nm	300–1100 nm
انعکاسي ضریب	1.4–1.9	~2.6	~2.4	~2.7	~2.3	~3.4
رڼا بندول	د سطحي پلازمون ریزونانس	شفاف الکترودونه د پلازمونیک اغېزو سره	سطحي جوړښت د اغېزمنتیا لپاره	د نری فلم له لارې رڼا بندول	د پرتونو سره د رڼا بندول	سطحي جوړښت د انعکاس کمولو لپاره
د فوتولومینسانس اغېزمنتیا	لوړه	ټیټه	منځنۍ	منځنۍ	لوړه	ټیټه

۱۳. بحث او مناقشه

فوتوولتائیک (PV) ټکنالوژي د نوی کیدونکو انرژیو تر ټولو مهمه او مخکښه سرچینه ګڼل کېږي، ځکه چې دا د انرژي د زیاتېدونکي تقاضا پوره کولو، د فوسیلي سون‌توکو پر تکیې د کمولو او د نړیوال اقلیم د بدلون د راکمولو په برخه کې بنسټیز رول لري. وروستي پرمختګونه د دې سبب شوي چې لمریزې حجرې د لوړ حاصل، ټیټ لګښت، لږ وزن، ښه ثبات او د چاپېریالي خوندیتوب له ځانګړتیاوو سره وده وکړي. څېړنې ښیي چې د PV ټکنالوژي د نسلونو پرمختګ د موادو په انتخاب،د جوړښت په میتودونو، او د فوتوالکتریک حاصل په کچه پورې تړلي ده. لومړی نسل د سیلیکان حجرو پر بنسټ باندې ولاړ دی، چې د حاصل په برخه کې د پام وړ لاسته راوړنې لري او لا هم د نړیوال بازار ډېره برخه نیسي. دوهم نسل د نري فلم تکنالوژي کاروي، چې د موادو لږ مصرف او د تولید ټیټ لګښت یې ځانګړنه ده، خو د حاصل کچه یې د سیلیکان حجرو په پرتله محدوده ده. دریېم نسل د نوښتګرو مفکورو پر بنسټ ولاړ دی لکه عضوي مواد، پیروفسکایټ، کوانټم ډاټ، رنګ-حساس حجرې او د څوطبقي جوړښتونه، چې د لوړ حاصل او انعطاف وړ کارونې په برخه کې سترې هیلې زېږوي. څلورم نسل بیا د ګرافین او نورو پرمختللو نانوموادو پر بنسټ دي، چې د پخوانیو نیمګړتیاوو د اصلاح ترڅنګ د انعطاف وړ وسایلو، BIPV سیستمونو وړ ټکنالوژیو لپاره عملي حل لاري وړاندې کوي.

سره له دې چې د مونوسیلېکان حجرو اعظمي حاصل نږدې ۲۶.۶٪ ته رسېدلی او لا هم په نړیوال بازار کې د پام وړ سیالي لري، خو د نوو جوړښتونو لکه څوطبقو لرونکو حجرو څېړنې ښیي چې د لا لوړ مؤثریت ترلاسه کولو امکان شته، که څه هم د تولید لوړ لګښت او پېچلتیا یې د تجارتي کېدو مخه نیسي. نانوتکنالوژي په دې برخه کې ځانګړې ونډه لري، ځکه چې د نانو موادو ځانګړې فزیکي او الکترونیکي ځانګړتیاوې کولای شي د اوسنیو محدودیتونو مخه ونیسي او د لمریزې انرژي په تولید کې بنسټیز بدلون راولي. د موادو طبیعي تجزیه کیدونکې ځانګړتیا، د چاپېریال سره همغږي، او د تولید بهیرونو ساده کول هغه فکتورونه دي چې د راتلونکي لپاره به د PV تکنالوژي عملي او اقتصادي پراختیا تضمین کړي. دلته دریېم نسل لمریزي حجرې نسبت نورو نسلونو ته د تجارت له نظره او د الکترونیکي اپتیکي ځانګړتیاوو او ضریبونو په پرتله ترټولو بهترین نسل دي.

په ټوله کې ویلای شو چې د فوتوولتائیک تکنالوژي راتلونکی د نیمه هادي موادو د اصلاح، د نوي نانوموادو د کارونې او د تولید بهیرونو په معیاري کولو پورې تړلی دی. هر نسل ځانګړې ګټې او محدودیتونه لري، نو د انتخاب پر مهال باید د اړتیاوو او امکاناتو پر بنسټ پرېکړه وشي. دریېم او څلورم نسل تر ټولو زیاتې هیلې بښونکې دي، ځکه چې د لوړو حاصلونو او نوې کارونې ساحو لپاره ستر پوتنشل لري، خو د بشپړ تجارتي کولو لپاره لا زیاتې څېړنې او پرمختګ ته اړتیا شته. له

همدې امله فوتوولتائیک ټکنالوژي نه یوازې د نوي کیدونکو انرژیو تر ټولو ستره لاسته راوړنه ده، بلکې د نړیوالې انرژي امنیت او د اقلیم د بدلون پر وړاندې د مبارزې یوه بنسټیزه حل لاره هم ګڼل کیږي. ددې څیړنې څخه دې نتیجې ته رسیږو چې تر ټولو نسلونو څلورم نسل لوړ نظري موثریت لري مګر عملي تطبیق یې محدود او زیاتو تجربو ته ضرورت لري. د تولید د لګښت په اساس دویم او دریم نسل مناسب دی. لومړي نسل د اوسني وخت په تجارتي بازار کې تر ټولو ډیر کاریدونکې او زیات دوام لرونکي دي مګر د لګښت له نظره ګراني دي.

مجموعي مقایسوي جدول (د مقالې د جدولونو په اساس)

ځانګړتیاوې	۱م نسل (c-Si)	۲م نسل (CdTe, CIGS, a-Si)	۳م نسل (III-V, MJSC, PSC, DSSC, QDSC, CPV)	۴م نسل (CNT, Graphene, هایبرډ)
بانډګیپ	ثابت ۱,۱ eV	نږدې مثالي ۱,۵–۱,۶ eV	څو بانډګیپ، تنظیمېدونکی	پراخ او تنظیمېدونکی
ضخامت	۱۰۰-۳۰۰μm	۱-۵μm	۱۰۰nm–چند μm	۱ μm۱۰۰–nm
اعظمي موثریت	~۲۵٪	~۲۳٪	تر ۴۷٪ پورې	≤۲۵٪ هدف، خوناسم ثبات
لګښت/بازار	ټیټ لګښت، بازار کې ډیري دي.	ټیټ مواد، خود موادو محدودیت	ډیر لوړلګښت، ځانګړي کارونه	لا څېړنیز، صنعتي ثبات کم
BIPV او انعطاف	محدود	ښه (باریک، سپک)	PSC/ارګانیک کې ښه	ډیر لوړپوتنسیال

۱۴. وړاندیزونه

١. ډیره ضروري ده چې په دریم او څلورم نسل فوتوولتائیک حجرو تمرکز وشي، ځکه چې دا تیکنالوژي لوړ مؤثریت، ټیټ تولیدي لګښت او د چاپېریال لپاره لږ خطر لري.

٢. باید د پیروسکایټ او هایبریډ حجرو د ثبات ستونزو حل ته لومړیتوب ورکړل شي، څو د بازار لپاره مناسبې شي.

٣. د لمریزې انرژي د محلي تولید د هڅولو لپاره د حکومتونو پالیسۍ باید پانګوالو ته اسانتیاوې برابرې کړي.

٤. پرمخ تللي هېوادونه دې د هغو سیمو له پاره چې بریښنا نه لري د لمریزي انرژي سیستمونه پراخ کړي.

۵. د تخنيکي روزنې او پوهاوي پروګرامونه دې رامنځته شي ترڅو د لمريزې انرژي د سيسټمونو ساتنه او مديريت مؤثر شي.

ماخذونه

برهان آذرم. (۱۳۹۶). نسل های مختلف سلول های خورشیدی ومکانیسم عملکرد آن ها. نشریه مباحث برگزیده در انرژي, سال اول، شماره دوم

Ahuja, D. R., & Tatsutani, M. (2009). Sustainable energy for developing countries. SAPIENS, 2(1).

Almosni, S., Delamarre, A., Jehl, Z., Suchet, D., Cojocaru, L., Giteau, M., Behaghel, B., Julian, A., Ibrahim, C., Tatry, L., et al. (2018). Material challenges for solar cells in the twenty-first century: Directions in emerging technologies. Science and Technology of Advanced Materials, 19, 336–369.

Boyle, G. (2004). Renewable Energy: Power for a Sustainable Future (2nd ed.). Oxford University Press.

Crabtree, G. W.,&Lewis, N. S. (2018). Physics of sustainable energy, using energy efficiently and producing it renewably. In Proceedings of the AIP Conference, Berkeley, CA, USA.

Comprehensive study on photovoltaic cells' generation and factors affecting their performance: A review. [Journal Name]. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20133-0

Dunlap-Shohl, W. A., Zhou, Y., Padture, N. P.,&Mitzi, D. B. (2019). Synthetic approaches for halide perovskite thin films. Chemical Reviews.

Ghosh, S.,&Yadav, R. (2021). Future of photovoltaic technologies: A comprehensive review. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101410.

Geisz, J. F., France, R. M., Schulte, K. L., et al. (2020). Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. Nature Energy, 5, 326–335. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5

Hasan, A., Sarwar, J., & Shah, A. H. (2018). Concentrated photovoltaic: A review of thermal aspects, challenges and opportunities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 835–852. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.014

International Renewable Energy Agency. (2023). Snapshot of Global PV Markets 2023 (Report IEA-PVPS T1–44). IEA.

International Energy Agency. (2022). Renewables 2022:Analysis and forecast to 2027 (Annual report, Fuel report: December 2022). CC BY 4.0.

International Energy Agency. (2023). Renewable Energy Market Update - June 2023. Paris: IEA. CC BY 4.0. https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023

International Renewable Energy Agency, & International Labour Organization. (2023). Renewable energy and jobs: Annual review 2023. ISBN 978–92–9260–552–0.
International Renewable Energy Agency. (2024). Renewable energy statistics 2024. ISBN 978–92–9260–614–5.
International Renewable Energy Agency. (2023). Renewable energy statistics 2023. ISBN 978–92–9260–537–7.
Jiang, N., Zheng, Z., Qin, C., Liang, R., Li, Z., Ye, Z.,&Zhu, L. (2023). Enhanced power conversion efficiency of perovskite solar cells using dopant-free carbon nanotubes-Spiro-OMeTAD. Ceramics International, 49 (6), 9502–9511. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.117
Jackson, P., Wuerz, R., Hariskos, D., Lotter, E., Witte, W., & Powalla, M. (2016). Effects of heavy alkali elements in Cu(In, Ga)Se2 solar cells with efficiencies up to 22.6%. RRL Solar, 584–586.
Jeon, I., Shawky, A., et al. (2020). Carbon nanotubes to outperform metal electrodes in perovskite solar cells via dopant engineering and hole-selectivity enhancement. Journal of Materials Chemistry A, 8 (22), 11141–11147. https://doi.org/10.1039/D0TA03692G
Kuczyńska-Łażewska, A., Klugmann-Radziemska, E., & Witkowska, A. (2021). Recovery of valuable materials and methods for their management when recycling thin-film CdTe photovoltaic modules. Materials, 14, 7836.
Kowalski, M., Partyka, J., Węgierek, P., Żukowski, P., Komarov, F. F., Jurchenko, A. V., & Freik, D. (2005). Frequency-dependent annealing characteristics of the implant-isolated GaAs layers. Vacuum, 78, 311–317.
Lin, L., & Ravindra, N. M. (2020). Temperature dependence of CIGS and perovskite solar cell performance: An overview. SN Applied Sciences, 2, 1361. https://doi.org/10.1007/s42452-020-3169-2
Li, J., Aierken, A., Liu, Y., Zhuang, Y., et al. (2021). A brief review of high-efficiency III-V solar cells for space applications. Frontiers in Physics, 8, 631925. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.631925
Lin, Z., Ye, M., & Wang, M. (2018). Multifunctional Photocatalytic Materials for Energy. https://doi.org/10.1016/C2016-0-01653-4
Mahmoudi, T., Wang, Y., & Hahn, Y. B. (2018). Graphene and its derivatives for solar cell applications. Nano Energy, 47, 51–65. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.047
Matsuyama, K., Nakamura, Y., Nishiwaki, T., Fujita, K.,&Maruyama, E. (2013). 24.7% efficiency solar cell. [Journal Name, Volume], 3193–3295.
Mamgai, M., Achaea, M., Hanuman Mad Haboob, Y., & Forouzanfar, M. (2012). A review of the comparison between traditional silicon solar cells and thin-film CdTe

solar cells. Proceedings of National Graduate Conference, Tenaga Nasional Universiti, 1–5.

Nakamura, M., Yamaguchi, K., Kimoto, Y., Yasaki, Y., Kato, T.,& Sugimoto, H. (2019). Cd-free Cu(In, Ga)(Se, S)2 thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. IEEE Journal of Photovoltaics, 9, 1863–1867.

Pastuszak, J., & Węgierek, P. (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. Materials, 15 (5542). https://doi.org/10.3390/ma15165542

Pastuszak, J., & Węgierek, P. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Lublin University of Technology. Correspondence: j.pastuszak@pollub.pl

Qian, L., Xie, Y., Zhang, S., & Zhang, J. (2020). Band engineering of carbon nanotubes for device applications. Matter, 3 (3), 664–695. https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.06.014

Rehman, F., Syed, I. H., et al. (2023). Fourth-generation solar cells: A review. Energy Advances. https://doi.org/10.1039/D3YA00179BSharma, P., & Mishra, R. K. (2025).

Sharma, P.,&Mishra, R. K. (2025). Comprehensive study on photovoltaic cells' generation and factors affecting their performance: A review. [Journal Name].

Sharma, P.,&Goyal, P. (2020). Evolution of PV technology from conventional to nano-materials. Materials Today: Proceedings, 28, 1593–1597.

Scarpulla, M. A., McCandless, B., Phillips, A. B., & Yan, Y. (2023). CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and prospects. Solar Energy Materials and Solar Cells, 255, 112289. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112289Tsakalakos, L. (2010). Nanotechnology for photovoltaics. CRC Press.

Thakur, A. K., Singh, R., Gehlot, A., et al. (2022). Advancements in solar technologies for sustainable development of the agricultural sector in India: A comprehensive review on challenges and opportunities. Environmental Science and Pollution Research, 29, 43607–43634. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20133-0.

Taguchi, M., Yano, A., & Tohoda, S. (2013). Record efficiency HIT solar cell on a thin silicon wafer. IEEE Journal of Photovoltaics, 4, 96–99.

Wu, C., Wang, K., Batmunkh, M., Bati, A. S., et al. (2020). Multifunctional nanostructured materials for next-generation photovoltaics. Nano Energy, 70, 104480. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104480

Wang, S., Shi, J., Chen, H. H., Schafer, S. R., et al. (2017). Cooling design and evaluation for photovoltaic cells within constrained space in a CPV/CSP hybrid solar system. Applied Thermal Engineering, 110, 369–381. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.196

Wieland, L., Li, H., Rust, C., Chen, J., & Flavel, B. S. (2021). Carbon nanotubes for photovoltaics: From lab to industry. Advanced Energy Materials, 11, 2002880. https://doi.org/10.1002/aenm.202002880

Zhao, X., Xu, W., Wu, Y., et al. (2022). High-efficiency CNT-Si solar cells based on a collaborative system enabled by oxide penetration. Nano Research, 15, 2497–2504. https://doi.org/10.1007/s12274-021-3749-5

Comparative Study of the Generations of Photovoltaic Solar Cells and Their Development Process

Fadamohammad Mohammadi[1], Hamidullah Hodyal[2], Rahmatullah Liwal[3]*
*[1] Department of Physics, Faculty of Education, Ghazni University
[2] PhD Candidate, University of Science and Technology of China
[3] Faculty of Education, Paktika University
Corresponding author email: fadamohammad1987@gmail.com

Abstract:

This study employs a qualitative research approach to compare different generations of photovoltaic (PV) solar cells. Due to the rising global demand for energy, solar power has gained significant importance as a sustainable, clean, and viable alternative to fossil fuels. Photovoltaic technology has become a leading method for electricity generation, with notable reductions in cost and improvements in efficiency in recent years. PV solar cells have evolved through four generations: 1. First-generation solar cells, including monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, and gallium arsenide cells. 2. Second-generation solar cells, based on thin-film technologies such as amorphous silicon, cadmium telluride, and copper–indium–gallium–selenide (CIGS) cells. 3. Third-generation solar cells, consisting of advanced technologies such as perovskite cells, quantum dot cells, and multi-junction cells. 4. Fourth-generation hybrid solar cells. Due to decreasing production costs, continued technological expansion, and strong global market support, investment in solar energy is increasing rapidly. The study concludes that third-generation solar cells currently represent the most promising option, owing to their lower cost, higher efficiency, and superior optical and electronic properties.

***Keywords**: Perovskite cells, solar energy, photovoltaic cells, monocrystalline silicon, thin-film cells.*

حل معادلات دیفرانسیل کسری از نوع مشتق کاجوگامپولا، با استفاده از روش تکرار تغییرات بهبود یافته

عباس پویا[1*]، محمدعلی زیرک[1]، سید عدنان موسوی[2]
۱. دیپارتمنت ریاضی، پوهنځی تعلیم و تربیه، پوهنتون دایکندی.
۲. دیپارتمنت علوم طبیعی، پوهنځی الکترومیخانیک ، پوهنتون تخنیکی غزنی.
Abbaspoya@dhei.edu.af

خلاصه

معادلات دیفرانسیل کسری به دلیل قابلیت توصیف پدیده‌های دارای حافظه، متنوع و رفتارهای غیرموضعی، در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای درمدل‌سازی ریاضی و فیزیکی یافته‌اند. این معادلات در حوزه‌هایی مانند انتقال کتله و حرارت، دینامیک سیالات، انجنیری و سیستم‌های پیچیده کاربرد گسترده دارند. با وجود معرفی روش‌های تحلیلی و عددی گوناگون، همچنان نیاز به روش‌های با دقت بالا، تقارب مناسب و قابلیت به‌کارگیری در مسائل خطی و غیرخطی احساس می‌شود. هدف تحقیق ذیل بررسی توسعه و به‌کارگیری روش تکرار تغییرات تعمیم یافته برای بدست آوردن جواب‌های تحلیلی این گونه معادلات می‌باشد. روش تحقیق این پژوهش از نوع تحلیلی-کاربردی است ابتدا مفاهیم و مبانی حسابان کسری شامل مشتقات ریمان- لیوویل، کاپوتو و کاجوگامپولا معرفی، سپس روش تکرار تغییرات تعمیم‌یافته به‌عنوان چارچوب اصلی حل معادلات دیفرانسیل کسری به کار گرفته شده ودیتاهای آن از طریق روش کتابخانه‌ای، از جمله کتاب‌ها، مقالات وسایت‌های معتبر علمی و برنامه نرم‌افزار متلب استفاده گردیده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی درحل معادله انتشار کسری و همچنین سیستم غیرخطی ناویر-استوکس کسری از مؤثریت و دقت بالایی برخوردار است و تقارب سلسله جواب‌ها به‌خوبی برقرار می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام و تطابق قابل‌قبولی میان نتایج تحلیلی وعددی مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: *تغییرات تعمیم‌یافته، دیفرانسیل کسری، مشتق کاپوتو، مشتق کاجوگامپولا .*

۱. مقدمه

اَلحَمْدُ لله رب العالمين والصَّلَاةُ والسَّلاَمُ عَلَي اَشْرَفِ الاَنْبِيَاءِ وَاْلُمرْسَلِيْنَ سَيِّدِنَا محمد وَعَلَي اَلِهِ وَصَحْبِهِ اَجْمَعِيْنَ.

معادلات دیفرانسیل کسری شاخه‌ی از ریاضیات است که در توصیف پدیده‌های فیزیکی و انجنیری نقشی اساسی دارد. این شاخه ریاضی در اوایل قرن بیستم مورد توجه زیادی از دانشمندان قرار گرفت و دانشمندان تعاریف زیادی را ارائه کردن که ازجمله می‌توان به مشتقات کسری گرانوالد-لیتنکوف، ریمان-لیوویل و کاپوتو اشاره کرد. زیرا بسیاری از مسائل و پدیده‌های فزیکی و انجنیری به صورت معادلات دیفرانسیل کسری مدل‌سازی می‌شوند. به ویژه پدیده‌های مرتبط با زمان معمولا به‌صورت سیستم معادلات دیفرانسیل کسری نوشته می‌شوند. اکثر محققین کوشش نمودن تا نشان دهد معادلات دیفرانسیل کسری حالت تعمیم‌یافته معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی هستند. روش‌های گوناگون را برای حل معادلات کسری وجود دارد، از جمله می‌توان به روش‌های مختلف عددی مثل روش تجزیه آدومیان(Ghanbari& Biazar, porshokuhi.2010)، روش اختلال هموتوپی(He j. H.1999)، روش تکرار تغییرات(Latifizadeh&Esmail,2009)، تبدیلات لاپلاس(Podlubny,1998)، روش تغییرات تعمیم یافته (Zirak & poya.2023) ، روش عناصر متناهی (Slin.2005)، روش رانگ-کوتا(Van der Houwen.1996)، روش نیوتن رافسون، روش مونت‌کارلو(Teckentrup & Cliffe, Giles.2011)، روش گالرکین(Shu,2009). روش‌های تکراری (Hageman,2014) هستند که درحل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی به صورت عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اشاره کرد. در این تحقیق از مشتق کسری کاجوگامپولا استفاده می‌کنیم. از آنجایی‌که تبدیل انتگرالی به تنهایی قادر به حل معادلات دیفرانسیل کسری غیرخطی نیست، بنابراین در روش جدید تبدیل لاپلاس تعمیم‌یافته که اخیراً معرفی شده، با روش تکرار تغییرات ترکیب نموده و یک روش ترکیبی محاسباتی کارآمد به دست می‌آید که می‌تواند برای حل معادلات دیفرانسیل کسری غیرخطی استفاده نمود.

۲. مواد و روش کار

برای اولین بار دو دانشمند ایرانی به نام‌های حسام‌الدینی و لطیفی‌زاده یک روش جدید را برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی پیشنهاد نمودند(Latifizadeh & Hesameddini,2012) و این روش را به نام روش تکرار تغییرات تعمیم یافته نام‌گذاری نمودند. آن‌ها با استفاده از ترکیب تبدیل انتگرالی لاپلاس یک رابطه بازگشتی را برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی ارائه کردند. بعداً در سال ۲۰۱۵ اکرمی و همکار آن، با استفاده از تبدیل انتگرالی لاپلاس (۹) و رابطه مشتق کسری کاپوتو (۲) این روش را تنها برای حل معادلات دیفرانسیل کسری خطی، از نوع مشتق کسری کاپوتو به کار بردند. در این تحقیق، ما با استفاده از ترکیب جدید بنام تبدیل تعمیم‌یافته لاپلاس (۱۰) و مشتق کسری جدید به نام مشتق کسری کاجوگامپولا (۴) یا (حالت تعمیم‌یافته مشتق کسری کاپوتو)، روش تکرار تغییرات تعمیم‌یافته یا بهبود یافته را برای حل انواع از معادلات دیفرانسیل کسری خطی و غیرخطی از نوع مشتق کسری کاجوگامپولا به کار برده‌ایم. و در پایان بعضی از شکل‌های دو بعدی و سه‌بعدی حل‌های بدست آمده را با استفاده از نرم‌افزار متلب رسم نموده‌ایم.

۳. پیشینه تاریخی

حسابان کسری موضوعی است که بیش از سه قرن قدامت دارد. ایده حسابان کسری از زمان حسابان معمولی (کلاسیک) به وجود آمده و بیش‌ترین نظریه‌های مربوط به آن تا قبل از قرن بیستم گسترش یافت. نخستین بار در سال ۱۶۹۵ این موضوع را لایبنیتس و هوپیتال مطرح کردند. که در آن زمان هوپیتال به لایبنیتس نامه‌ای نوشت و نظر او را درمورد مشتق با مرتبهٔ غیر صحیح $\frac{1}{2}$ جویا شد. لایبنیتس در پاسخ به او نوشت: «این موضوع منجر به تناقض می‌شود، اما بعدها نتایج مفیدی از آن به دست خواهد آمد» و این تولد حسابان کسری بود. سؤال طرح شده توسط لایبنیتس باعث شد از آن به بعد افراد زیادی این موضوع را دنبال کنند. در سال ۱۷۳۰ این موضوع توجه اویلر را به خود جلب نمود.

در اوایل قرن بیستم یعنی بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۰ تلاش‌های زیادی توسط دانشمندان مختلف در این زمینه صورت گرفت. شخصی به نام کاپوتو با استفاده از دوباره نویسی فرمول ریمان-لیوویل

مشتق جدیدی را معرفی نمود که امروزه با نام مشتق کاپوتو ازآن استفاده می‌شود(Caputo,1967). بعد از کاپوتو شخصی به نام کاجوگامپولا مشتقات کسری ریمان-لیوویل و کاپوتو را تعمیم داده و تعریف جدید از مشتقات کسری را ارائه دادند(Abdeljawad, T& Jarad, F.2018).

۴. تعاریف مقدماتی حسابان کسری

در این بخش چند مفهوم ابتدایی از حسابان کسری را مورد بررسی قرار می دهیم.

تعریف(مشتق و انتگرال کسری ریمان لیوویل) مشتق و انتگرال کسری ریمان-لیوویل تابع $f(t)$ از مرتبه کسری $0 < \alpha \le 1$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود(Podlubny,1998):

$$ {}_{0}^{RL}D_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} f(\tau) d\tau, \tag{۱} $$

مشتق کسری کاپوتو $f(t)$ از مرتبه کسری $0 < \alpha \le 1$ به صورت زیر تعریف می‌شود .

$$ {}_{0}^{C}D_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^{-\alpha} \frac{df(\tau)}{dt} d\tau \tag{۲} $$

مشتق و انتگرال کسری کاجوگامپولا از نوع ریمان-لیوویل ، تابع $f(t)$ از نوع ریمان - لیوویل و از مرتبه کسری $0 < \alpha \le 1$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$ {}_{0}^{K-RL}D_t^{\alpha} f(t) = \frac{\gamma}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \left(\frac{t^{\rho} - \tau^{\rho}}{\rho} \right)^{-\alpha} f(\tau) \frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}. \tag{۳} $$

$$ {}_{0}^{K-RL}I_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \left(\frac{t^{\rho} - \tau^{\rho}}{\rho} \right)^{\alpha-1} f(\tau) \frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}. \tag{۴} $$

که $\gamma = t^{1-\rho} \frac{d}{dt}$ و $\rho > 0$ می‌باشند.

مشتق و انتگرال کسری کاجوگامپولا از نوع کاپوتو، تابع $f(t)$ از نوع کاپوتو، از مرتبه کسری $0 < \alpha \le 1$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود(Abdeljawad, T& Jarad, F.2018).

$$ {}_{0}^{K-RL}D_t^{\alpha} f(t) = \frac{\gamma}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \left(\frac{t^{\rho} - \tau^{\rho}}{\rho} \right)^{-\alpha} f(\tau) \frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}. \tag{۵} $$

که $\gamma = t^{1-\rho}\dfrac{d}{dt}$ و $\rho > 0$ می‌باشند.

روابط مهم زیر از تعریف (۳) و (۴) بدست می آید.

$$ {}^{K-RL}_{0}I_t^{\alpha,\rho}(1) = \frac{1}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha , $$

$$ {}^{K-RL}_{0}I_t^{\alpha,\rho}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^v = \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v+\alpha+1)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha+v} , $$

$$ {}^{K-RL}_{0}D_t^{\alpha,\rho}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^v = {}^{K-C}_{0}D_t^{\alpha,\rho}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^v = \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v-\alpha+1)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{v-\alpha} , $$

$$ {}^{K-RL}_{0}D_t^{\alpha,\rho}t^v = {}^{K-C}_{0}D_t^{\alpha,\rho}t^v = \frac{\Gamma\left(\frac{v}{\rho}+1\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{\rho}-\alpha+1\right)}t^{v-\rho\alpha} . $$

۵. تبدیل تعمیم‌یافته لاپلاس

فرض کنیم $\mathbf{L}_\rho\{f(t)\} = F(s)$ شـــده باشـــد،آنگاه تبـدیـل انتگرال معمولی وتبـدیـل انتگرال تعمیم‌یافته لاپلاس به‌صورت زیرتعریف می‌شود:

$$ \mathbf{L}_\rho\{f(t)\} = \int_0^\infty e^{-s\frac{t^\rho}{\rho}} f(t)\frac{dt}{t^{1-\rho}}, \rho > 0. \qquad (٦) $$

رابطه بین دو تبدیل تعمیم‌یافته و تبدیل لاپلاس معمولی به‌صورت زیرمی‌باشند:

.(Jar ad, F. Abdeljawad, T. 2018)

$$ \mathbf{L}_\rho\{f(t)\}(s) = \int_0^\infty e^{-s\frac{t^\rho}{\rho}} f(t)\frac{dt}{t^{1-\rho}} = \mathbf{L}\left\{f(\rho t)^{\frac{1}{\rho}}\right\}(s). \qquad (٧) $$

با استفاده تعریف تابع میتاگ لفلر تبدیل تعمیم‌یافته لاپلاس چند تابع مهم را بررسی می‌نماییم.

$$ \mathrm{L}_\rho\{(f *_\rho g)\}(s) = \mathrm{L}_\rho\left\{\int_0^t f\left(\left(t^\rho - \tau^\rho\right)^\rho\right)g(\tau)\frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}\right\} = \mathrm{L}_\rho\{(f)\}(s)\mathrm{L}_\rho\{(g)\}(s). $$

$$\mathrm{L}_{\rho}\{1\}(s)=\frac{1}{s}.$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{t^{p}\right\}(s)=\rho^{\frac{p}{\rho}}\frac{\Gamma\left(1+\frac{p}{\rho}\right)}{s^{1+\frac{p}{\rho}}},\qquad \rho\in\mathbb{R},\ s>0.$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{\left(\frac{t^{p}}{\rho}\right)^{\rho}\right\}(s)=\rho^{\frac{p}{\rho}}\frac{\Gamma(1+p)}{s^{1+p}},\qquad \rho\in\mathbb{R},\ s>0.$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{e^{\lambda\frac{t^{\rho}}{\rho}}\right\}(s)=\frac{1}{s-\lambda},\ s>\lambda.$$

$$\left(f*_{\rho}g\right)(t)=\int_{0}^{t}f\left(\left(t^{\rho}-\tau^{\rho}\right)^{\rho}\right)g(t)\frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}.$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{\left(f*_{\rho}g\right)\right\}(s)=\mathrm{L}_{\rho}\left\{\int_{0}^{t}f\left(\left(t^{\rho}-\tau^{\rho}\right)^{\rho}\right)g(\tau)\frac{d\tau}{\tau^{1-\rho}}\right\}=\mathrm{L}_{\rho}\left\{(f)\right\}(s)\mathrm{L}_{\rho}\left\{(g)\right\}(s).$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{{}^{K-C}_{\ \ 0}D_{t}^{\alpha,\rho}f(t)\right\}=s^{\alpha}\mathrm{L}_{\rho}\left\{f(t)\right\}(s)-s^{\alpha-1}f(0).$$

$$\mathrm{L}_{\rho}\left\{{}^{K-RL}_{\ \ \ 0}I_{t}^{\alpha,\rho}f(t)\right\}=s^{-\alpha}\mathrm{L}_{\rho}\left\{f(t)\right\}(s).$$

از تابع میتاگ- لفلر یا توابع تعمیم‌یافته نمایی به‌صورت زیر تعریف می‌نماییم که

$$E_{\alpha}(z)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{z^{k}}{\Gamma(k\alpha+1)},\quad E_{\alpha,\beta}(z)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{z^{k}}{\Gamma(k\alpha+\beta)}.\qquad (۸)$$

روش تکرار تغییرات تعمیم‌یافته برای حل معادلات دیفرانسیل کسری خطی و غیرخطی، شکل عمومی معادله دیفرانسیل کسری غیرخطی زیر را

$${}^{K-C}_{\ \ 0}D_{t}^{\alpha}u(x,y,t)=Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t)+f(x,y,t).\qquad (۹)$$

با شرایط اولیه

$$u(x,y,0)=g(x,y),$$

در نظر می‌گیریم. که درآن N و R به تربیب قســمت غیرخطی وخطی و $g(x,y)$ می‌باشــند تابع معلوم می‌باشند. با اعمال تبدیل لاپلاس تعمیم یافته از رابطه (۴) داریم.

$$\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{{}^{KC}D_t^{\alpha,\rho}u(x,y,t)\right\}+\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{Ru(x,y,t)\right\}-\left\{Nu(x,y,t\right\}(s)=\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}f(x,y,t),$$

$$s^\alpha\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{u(x,y,t)\right\}(s)-s^{\alpha-1}u(x,y,0)=-\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s),$$

$$\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{u(x,y,t)\right\}(s)-s^{-1}u(x,y,0)=-\frac{1}{s^\alpha}\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s),$$

$$\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{u(x,y,t)\right\}(s)=\mathrm{L}^{-1}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{s^{-1}\right\}u(x,y,0)-\mathrm{L}^{-1}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{\frac{1}{s^\alpha}\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s)\right\},$$

$$u(x,y,t)=u(x,y,0)-\mathrm{L}^{-1}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{\frac{1}{s^\alpha}\right\}*\mathrm{L}^{-1}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{\mathrm{L}_{\frac{t^\rho}{\rho}}\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s)\right\},$$

$$u(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}*\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s),$$

$$u(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}*\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s),$$

$$u(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t-f(x,y,t)\right\}(s)\right)\frac{d}{\tau^{1-\alpha}},\qquad (۱۰)$$

از رابطه (۵) می‌توان رابطه باگشتی به صورت زیر ترتیب کرد

$$u_{n+1}(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\left\{Ru(x,y,t)+Nu(x,y,t)-f(x,y,t)\right\}\right)\frac{d}{\tau^{1-\alpha}}\qquad (۱۱)$$

در نتیجه حل معادله دیفرانسیل کسری به صورت زیر بدست می‌آید.

$$u(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}u_n(x,y,t)$$

در این قسمت دو حالت را برای معادله دیفرانسیل کسری (۳) در نظر می‌گیریم. اگر قسمت خطی معادله (۴) صفر باشد آنگاه رابطه بازگشتی (۲) به صورت زیر تبدیل می‌گردد.

$$u_{n+1}(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\left\{Ru(x,y,t)-f(x,y,t)\right\}\right)\frac{d}{\tau^{1-\alpha}}\qquad (۱۲)$$

$$n=0,1,2,3,\cdots$$

هرگاه قسمت غیرخطی معادله دیفرانسیل(۴)، یعنی $N(u)\neq 0$ ، برای خطی سازی قسمت غیرخطی از پولینوم آدومیان به صورت زیر استفاده می‌کنیم.

$$N(u_n)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n(u_0,u_1,\cdots,u_n),\ \ A_n=\frac{1}{n!}\frac{d^n}{d\lambda^n}\left[N\left(\sum_{i=0}^{\infty}\lambda^i u_i\right)\right],\ n=0,1,2,\cdots$$

$$A_0=N\left(u_0\right),\ \ A_1=u_1N'(u_0),\ \ \ A_2=u_2N'(u_0)+\frac{u_1^2}{2!}N''(u_0),$$

$$A_3=u_3N'(u_0)+u_1u_2N''(u_0)+\frac{u_1^3}{3!}N'''(u_0) \qquad (۱۳)$$

با جای‌گذاری مقدار $N\left(u_n\right)$ در معادله (۴) داریم.

$$u_{n+1}(x,y,t)=u(x,y,0)-\frac{1}{\Gamma}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\left\{Ru(x,y,t)+A_n(u_0,u_1,\cdots,u_n)-f(x,y,t)\right\}\right)\frac{d}{\tau^{1-\alpha}} \qquad (۱۴)$$

$$n=0,1,2,3,\cdots$$

مثال ۱ . معادله دیفرانسیل کسری انتشار دوبعدی زیر را در نظر می‌گیریم.

$${}^{KC}D_t^{\alpha,\rho}u(x,y,t)=\frac{\partial^2u(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u(x,y,t)}{\partial x^2},\ \ u_0(x,y)=e^{x+y},\ 0<\alpha\leq 1.$$

حل: درمعادله بالا $N(u)=f(x,y,t)=0$ و $R(u)=\frac{\partial^2u(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u(x,y,t)}{\partial y^2}$ بناء برای $n=0$ و استفاده ازرابطه بازگشتی (۹) داریم.

$$\begin{aligned}u_1(x,y,t)&=e^{x+y}+\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\frac{\partial^2u_0(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u_0(x,y,t)}{\partial y^2}\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},\\&=e^{x+y}+\frac{2e^{x+y}}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},\\&=e^{x+y}\left[1+\frac{2}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha\right]\end{aligned}$$

برای $n=1$ داریم.

$$u_2(x,y,t)=e^{x+y}+\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(\frac{\partial^2 u_1(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_1(x,y,t)}{\partial y^2}\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},$$

$$=e^{x+y}+\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}2e^{x+y}\left[1+\frac{2}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}\right]\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},$$

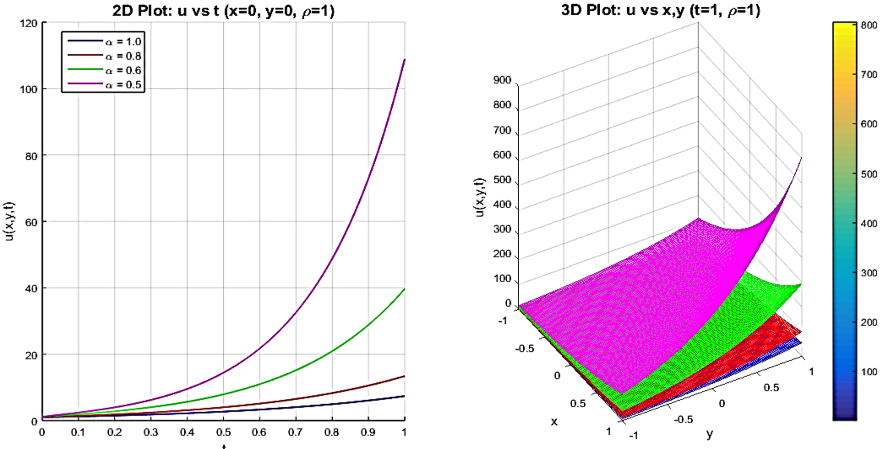
$$=e^{x+y}\left[1+\frac{2}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{2^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}\right]$$

برای n داریم

$$u_n(x,y,t)=e^{x+y}\left[1+\frac{2}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{2^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}+\cdots+\frac{2^n}{\Gamma(1+n\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha}\right]$$

درآخر برای بی‌نهایت خواهیم داشت

$$u(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}u_n(x,y,t)=e^{x+y}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{2^n}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha}=e^{x+y}\left(2\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}\right)$$



الف ب

شکل۱. نشان‌دهنده مقایسه گراف‌های دو بعدی و سه بعدی با توجه به مقادیر مختلف α=1,0.8 ,0.6 ,0.5

مثال۲. سیستم معادلات خطی ناویر- ستوک زیر را حل نمایید.

$$ {}_{0}^{K-C}D_{t}^{\alpha,\rho}u(x,y,t) = -u\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial x} - v\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial y} + \rho o\left(\frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + g, $$

$$ {}_{0}^{K-C}D_{t}^{\alpha,\rho}u(x,y,t) = -u\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x} - v\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y} + \rho o\left(\frac{\partial^2 v(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x,y,t)}{\partial y^2}\right) - g, $$

با شرایط اولیه زیردرنظر می‌گیریم.

$$ u(x,y,0) = u_0(x,y) = -\sin(x+y), $$
$$ v(x,y,0) = v_0(x,y) = \sin(x+y). $$

حل: با استفاده از رابطه بازگشتی (٦) برای $n=0$، طوری‌که دیده می‌شود معادله داده شده دارای قسمت غیرخطی $-u\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial x} - v\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial y}$ بوده، دراین‌صورت با استفاده از (٦) داریم.

$$ A_0 = N(u_0) = -u_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial x} - v_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial y} = -\sin(x+y)\cos(x+y) + \sin(x+y)\cos(x+y) = 0, $$

$$ A_1 = u_1 N'(u_0) = u_1\frac{d}{du_0}\left(-u_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial x} - v_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial y}\right) = 0, $$

$$ A_2 = u_2 N'(u_0) + \frac{u_1^2}{2!}N''(u_0) = 0, \quad A_3 = A_4 = \cdots = A_n = 0 \qquad (3-6) $$

$$ u_1(x,y,t) = -\sin(x+y) - \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \left(\frac{t^\rho - \tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(-u_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial x} - v\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial y} + \rho o\left(\frac{\partial^2 u_0(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}}, $$

$$ v_1(x,y,t) = \sin(x+y) - \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \left(\frac{t^\rho - \tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(-u_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial x} - v_0\frac{\partial u_0(x,y,t)}{\partial y} + \rho o\left(\frac{\partial^2 v_0(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_0(x,y,t)}{\partial y^2}\right) - g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}}, $$

$$ u_1(x,y,t) = -\sin(x+y) - \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \left(\frac{t^\rho - \tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(A_0 + 2\rho o\sin(x+y) + g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}}, $$

$$ v_1(x,y,t) = \sin(x+y) - \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t \left(\frac{t^\rho - \tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(A_0 - 2\rho o\sin(x+y) - g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}}, $$

$$ u_1(x,y,t) = -\sin(x+y)\left[-1 + \frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha\right] + \frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha, $$

$$ v_1(x,y,t) = -\sin(x+y)\left[1 - \frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha\right] - \frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^\alpha, $$

برای $n=1$ داریم.

$$u_2(x,y,t)=-\sin(x+y)-\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(A_1+\rho o\left(\frac{\partial^2 u_1(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_1(x,y,t)}{\partial y^2}\right)+g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},$$

$$v_2(x,y,t)=\sin(x+y)-\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t\left(\frac{t^\rho-\tau^\rho}{\rho}\right)^{\alpha-1}\left(A_1+\rho o\left(\frac{\partial^2 v_0(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v_0(x,y,t)}{\partial y^2}\right)-g\right)\frac{d\tau}{\tau^{1-\alpha}},$$

$$u_2(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)\left[-1+\frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{(2\rho o)^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}\right],$$

$$v_2(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)\left[1-\frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{(2\rho o)^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}\right],$$

در نتیجه برای n

$$u_n(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)\left[-1+\frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{(2\rho o)^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}+\cdots+\frac{(2\rho o)^n}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha}\right],$$

$$v_2(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)\left[1-\frac{2\rho o}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\frac{(2\rho o)^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{2\alpha}+\cdots+\frac{(2\rho o)^2}{\Gamma(1+2\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha}\right],$$

درنهایت

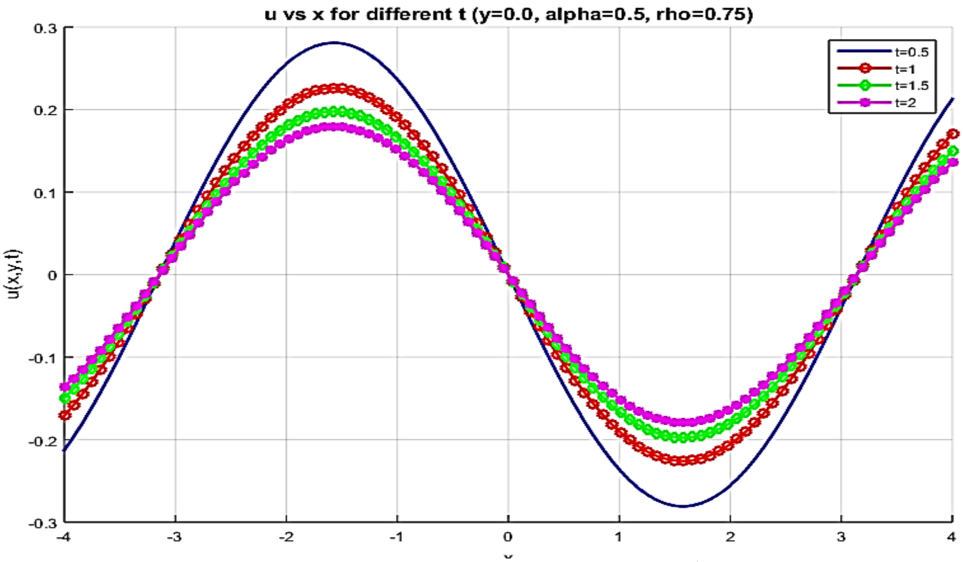
$$u(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}u_n(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}-\sin(x+y)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(2\rho o)^n}{\Gamma(1+n\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha},$$

$$v(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}v_n(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-2\rho o)^n}{\Gamma(1+n\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{n\alpha},$$

$$u(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}u_n(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}-\sin(x+y)E_\alpha\left(-2\rho o\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}\right),$$

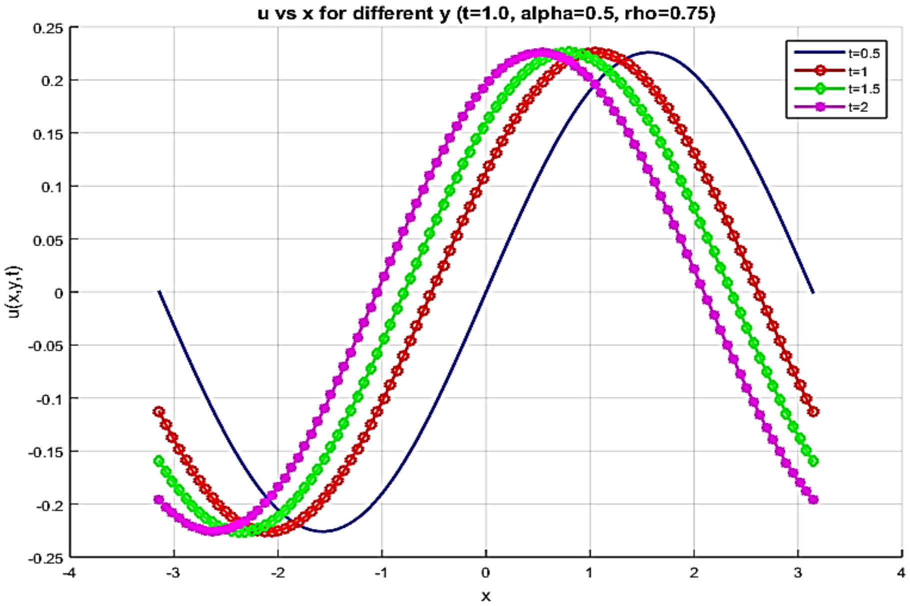
$$v(x,y,t)=\lim_{n\to\infty}v_n(x,y,t)=\frac{g}{\Gamma(1+\alpha)}\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}+\sin(x+y)E_\alpha\left(-2\rho o\left(\frac{t^\rho}{\rho}\right)^{\alpha}\right),,$$

برای $\alpha=\rho=1$ حل معادله ناویر- ستوکس از مرتبه صحیح بدست می‌آید.



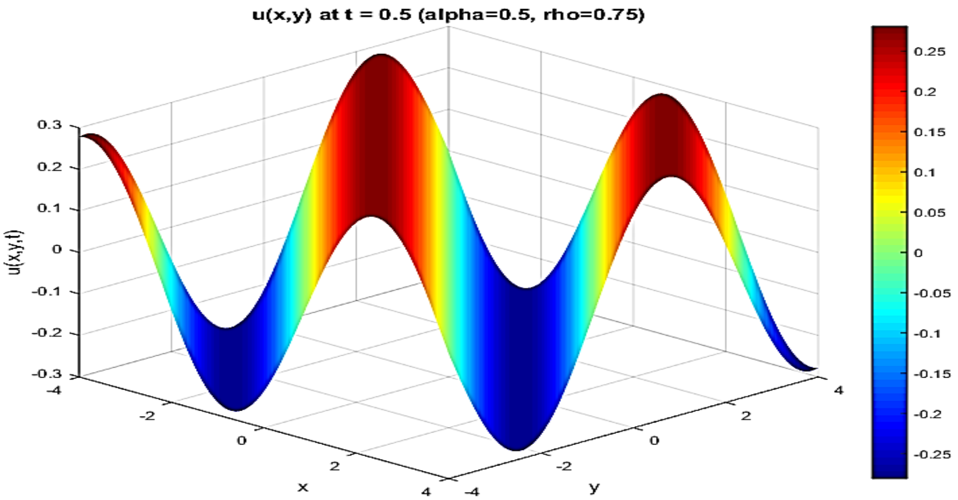
شکل ۲. نشان دهنده گراف‌های دو بعدی برای معادله اول با توجه به قیمت های مختلف

$\rho = 0.5 \quad \rho = 0.75$



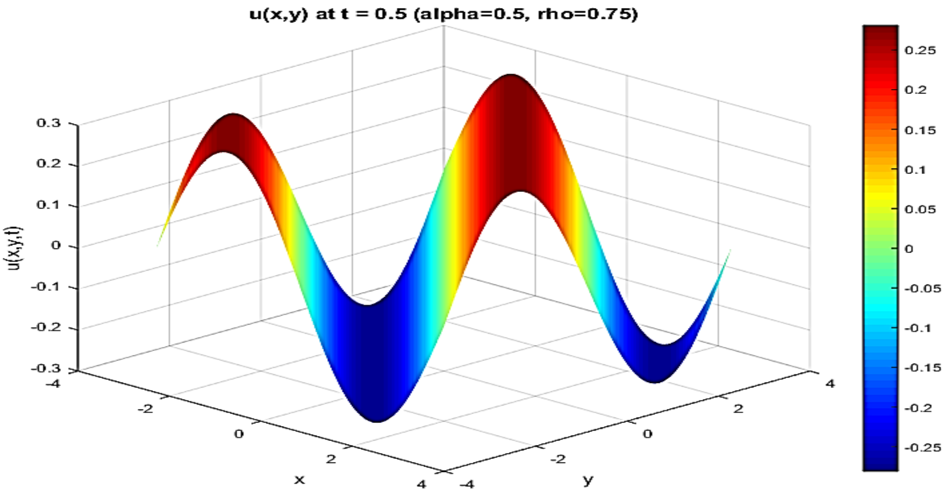
شکل۳. نشان دهنده گراف‌های دو بعدی برای معادله دوم با توجه به قیمت های مختلف

$\rho = 0.5 \qquad \rho = 0.75$



شکل۴. نشان دهنده گراف‌های دو بعدی برای معادله اول با توجه به قیمت های مختلف

$\rho = 0.5 \quad \rho = 0.75 \quad t = 0.5$



شـــکل۵. نشـــان دهنده گراف‌های دو بعدی برای معادله دوم با توجه به قیمت های مختلف

$\rho = 0.5 \quad \rho = 0.75 \quad t = 0.5$

٦. بحث و مناقشه

نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش تکرار تغییرات تعمیم‌یافته در حل معادلات دیفرانسیل کسری با مشتقات از نوع کاجوگامپولا، بشکل مفید و منسجم برای بدست آوردن جواب‌های تحلیلی فراهم می‌گردد. این روش با بهره‌گیری ازساختار تکراری و اصلاح تدریجی جواب، توانسته است تقارب سلسله جواب‌ها را با سرعت مناسب تضمین نماید؛ ویژگی‌ای که در بسیاری از روش‌های تحلیلی کلاسیک همچون روش تجزیه آدومیان و روش آنالیز هموتوپی به‌صورت کامل مشاهده نمی‌شود.

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین که بر پایهٔ مشتقات (ریمان- لیوویل) وکاپوتو انجام شده‌اند، نشان می‌دهد که مشتق کاجوگامپولا به دلیل ماهیت تعمیم‌یافتهٔ خود، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدل‌سازی پدیده‌های دارای حافظه و رفتارهای غیرموضعی فراهم می‌کند. این ویژگی سبب شده است که الگوریتم پیشنهادی بتواند در مسائل فزیکی با شرایط مرزی پیچیده و ساختار غیرخطی، عملکرد بهتری از خود نشان دهد.

کاربرد روش در حل معادله انتشار کسری و همچنین سیستم غیرخطی ناویر- ستوکس نشان داد که دقت جواب‌های تحلیلی به‌دست‌آمده با نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی در متلب مطابقت قابل‌توجهی دارد. این انطباق نه‌تنها اعتبار روش پیشنهادی را تأیید می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مکمل برای روش‌های عددی در تحلیل معادلات دیفرانسیل کسری مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که روش تکرار تغییرات تعمیم‌یافته، با تبدیل لاپلاس تعمیم یافته، قابلیت بالایی درحل تحلیلی معادلات دیفرانسیل کسری خطی و غیرخطی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد نوین و مؤثر در بخش حسابان کسری مطرح گردد.

۷. نتیجه گیری

حسابان کسري و معادلات ديفرانسيل کسري يکي از شاخه‌هاي بسيار مهم و اساسي معادلات ديفرانسيل بوده که توجه زيادي از محققان را به خود جلب کرده است. تا بحال روش‌هاي گوناگون و بسيار مؤثر توسط محققان معرفي شده است. يکي از اين روش‌ها، روش تکرار تغييرات تعميم يافته مي‌باشد. در اين تحقيق روش تکرار تغييرات بهبود يافته، بنام تبديل تعميم يافته لاپلاس و

مشتق کسري کاجوگامپولا (حالت تعميم يافته مشتق کسري کاپوتو) ترکيب نموده که جهت نشان دادن مؤثريت و کارايي اين روش مثال‌هاي مختلف از معادلات ديفرانسيل کسري خطي و غيرخطي، از نوع مشتق کسري کاجوگامپولا حل گرديده، جهت وضاحت بهترو بيشترموضوع گراف‌هاي دوبعدي و سه‌بعدي اين مثال‌ها با استفاده از نرم افزار متلب بدست آمده است.

منابع

Abdeljawad, T & Jarad, F. (2018). A modified Laplace transform for certain generalized fractional operators. *Results in Nonlinear Analysis*, 88--98.

Adomian, G. (2013). Solving frontier problems of physics: the decomposition method. *60*.

Akrami, M H & Erjaee, G H. (2015). Examples of analytical solutions by means of Mittag-Leffler function of fractional Black-Scholes option pricing equation. *Fractional Calculus and Applied Analysis, 18*, 38--47.

Akrami, M, Poya, A., & Zirak , M. (2024). EXACT ANALYTICAL SOLUTION OF TEMPERED FRACTIONAL HEAT-LIKE (DIFFUSION) EQUATIONS BY THE MODIFIED VARIATIONAL ITERATION METHOD. *Journal of Mahani Mathematical Research Center, 13*(2).

Ashley, G. (2015, April 12). *Finite Difference Method for a Numerical Solution to the Laplace Equation.*

Assaleh, K & Ahmad, W. (2007). Modeling of speech signals using fractional calculus. 1-4.

Biazar, J, Porshokuhi, M., & Ghanbari, B. (2010). Extracting a general iterative method from an Adomian decomposition method and comparing it to the variational iteration method. *Computers & Mathematics with Applications, 59*, 622-628.

Caputo, M. (1967). Linear models of dissipation whose Q is almost frequency independent—II. *Geophysical Journal International, 13*, 529-539.

Cliffe, K Giles, M., Scheichl, R., & Teckentrup, A. (2011). Multilevel Monte Carlo methods and applications to elliptic PDEs with random coefficients. *Computing and Visualization in Science, 3-15*.

Diethelm, K., & Ford, N. (2010). The analysis of fractional differential equations. *Lect. Notes Math, 2004*, 3-12.

Erjaee, G & Akrami, M. (2015). Examples of analytical solutions by means of Mittag-Leffler function of fractional Black-Scholes option pricing equation. *Fractional Calculus and Applied Analysis, 18*, 38--47.

Esmail, H & Latifizadeh, H. (2009). Reconstruction of variational iteration algorithms using the Laplace transform. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 10*(11-12), 1377-1382.

Gorenflo, R., Kilbas, A., & Mainardi, F. (2020). Mittag-Leffler functions, related topics and applications.

Gorenflo, R, Kilbas, A., Mainardi, F., & Rogosin, S. (2020). Mittag-Leffler functions, related topics and applications.

Hageman, L. (2014). Applied iterative methods.

Haubold , H., Mathai, A., & Saxena , R. (2011). Mittag-Leffler functions and their applications. *Journal of applied mathematics, 2011*(298628), 1.

He, J. (1997). Variational iteration method for delay differential equations. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2*(4), 235-236.

He, J.-H. (1999). Homotopy perturbation technique. *Computer methods in applied mechanics and engineering, 178*(3-4), 257-262.

He, J.-H & Xu-Hong, W. (2007). Variational iteration method: new development and applications." Computers. *Mathematics with Applications, 54*(7-8), 881-894.

Hesameddini, E & Latifizadeh, H. (2012). Homotopy analysis method to obtain numerical solutions of the Painlev{\'e} equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences, 35,* 1423--1433.

Hilfer, R. (2000). Fractional diffusion based on Riemann-Liouville fractional derivatives. *The Journal of Physical Chemistry B 104, 16,* 3914-3917.

Iyiola, O. & Zaman, F. (2014). A fractional diffusion equation model for cancer tumor. *AIP Advances, 4*.

Jarad, F. Abdeljawad, T. & Hammouch, Z. (2018). On a class of ordinary differential equations in the frame of Atangana--Baleanu fractional derivative. *Chaos, Solitons & Fractals, 117,* 16--20.

Jost, j. (2012). Partial differential equatons. *Springer Science & Business Media., 214.*

Jumarie. (2006). Modified Riemann-Liouville derivative and fractional Taylor series of nondifferentiable functions further results. *Computers & Mathematics with Applications,* 367-1376.

Jumarie, G. (2004). Fractional Brownian motions via random walk in the complex plane and via fractional derivative. Comparison and further results on their Fokker--Planck equations. *Chaos, Solitons & Fractals, 22,* 907-925.

Khan, M. & Mazhar, H. (2011). Application of Laplace decomposition method on semi-infinite domain. *Numerical Algorithms, 56,* 211-218.

Kilbas, A. Aleksandrovich, Srivastava, H., & Trujillo, J. (2006). *Theory and applications of fractional differential equations* (Vol. 204). elsevier.

Li, C & Zeng, F. (2015). Numerical methods for fractional calculus. *24*.

Li, C & Zeng, F. (2015). Numerical Methods for Fractional Calculus CRC Press. *Boca Raton*.

Miller, K. & Ross, B. (1993). An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations.

Ortigueira, M., & Machado, J. (2018). A critical analysis of the Caputo--Fabrizio operator. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 59*, 608--611.

Pho, K.-H. (2022). Improvements of the Newton--Raphson method. *Journal of Computational and Applied Mathematics, 408*, 114106.

Podlubny, I. (1998). Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their application.

Ross, B. (1977). *The development of fractional calculus.* Elsevier.

Shu, C-W. (2009). Discontinuous Galerkin methods: general approach and stability. *Numerical solutions of partial differential equations, 201*, 1-44.

Smith, G. (1985). Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods.

Solin, P. (2005). Partial differential equations and the finite element method.

Taloub, D. Bouras, A. & Driss, Z. (2023). *Modeling and numerical solution of the Laplace equation in 2D by the finite difference method case of the heat equation-Study of stability.*

Thanompolkrang, S. Sawangtong, W. & Sawangtong, P. (2021). Application of the generalized Laplace homotopy perturbation method to the time-fractional Black--Scholes equations based on the Katugampola fractional derivative in Caputo type. *Computation, 9*, 33.

Van der Houwen, P. (1996). The development of Runge-Kutta methods for partial differential equations. (20, Ed.) *Applied Numerical Mathematics*, 261-272.

Zirak , M. & Poya, A. (2023). Analytical Solution of Biological Population of Fractional Differential Equations by Reconstruction of Variational Iteration Method. *ournal for Research in Applied Sciences and Biotechnology, 2*(3), 158-162.

Solving Fractional Differential Equations of the Katugampola Derivative Type Using the Generalized Variation al Iteration Method

Abbas Pouya[1]*, Mohammad Ali Zirk1, Sayed Adnan Mosavi2

[1] Department of Mathematics, Faculty of Education, Daikundi University.
2 Department of Natural Sciences, Faculty of Electro Mechanics, Ghazni Technical University.

E-mail: Abbaspoya@dhei.edu.af

Abstract

Fractional differential equations, due to their ability to describe memory effects, heterogeneity, and nonlocal behaviors, have gained significant importance in recent years in mathematical and physical modeling. These equations have wide applications in areas such as mass and heat transfer, fluid dynamics, engineering, biomathematics, and complex systems. Despite the introduction of various analytical and numerical methods, there remains a need for approaches with high accuracy, suitable convergence, and applicability to both linear and nonlinear problems. Therefore, developing novel techniques for solving this class of equations is of considerable interest. In this study, the "generalized variational iteration method" is employed as an effective analytical framework for solving fractional differential equations involving derivatives of the Katugampola type. First, the fundamental concepts of fractional calculus and the definitions of Riemann–Liouville, Caputo, and Katugampola derivatives are introduced. Then, by combining a generalized integral transform with this method, a systematic algorithm for extracting analytical solutions is presented. The findings demonstrate that the proposed method provides high efficiency and accuracy in solving the fractional diffusion equation as well as the nonlinear fractional Navier–Stokes system, and the convergence of the solution series is well established. To validate the results, numerical simulations are performed in MATLAB, showing good agreement between the analytical and numerical outcomes.

Keyword: *Generalized Variations, Fractional Differential, Caputo Derivative, Katugampola Derivativ*

Economic and Environmental Optimization of Ghazni's Electricity Distribution Network Using Low-Loss Transformers

Massoud Danishmal[1]*, M. Yasin Kamaly[1], Dost Mohammad Sarwari1, Atiqullah Hamim[1] and, Mohammad Adel Adeel[1]
1 Electrical Power Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan.
***Corresponding author**: Massoud Danishmal, Department of Electrical Power Engineering, Ghazni Technical University, Afghanistan.
Email: Massoudzeyarmal@gmail.com

Abstract:

This study evaluates the technical, economic, and environmental impacts of low-loss transformers (AB′ and AC′) for Ghazni's electricity distribution network, which currently has limited coverage, and simultaneously analyzes scenarios for both current and full network coverage, providing a phased implementation strategy for practical application. The existing network, serving only 30% of the population, suffers from energy losses, financial inefficiency, and environmental challenges. The methodology includes detailed load and loss calculations, assessment of AB′ and AC′ transformers according to international standards, and scenario analysis for different coverage levels. Results indicate that AB′ transformers can save approximately AFN 38.6 million and reduce CO_2 emissions by 2,318 tons, while AC′ transformers can increase savings to AFN 68.7 million and reduce CO_2 emissions by 4,123 tons; if the entire population is connected, economic benefits could triple. The study recommends phased replacement of existing transformers, installation of low-loss units in new network expansions, and the establishment of a professional team to conduct standardized testing and monitoring.

Keywords: *Amorphous Core Transformers, Energy Efficiency, Sustainable Energy, Carbon Emission Reduction, and Distribution Network Optimization*.

1. Introduction

بِسمِ اللّهِ الرَّحمنِ الرَّحيمِ الحَمدُ لِلّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ والصَّلاةُ والسَّلامُ عَليَّ سَيِّدِ المُرسَلينَ وَ عَليَّ آلهِ وَ اصحابِهِ اجمَعينَ".

Electricity is a fundamental requirement of modern society, vital for economic development, industrial production, and quality of life. Globally, improving energy efficiency and optimizing distribution networks are essential goals for economic growth, carbon emission reduction, and environmental protection [Abbasi, Rezaei, & Shariati, 2022]. Any losses in electricity generation or distribution directly impact both economic and environmental outcomes.

In distribution networks, energy losses are a major concern, often caused by aging equipment, limited capacity, inadequate maintenance, and lack of modern technology [Ahmad & Khan, 2019]. Transformers, as key components in these networks, facilitate voltage conversion, reduce transmission losses, and meet consumer demand [Glover, Sarma, & Overbye, 2016]. However, transformer losses—particularly core (no-load) and copper (load-dependent) losses—contribute substantially to overall network inefficiency [Singh, Patel, & Joshi, 2022; Mahdavi & Akbari, 2023]. Additional losses include dielectric losses in insulation and leakage in metallic parts [Zhao, Chen, & Wu, 2023].

Significant research has explored strategies to reduce transformer losses, including the selection of advanced core materials, optimized winding design, and improved operational practices [Moradi, 2022; Pourleroi, 2024]. Low-loss transformers, particularly amorphous core distribution transformers, have demonstrated the potential to reduce core and eddy current losses by 60–80% compared to conventional silicon steel cores [Zorbas, 2014; Li, Wang, & Chen, 2022]. The unique properties of amorphous alloys—including high magnetic permeability, low hysteresis, non-crystalline structure, and thin ribbon construction—enhance energy efficiency, thermal performance, and reliability [Charalampopoulos, Papagiannis, & Karakatsanis, 2017; Lu, Tan, & Liu, 2025]. Advanced technologies such as natural ester insulation, improved cooling systems, and high-performance magnetic materials further reduce environmental impacts and fire hazards [Khorasani, 2022; Jin, Wang, & Li, 2024].

Although the initial cost of amorphous transformers is higher, total ownership cost analyses indicate long-term economic benefits due to energy savings, operational cost reduction, and extended equipment life [Huang, 2025]. Globally, the deployment of these transformers has improved network efficiency, reduced carbon emissions, and increased consumer satisfaction, often complemented by distributed generation

integration, optimal capacitor placement, smart meters, and network reconfiguration [Shariati & Ahmadi, 2021].

In Afghanistan, prolonged conflict and aging infrastructure have left distribution networks inefficient, with many areas relying on high-loss conventional transformers [Ahmad & Khan, 2019]. The Ghazni province network, managed by Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS), faces challenges including limited capacity, rising demand, high transformer losses, and inadequate maintenance. Implementing low-loss amorphous transformers in Ghazni is therefore crucial for improving energy efficiency, reducing losses, and establishing a reliable and environmentally sustainable electricity distribution system.

2. Literature Review

Significant research worldwide has focused on reducing energy losses in electricity distribution networks, as these networks are major sources of both technical and non-technical losses. Technical losses, primarily caused by transformers, transmission lines, and conductors, include no-load (core) and load-dependent losses, with transformer core losses being a major contributor (Ramesh et al., 2009; Komolafe & Udofia, 2020). In many developed and developing countries, no-load transformer losses range from 4% up to 20% in certain areas, and reducing these losses is crucial for improving network efficiency, saving energy, and protecting the environment (Najafi, Ghasemi, & Shariati, 2015; Pourleroi, 2024).

Conventional transformers, typically made of grain-oriented silicon steel, reduce eddy current losses through laminated construction but still exhibit significant hysteresis losses, leading to energy inefficiencies, overheating, and noise during prolonged operation [Moradi, 2022; Moradi, Rezaei, & Shariati, 2023; Khorasani, 2022]. To address these challenges, innovative solutions have been proposed, including distributed generation (DG) integration, optimal capacitor placement, smart meter deployment, and network reconfiguration. Among these, low-loss transformers—particularly amorphous core distribution transformers (AMDTs)—play a key role in enhancing energy efficiency.

Amorphous core transformers, made from non-crystalline materials with thin ribbon laminations, significantly reduce hysteresis and eddy current losses by 60–80% (Li, Wang, & Chen, 2022; Singh et al., 2024; Pourleroi, 2024). Their unique properties—high magnetic permeability, low hysteresis, smooth “fish-scale” surface, and high electrical resistivity—minimize core losses, improve voltage profiles, and increase network reliability (Yoshizawa et al., 1988; Hasegawa, 2010; Lu, Tan, & Liu, 2025). Although initial costs are approximately 20–30% higher than conventional units, total ownership cost analyses demonstrate strong long-term economic benefits due to reduced energy losses and operational expenses (Huang, 2025; Singh et al., 2024;

Mohan, 2012). Advanced technologies, such as silicon-hybrid adhesives (TEOS/BTSE), further enhance mechanical stability, reduce core losses by up to 23%, and lower noise levels (Nieroda et al., 2025).

Global experience shows that deploying amorphous transformers increases energy efficiency, network capacity, and consumer satisfaction while reducing the need for substation expansion. Combining AMDT transformers with optimal capacitor placement, on-load tap changers, and proper network design minimizes net energy losses and supports sustainable energy objectives (Amadi et al., 2016; Egwaile et al., 2018; Sadiq & Antar, 2024).

In Afghanistan, particularly in Ghazni province, the electricity distribution network, managed by Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS), faces challenges due to limited generation capacity, high transformer losses, and constrained infrastructure. Introducing amorphous core transformers in Ghazni is expected to: reduce core and copper losses, improve voltage profiles, enhance DG and capacitor effectiveness, lower lifetime costs, increase network capacity, reduce CO_2 emissions, and support sustainable energy goals. Therefore, widespread adoption of low-loss amorphous transformers, alongside complementary network optimization measures, provides a technically, economically, and environmentally sustainable solution for improving Ghazni's electricity distribution network.

3. Research Methodology

3.1. Research design

The research methodology adopted in this study consists of several key steps. It begins with a comprehensive literature review to establish the foundation of the study, followed by systematic data collection. Primary data was obtained from the Ghazni distribution network, while secondary data was gathered from publications and online resources such as R-Discovery and Perplexity. The collected data was then analyzed using IEC 60076 and HD428 standards. The analysis was further extended to include technical evaluation (losses, voltage regulation, transformer types), economic evaluation (cost-benefit analysis and financial impact of losses), and environmental

evaluation (CO_2 reduction and sustainability). Finally, conclusions and recommendations were drawn based on the findings.

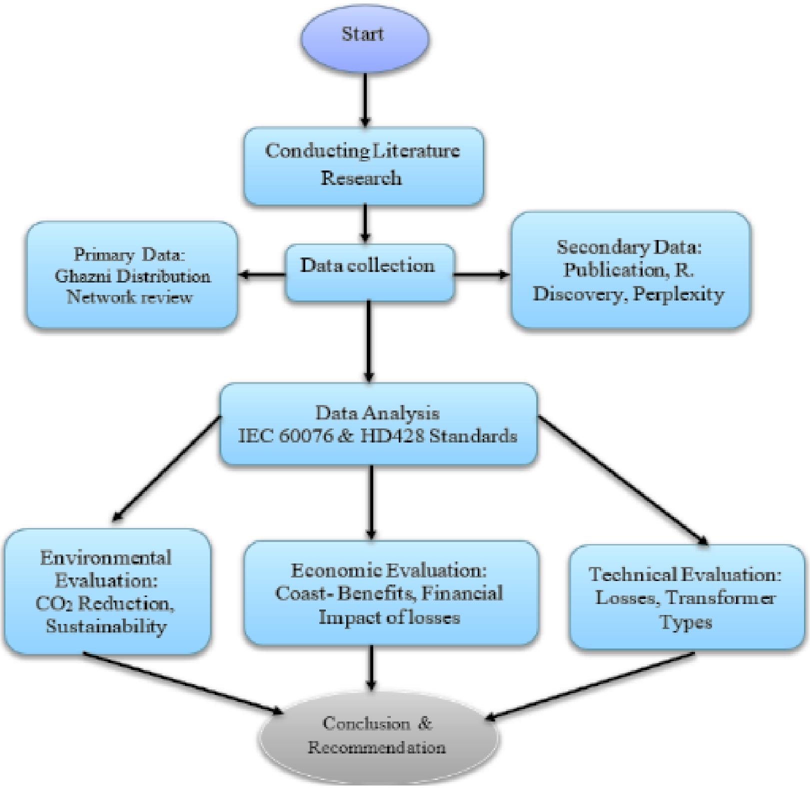


Fig. (1) Research methodology flowchart

3.2 Ghazni Province Electricity Network

The electricity distribution network of Ghazni province is supplied by imported power and managed by the Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS). This network is connected to the national electricity grid via 220 kV transmission lines. The transmission route extends from the Chamtala substation to the Arghandi substation, then to the Seyed Abad substation, and finally to the Rowza substation. From the Rowza substation, electricity is distributed to Ghazni city, while power is also transmitted to the provinces of Zabul and Kandahar.

Electricity distributed from the Rowza substation serves approximately 22,343 consumers in Ghazni province. Currently, the network has a capacity of about 12 MW, with a peak load of approximately 8 MW. To distribute this energy, 99 transformers of various capacities are in operation. If DABS supplies electricity to the entire Ghazni city and its districts, total consumption is estimated to reach around 100 MW.

At present, about 102 transformers are installed across Ghazni province, while only 30% of urban residents have access to state electricity services. It is estimated that a full electricity supply to the city would require approximately 100 MW of capacity. This situation highlights the need to improve network efficiency and reduce energy losses.

The transformers installed in the Ghazni electricity distribution network are shown in the first appendix (SLD), while their number and capacity are presented in the second figure.

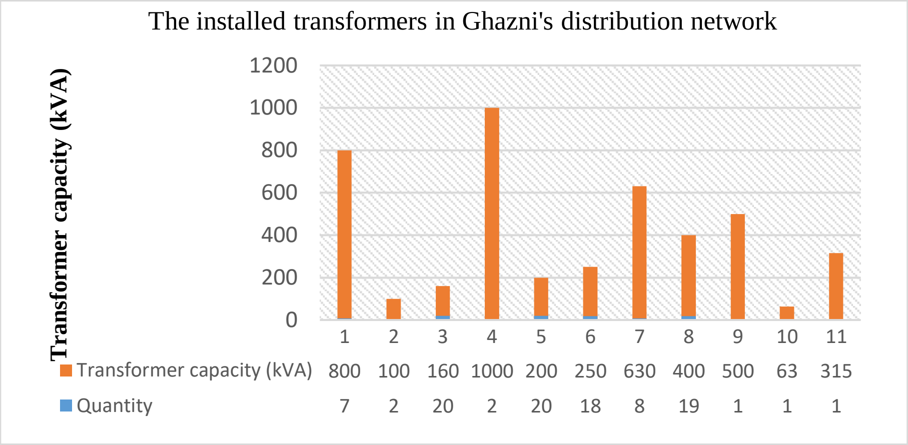


Figure 2: The installed transformers in Ghazni's distribution network

3.3Low-Loss Transformers

Low-loss transformers, also referred to as energy-efficient or amorphous core transformers, are designed to minimize energy losses during operation and enhance the overall efficiency of electricity distribution networks. These transformers employ advanced core materials, such as amorphous alloys, which have a non-crystalline structure and significantly reduce magnetic core losses, including hysteresis and eddy current losses [Charalampopoulos, Papagiannis, & Karakatsanis, 2017]. Additionally, optimized winding design and the use of high-quality copper conductors reduce copper losses and further improve energy efficiency [Mahdavi & Akbari, 2023].

Although the initial cost of low-loss transformers is higher than that of conventional silicon steel core transformers, long-term operational savings, reduced carbon emissions, and increased network reliability provide significant economic benefits [Hasanzadeh, 2020; Khorasani, 2022]. The implementation of these transformers is particularly important in both developed and developing regions to enhance network performance and ensure sustainable electricity distribution.

Table 1: Standard Copper and No-Load Losses for Distribution Transformers (IEC 76 / HD 428)

Rated Power Of Transformer (kVA)	Copper Losses * Pcu(W)			No-load Loss Po (W) **		
	A	B	C	A'	B'	C'
25	700	810	550	135	110	95
50	1100	1350	875	190	145	125
75	1425	1750	1175	255	203	168
100	1750	2150	1475	320	260	210
125	2000	2545	1695	380	310	247
160	2350	3100	2000	460	375	300
200	2760	3600	2350	550	445	355
250	3250	4200	2750	650	530	425
315	3850	5000	3250	780	625	500
400	4600	6000	3850	930	750	610
500	5450	7100	4550	1100	875	720
630	6750	8700	5600	1200	940	800
800	8500	10700	7400	1450	1150	940
1000	10500	13000	9500	1700	1400	1100
1250	13200	16000	11400	2100	1730	1300
1600	17000	20000	14000	2600	2200	1700

European Standard $HD428 -**\ \ IEC76 -*$

In order to evaluate the technical performance of distribution transformers, it is essential to accurately estimate their no-load energy losses. No-load losses occur in the magnetic core due to hysteresis and eddy currents and remain almost constant regardless of the loading condition. These losses directly affect the long-term efficiency and economic performance of the distribution network. The total no-load energy loss over a given period can be calculated using the first equation: [Samani & Karami Kharkeshi, 2015]

$$W_t = \sum_{i=1}^{n} P_{0i} \times t \tag{1}$$

$t = 8760\ hour$Loss calculation period (hours)

W_t- Total no-load Energy losses

P_{oi}- Total no-load losses of the installed transformers with capacity i

i- Installed transformer capacities (e.g., 1200 kVA, 800 kVA)

According to standard 9, the A−B′ combinations have the lowest efficiency, while the C−C′ combinations exhibit the highest efficiency. Using the first table, we can calculate the standard no-load and load losses of the installed transformers in Ghazni province for one year:

Table 2: No-Load Losses of Existing Transformers in the Network by Core Type

Transformer Type	No-Load Losses (kWh)
Existing transformers in the network	660,766.8
Existing transformers with A–B′ cores	531,951
Existing transformers with A–C′ cores	431,736.6

Note. The table shows the annual no-load energy losses for transformers in the network under different core types.

Assuming the useful life of each electrical transformer is approximately 30 years, the total no-load losses over a single operational period are equal to:

Table 3: Typical No-Load Losses of Existing Transformers in the Network by Core Type

Transformer Type	No-Load Losses (kWh)
Existing transformers in the network	19,823,004
Existing transformers with A–B′ cores	15,958,530
Existing transformers with A–C′ cores	12,952,098

Note. This table shows the annual typical no-load energy losses of transformers in the network with different core types.

3.4 Economic losses to Ghazni's electricity network due to no-load losses

Assuming the average cost of one kilowatt-hour (kWh) of energy is 10 Afghanis, the annual financial loss caused by no-load losses is calculated as:

$$R_t = W_{tAA'} \times R_i \qquad (2)$$

R_t- Real cost of energy losses due to no-load losses (per year).

R_i- Average cost of electricity production

In the case of using conventional core transformers:

$$\sum AFG_{t.NL.loss} = \Delta P_{NL.t} * price\ of\ 1kWh = 660{,}766.8 * 10 = 6{,}607{,}668 Afganies$$

In the case of using low-loss A−B′ core transformers:

$$\sum AFG_{t.NL.loss} = \Delta P_{NL.t} * price\ of\ 1kWh = = 531{,}951 * 10 = 5{,}319{,}510 Afganies$$

In the case of using low-loss A−C′ core transformers:

$$\sum AFG_{t.NL.loss} = \Delta P_{NL.t} * price\ of\ 1kWh = 431{,}736.6 * 10$$
$$= 4{,}317{,}366 Afganies$$

3.5 The technical assessment of using low-loss transformers

From a technical perspective, reducing losses has various implications, including a decrease in investment required for generation, transmission, and distribution, an increase in network reliability, an extension of equipment lifespan, and a reduction in environmental pollutants [Cui, 2019]. Considering the characteristics of Ghazni province's distribution network and the total energy injected into the network by the end of 2023, which amounted to 42,956.566 MWh, with total losses of 11.3%, it can be stated that the no-load losses of the installed transformers across the province accounted for approximately 1.42% of the total electrical energy consumption in the province in 2023.

Calculate total losses

$$Total\ Losses = 42956.566 \times 0.113 \approx 4855.78\ \text{MWh}$$

Current no-load losses

$$No\ load\ Losses = 42956.566 \times 0.0142 \approx 609.54\ \text{MWh}$$

By using low-loss transformers of type A–B′, the no-load losses can be reduced to ≈ 12.7٪.

$$\frac{609.54 - 531.951}{609.54} \times 100 \approx 12.7\%$$

By using low-loss transformers of type A–C′, the no-load losses can be reduced to ≈29.2%

$$\frac{609.54 - 431.736}{609.54} \times 100 \approx 29.2\%$$

The significance of this topic lies in the fact that no-load losses occur at all times (both peak and off-peak); therefore, their reduction has a more pronounced impact during peak periods.

3.6 Environmental impacts of low-loss transformers

According to the International Energy Agency (IEA) report, on average, the consumption of one kilowatt-hour of energy results in the emission of 600 mg of carbon dioxide (CO_2).

Therefore, in the case of using conventional core transformers:

$$660{,}766.8 * 0.0006 = 396.46008\ kg$$

In the case of using low-loss AB′ core transformers:

$$531{,}951 * 0.0006 = 319.1706\ kg$$

In the case of using low-loss AC′ core transformers:

$$431{,}736.6 * 0.0006 = 259.04196\ kg$$

4. Conclusion

Based on the calculations of this study, replacing conventional transformers in Ghazni's distribution network with low-loss transformers provides significant economic and environmental benefits. Considering the current situation, where only about 30% of the population has access to the national grid, using AB′ type low-loss transformers could reduce no-load losses by approximately 12.7%, save around AFN 38.6 million, and decrease CO_2 emissions by 2,318 tons over a 30-year operational period. The adoption of AC′ type transformers could further reduce no-load losses by about 29.2%, increase savings to AFN 68.7 million, and reduce CO_2 emissions by 4,123 tons.

If all residents of Ghazni were connected to the national grid, the financial gains for the electricity provider from using low-loss transformers would nearly triple, with savings of about AFN 125 million for AB′ type and AFN 205 million for AC′ type transformers. Correspondingly, CO_2 emission reductions would also triple, demonstrating a major positive environmental impact.

These results highlight that low-loss transformers not only ensure financial benefits for the utility but also play a crucial role in network expansion, improving energy efficiency, mitigating the negative effects of climate change, and supporting the establishment of a sustainable energy distribution system.

5. Recommendations

1. Short-term plans (1–5 years):

Install low-loss transformers in newly developed areas of the network.

Monitor the performance of installed transformers regularly to ensure energy savings and operational efficiency.

2. Medium-term plans (5–15 years):

Gradually replace existing conventional transformers with low-loss units.

Develop a clear budget and financial plan for network expansion and transformer replacement.

3. Long-term plans (15–30 years):

Replace all existing conventional transformers with low-loss transformers.

Set strategic goals to reduce energy losses and CO_2 emissions across the entire network.

4. Professional team and standards:

Establish a dedicated, professional team within the electricity company for transformer evaluation.

Apply international standard testing and quality assurance procedures for transformer selection and installation. Mandatory monitoring and reporting of low-loss transformer performance at all stages of the network.

5. Environmental considerations:

Plan and operate all network activities according to climate change mitigation and sustainable energy principles.

Conduct annual analyses of CO_2 reduction reports and integrate findings into strategic planning.

6. Plans for an expanding network:

If all residents are connected to the national grid, plan low-loss transformer installations based on population demand and network capacity.

In this scenario, financial and environmental benefits would triple compared to the current situation, providing a strong foundation for long-term strategy.

Acknowledgement

This study does not contain any studies with human or animal subjects performed by any of the authors.

Ethical Statement

This study does not contain any studies with human or animal subjects performed by any of the authors.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest in this work.

Data Availability Statement

Data are available on request from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution Statement

Massoud Danishmal: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Project administration. Dost Mohammad Sarwari: Writing – review & editing, Resources. Mohammad Yasin Kamali - Writing – review &

editing, Atiqullah Hamim: review & editing, Mohammad Adel Adil: review & editing.

6. References

Abbasi, M., Rezaei, P., & Shariati, A. (2022). Thermal, mechanical, and magnetic stress analysis for durable amorphous cores in transformers. International Journal of Electrical Engineering, 65(3), 210–225.

Ahmad, S., & Khan, M. (2019). Electricity distribution challenges in developing countries: A case study of Afghanistan. Journal of Energy Studies, 12(3), 45–56.

Aslani, A., & Kargar, R. (2023). Hybrid bonding techniques for improving the mechanical stability of amorphous transformer cores. IEEE Transactions on Magnetics, 59(4), 1–9.

Charalampopoulos, I., Papagiannis, G., & Karakatsanis, T. (2017). Loss reduction in distribution networks using amorphous core transformers. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 89, 123–130.

Cui, Y. (2019). Magnetic properties of amorphous alloys for transformer applications. Journal of Materials Science, 54(8), 6100–6115.

Fazel, M., Abbasi, S., & Kargar, H. (2023). Microscopic and multiphysics modeling of transformer core losses. Energy Conversion and Management, 270, 116–128.

First Philec. (2024). Amorphous core transformer technology overview. Philec Technical Report, 12(1), 5–14.

Ghasemi, A., Shariati, H., & Najafi, B. (2023). Simulation-based comparison of high-resistance silicon steel and amorphous materials in distribution transformers. Journal of Electrical Engineering Research, 41(2), 88–102.

Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2016). Power system analysis and design (6th ed.). Cengage Learning.

Hasanzadeh, M. (2020). Performance evaluation of amorphous core transformers in power distribution networks. Energy Reports, 6, 210–220.

Huang, L. (2025). Economic analysis of amorphous core transformer deployment. Journal of Sustainable Energy, 18(1), 45–59.

Jin, X., Wang, Y., & Li, H. (2024). Advances in transformer cooling and amorphous materials. IEEE Transactions on Power Delivery, 39(2), 987–995.

Khorasani, R. (2022). Efficiency improvement in power transformers using ester oils and advanced cores. Energy Reports, 8(1), 450–462.

Khorasani, R. (2022). Carbon emission reduction via amorphous core transformer implementation. Energy Policy, 158, 112–123.

Kumar, A., Singh, P., & Yadav, R. (2020). Power loss reduction techniques in electrical distribution systems: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119(1), 109–121.

Li, X., Wang, Y., & Chen, Z. (2022). Material properties of amorphous alloys for low-loss transformers. Journal of Materials Science, 57(3), 3050–3065.

Lu, J., Tan, H., & Liu, S. (2025). Magnetic properties and low-loss performance of amorphous transformer cores. IEEE Transactions on Power Delivery, 40(1), 120–132.

Mahdavi, A., & Akbari, H. (2023). Design optimization of transformer windings for copper loss minimization. International Journal of Electrical Machines, 45(2), 200–215.

Mahdavi, A., & Akbari, M. (2023). Copper loss minimization in transformer design. Electrical Engineering Journal, 42(2), 175–190.

Moradi, R. (2022). Hysteresis and eddy current losses in conventional silicon steel transformers. Journal of Electrical Machines, 49(2), 145–160.

Moradi, R., Rezaei, P., & Shariati, A. (2023). Operational characteristics and thermal performance of amorphous transformers. International Journal of Power and Energy Systems, 47(3), 300–315.

Najafi, B., Ghasemi, A., & Shariati, H. (2015). Energy efficiency and environmental impact of amorphous core transformers. Renewable Energy Review, 45, 310–320.

Pourleroi, M. (2024). Advances in amorphous core transformer technology. Energy Materials Journal, 12(2), 55–66.

Senturk, H., Kaya, E., & Demir, F. (2017). Efficiency analysis of amorphous core distribution transformers. EE Access, 5, 16570–16577.

Sharma, P., & Verma, S. (2021). Sustainable approaches for energy efficiency in power systems. Journal of Cleaner Production, 278(1), 123–140.

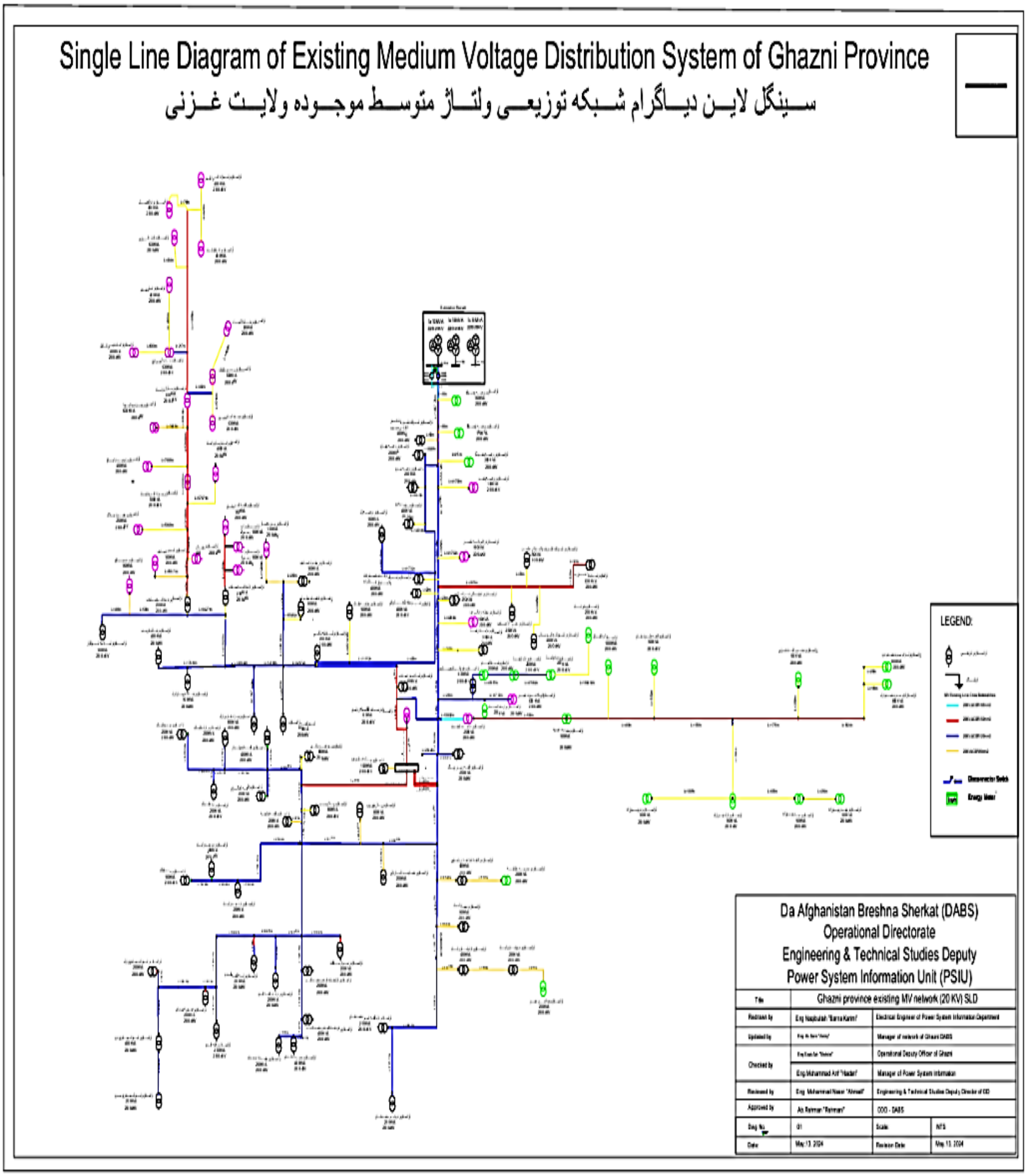
Shariati, H., & Ahmadi, P. (2021). Application of amorphous core transformers in rural distribution networks. Journal of Sustainable Energy Engineering, 13(4), 200–215.

Singh, R., Patel, K., & Joshi, M. (2022). Core loss analysis in distribution transformers. International Journal of Energy Research, 46(7), 5678–5691.

Zhao, L., Chen, X., & Wu, Z. (2023). Dielectric losses and leakage in modern transformers: Challenges and solutions. IEEE Access, 11(1), 4520–4533.

Zorbas, D. (2014). Electric machines: Principles, applications, and control schemes. Academic Press.

International Energy Agency. (2023). CO_2 emissions from electricity generation by country. Paris: IEA[31] Samani, S. A., & Karami Kharkeshi, M. (2015). *The role of low-loss transformers in reducing energy losses in the electricity distribution network of North Khorasan*. 20th Electric Power Distribution Conference, Zahedan.



Long-term forecasting of residential electric load for the Wazirabad area of Kabul city

Atiqullah Hamim [1*], Amin Gul Hanif [1], Fazal Hamid Habibi [2], Massoud Danishmal [1]
1 Electrical Power Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan.
1 Electrical and Electronic Engineering Department, Kabul University, Afghanistan.
2 Electrical Power Engineering Department, Shekh Zayeh University, Afghanistan
*Corresponding author: Atiqullah Hamim, Electrical Power Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan.
Email: atiqhamim286@gmail.com

Abstract:

This study's goal is to use the Prophet time series model to forecast the electric load for Kabul's Wazirabad neighborhood. Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS) provided historical electricity usage data for the previous three years (from early 2021 to early 2024) for this purpose. Monthly electricity usage records and the dates they corresponded to were included in the collection. The data was cleaned, preprocessed, and arranged chronologically before being examined for seasonal and long-term trends. The findings showed that power usage has been rising gradually over time, which is consistent with both historical data and projections until 2027. According to the report, the primary causes of the region's rising energy demand are population expansion and the growing use of electrical equipment. According to the seasonal decomposition, summertime power demand, especially in April, is at its highest because of the higher temperatures that encourage the widespread use of cooling systems. On the other hand, autumn is when consumption is at its lowest. Electricity demand rises once more throughout the winter, mostly as a result of people using heating gadgets to cope with the lower temperatures. These seasonal patterns were successfully identified and replicated using the Prophet model. However, a known feature of the model is the widening of the uncertainty interval in the long-term forecast, which suggests a decrease in confidence in estimates for the far future. In the end, the research's conclusions can be a useful tool for Kabul city's energy demand management and planning, especially for assisting with supply and infrastructure development decision-making.

Keywords: *Load Forecasting, Long-term forecasting, time series, Energy Consumption, and Prophet model*

1. Introduction

"بِسمِ اللّهِ الرَّحمنِ الرَّحیمِ الحَمدُ لِلّهِ رَبِّ الْعَالَمِینَ والصَّلاةُ والسَّلامُ عَلَيَّ سَيِّدِ المُرسَلِینَ وَ عَلَيَّ آلِهِ وَ اصحابِهِ اجمَعینَ."

Electrical load forecasting is used by electric power generation companies to estimate the total power needed to supply customers. It helps electrical power facilities make important decisions, decreasing power production costs, and increasing the power facility's accuracy (Ibrahim Salem Jahan 1, 2020). For power systems to remain stable and efficient, electrical energy demand must be accurately forecasted. While an underestimate might result in supply constraints and even power outages, an overestimation of demand could result in needless energy production and higher operating costs. (Teleron, 2025)One of the most important aspects of power systems' economic functioning is the forecasting of electricity loads, and precise load forecasting offers electric transmission companies significant cost savings. When load forecasting is used to manage operations and choices like fuel allocation, unit commitment, maintenance, and economic dispatch, the greatest advantages may be realized. (Hambali, 2016)The electrical system network has failed because of a lack of attention to load predictions; in Kabul, Afghanistan, for example, more than 100 out of 852 DTs have already been overloaded, and transformer fires and explosions have escalated (Sharifi, 2009).

Electric load forecasts can be grouped into three types based on the planning perspective of the duration:

- Very Short-Term Load Forecasting: VSTLF is well-known for providing load estimates in intervals of a few minutes to an hour. Given that the VSTLF forecasts the near future, several load forecasting parameters are conditional, but primarily temperature and time are taken into account, with present values being explored to predict future ones.
- Short Term Load Forecasts (STLF): This is usually for one hour up to one week. (Hambali, 2016)The short-term load forecasting ranges from several hours to several days. As the range gets smaller, the more complicated model arises. The ultra-short-term load forecasting, which usually varies from several minutes to several hours, is the most complicated one. The application of STLF includes the following areas (Sharifi, 2009).

    - Generation Scheduling

    - Power System Security: Short-term load forecasting secures the operation of the power system before any hazards emerge

- Power Generation Reserve of the System. The system's power generation reserve is crucial in protecting against deficiencies in the event of a plant failure or an abrupt rise in load. STLF can predict a suitable level of reserve.
- Providing Information to Dispatchers: A dispatcher would need the real-time information pertinent to short-term loads for the system to operate as economically as possible.
- For the purpose of scheduling sufficient and cost-effective energy transactions in industrialized nations, system operators, market operators, transmission owners, and other participants are very interested in STLF.

So far, various models have been proposed for Short-Term Load Forecasting (STLF) based on different approaches, such as statistical models, including autoregressive models, regression analysis, and the Holt-Winters model. These models are effective when the input and output are linear; however, their effectiveness decreases under nonlinear conditions (EenjunHwang, 2021).

- Medium Term Load Forecasts (MTLF): predictions with a one-month to one-year time range are referred to as medium-term load forecasts. MTLF's goal is to increase power companies' capacity to evaluate contracts and assess different advanced financial instruments that the market offers on energy prices (Sharifi, 2009). In nations where electric utilities began operating in a deregulated environment ten years ago, MTLF became a crucial instrument. Furthermore, MTLF has grown in significance over the last several decades due to the reliability component, as its major goals are maintenance scheduling and cost-effective power system management, both of which are directly related to dependability (Swasti R. Khuntia1, 2016).
- Long-term load forecast (LTLF): When it comes to power systems, LTLF is crucial for system planning, scheduling, and generating unit growth through construction and acquisition. It ranges from a few years (more than a year) to ten to twenty years. (Swasti R. Khuntia1, 2016) The importance of this type of forecasting becomes evident when the construction of a new power plant is under consideration. (Sharifi, 2009) Since the construction of electrical infrastructure takes years and requires significant investment, electric load forecasting must also be carried out with high accuracy. Until now, as much work has not been done in the area of Long-Term Load Forecasting (LTLF) as in Short-Term Load Forecasting (STLF), because LTLF forecasting is complex and there are also challenges in data collection and analysis (Swasti R. Khuntia1, 2016). In this paper, we have conducted a three-year electric load forecast for the Wazirabad

area of Kabul city, Afghanistan, which falls under the category of Long-Term Load Forecasting (LTLF).

The types of electrical load forecasting are shown in Figure 1 (Abdul Azeem1, 2017).

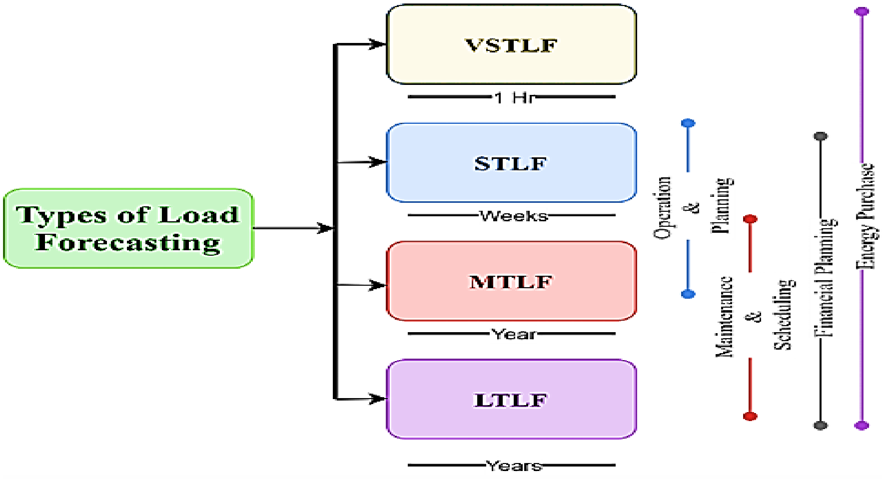


Figure 1: Electrical load forecasting categories concerning different time zones and defining respective operational domains.

In this research, I am conducting a residential load forecast in the Wazir Abad Maina area of Kabul city. This forecast is based on the residential electricity consumption over the past three years and is projected for the next three years in order to determine how the residential electrical load will change in this area. The goal is to understand future consumption trends so that the government can take necessary measures if required.

2. Literature Review

Long-term forecasting refers to the process of predicting future events or values over an extended time horizon, which is critical for strategic planning in various fields such as business, energy, healthcare, and transportation. It differs from short-term forecasting by focusing on longer time frames, which introduces challenges such as increased uncertainty and error propagation.

Methods for long-term forecasting range from classical statistical models to advanced machine learning and deep learning techniques. Classical approaches often struggle to capture complex, nonlinear patterns inherent in real-world data. Modern models, including recurrent neural networks (RNNs), long short-term memory (LSTM) networks, and transformer-based architectures, have been developed to address these limitations by learning intricate temporal dependencies. For instance, transformer

models have been employed in time series forecasting, but require specific embedding strategies to preserve temporal information and manage computational complexity (Milind Kolambe, 2024).

In specialized applications such as wind speed and power forecasting, long-term predictions are essential for integrating renewable energy into power grids. Various forecasting methods—including statistical, machine learning, and hybrid models—have been explored to improve accuracy and accommodate the variability of wind over monthly to multiyear horizons. Despite advancements, challenges such as model complexity, regional variability, and data limitations persist. Enhancing forecast resolution and fostering interdisciplinary collaboration are identified as future directions in this domain (Hiraga, 2025).

In business contexts, long-term forecasting supports strategic decision-making, such as anticipating product demand while addressing phenomena like product cannibalization, where high sales of one product reduce the sales of another. Machine learning frameworks, including XGBoost-based multi-stage models, have been proposed to mitigate long-term error propagation and improve forecast reliability over extended periods (Gautham Bekal, 2021).

Healthcare applications also benefit from long-term forecasting, for example, in multi-step prediction of blood glucose trajectories, where modeling the distribution of future values simultaneously reduces error propagation common in successive forecasting steps. Deep multi-output models have shown superior performance in capturing signal dynamics over long horizons (Wiens, 2018).

Despite technological progress, long-term forecasting remains challenging due to error accumulation, data limitations, and the intrinsic unpredictability of certain phenomena. Best practices include combining multiple data-processing methods, leveraging hybrid models, and integrating uncertainty modeling to provide more robust forecasts. Continuous evaluation, especially with domain-specific datasets, is crucial to validate model performance and ensure reliability in practical applications (Allende-Cid, 2025).

In summary, long-term forecasting encompasses a broad spectrum of methods and applications, with ongoing research focused on enhancing model robustness, accuracy, and applicability in diverse domains ranging from renewable energy integration to strategic business planning and healthcare management. Due to the complexity and variability inherent in long-term predictions, hybrid approaches

combining statistical and deep learning techniques along with domain knowledge integration are emerging as effective solutions.

3. Research Methodology

The research methodology was carried out in the following way:

3.1. Data Gathering

The national power utility of Afghanistan, Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS), provided the data utilized in this analysis. The last three years, or 36 months, are covered by this dataset. The data is arranged in a time series manner with a monthly structure and comprises monthly electricity consumption and the dates that correspond to it.

There are two columns in the dataset. The quantity of electricity used (in kWh, or kilowatt-hours) is displayed in one column. The date of consumption is shown in the other column. The period covered by this dataset is March 2021–February 2024.

Table 1: Energy Consumption and It's date at last three years

Year/ ds	Energy Consumption(kWh)/Y	Year/ ds	Energy Consumption(kWh)/Y
3/21/2021	543530	9/23/2022	484744
4/21/2021	558760	10/23/2022	435590
5/22/2021	451765	11/22/2022	549662
6/22/2021	364436	12/22/2022	529554
7/23/2021	413496	1/21/2023	468077
8/23/2021	445814	2/20/2023	548092
9/23/2021	411759	3/21/2023	523446
10/23/2021	461596	4/21/2023	591098
11/22/2021	547169	5/22/2023	491577
12/22/2021	519320	6/22/2023	539248
1/21/2022	545246	7/23/2023	539248
2/20/2022	731467	8/23/2023	442683
3/21/2022	458434	9/23/2023	429100
4/21/2022	458435	10/23/2023	446446
5/22/2022	381212	11/22/2023	529137
6/22/2022	412451	12/22/2023	557830
7/23/2022	442531	1/20/2024	620407
8/23/2022	484744	2/2/2024	632808

3.2 METHODOLOGY

In order to predict the electrical load, we examined data from the previous three years, which included electricity usage and the dates that corresponded to it. The Prophet model was used for this load forecasting. Facebook's Core Data Science team created Prophet, an open-source time series forecasting tool. It works especially well with time series that exhibit strong seasonal trends and datasets that span several years.

As stated before, the data used here spans the last three years or 36 months. A few preprocessing processes had to be completed before the data could be analyzed. These included using outlier identification and smoothing to avoid distorting trends and seasonal patterns, as well as utilizing linear interpolation to deal with missing numbers. Furthermore, the datetime format needed to be set up so that Prophet could quickly identify the consumption date as ds and the power consumption column as y.

Architecture of the Model: Additive. The forecasting prophecy uses the following formula to model the time series as an additive mixture of components:

$y(t)=g(t)+s(t)+h(t)+\epsilon t$

Where:

- **g(t):** Trend function representing non-periodic changes in the time series.
- **s(t):** Seasonality function capturing yearly, weekly, and optionally daily patterns.
- **h(t):** Effects of holidays or other special events (not included in this model).
- **ϵt:** epsilon_tϵt: Error term capturing residual noise.

We incorporated both yearly and monthly seasonality in the model to capture cyclic variations in electricity load due to climate changes, user behavior, and operational patterns. Because of the daily resolution and the absence of distinct weekly patterns in the data, weekly seasonality was not used.

4. FINDINGS

Following data analysis, the following electrical load forecasting graphs were produced. Without accounting for daily or seasonal variations, the trend graph (shown in Figure 2) depicts the general trend in electricity usage over time. Time is shown by the horizontal axis (ds), which runs from 2021 until the beginning of 2027. The amount of electricity consumed is displayed on the vertical axis (trend). The trend that the Prophet model anticipated based on the last three years of data is shown by the dark blue line. The uncertainty interval (with a 95% confidence level) is shown by the light blue shaded area surrounding the trend line. This means that there is a 95% likelihood that the future power load will fall within this range.

It can be seen that the forecasted load is gradually increasing. This is because the number of consumers in the given data increases year by year, as shown in Figure 3. The electrical load from the year 2021 to 2027 is presented in Table 3.

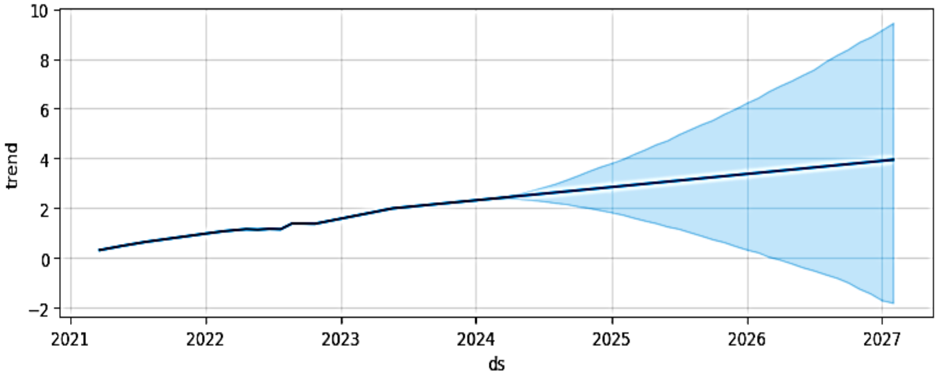


Figure 2: Trend (Energy Consumption Forecast for Three Year

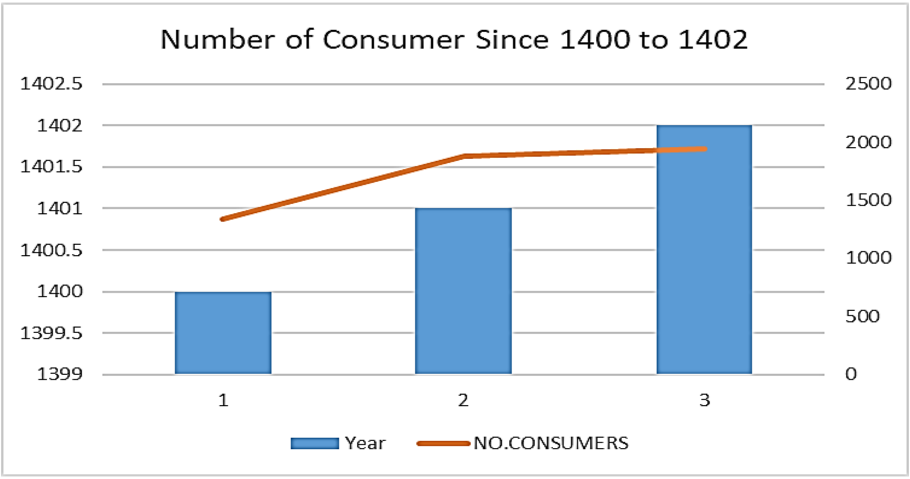


Figure 3: Number of Consumers from 1400 to 1402

Table 2: Existing Load and Forecasted Load

Date	Energy Consumption/MWh
2021	0.5
2022	1.3
2023	2
Forecasted Consumption	
2024	2.7
2025	3.6
2026	4

The graph shown in the corresponding figure illustrates the yearly seasonal pattern of the electricity load.

- The horizontal axis represents the days of the year, starting from January 1st and continuing through December 31st.
- The vertical axis shows the seasonal effects, which reflect the average variation in electricity consumption throughout the year.

From the graph, it is evident that electricity consumption reaches its peak during the summer season, specifically from mid-March to mid-April. This increase is primarily due to hot weather, during which people make extensive use of cooling devices.Figure(4)

After mid-April, the electricity consumption begins to decline as the weather becomes cooler. During the autumn season, from July to September, electricity usage reaches its lowest levels. The reason is that temperatures are relatively moderate during this period, and as a result, there is less reliance on heating or cooling appliances. However, toward the end of autumn and throughout the winter season, electricity demand begins to rise again due to colder weather.

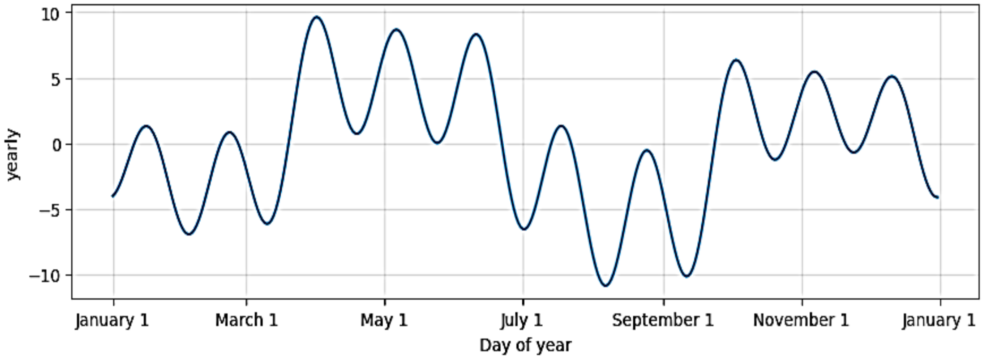


Figure 4Seasonal Energy Consumption

temperatures, as people increasingly use heating systems. These seasonal fluctuations occur regularly each year, and the Prophet model has been able to accurately capture these recurring patterns.

As the weather cools off after the middle of April, power use starts to decrease. The fall months of July through September are when electricity use is at its lowest. The rationale for this is that there is less need for heating or cooling equipment because the temperatures are often mild during this time. However, as temperatures drop and more people turn to heating systems, the demand for power starts to increase once more in the late fall and early winter.

5. Conclusion

This research specifically focuses on forecasting the residential electrical load in the Wazirabad area of Kabul city. For this purpose, a modern method called the Prophet model has been used. The results show that the residential electricity consumption in the Wazirabad area has an upward trend. This increase in electrical load has several reasons, including population growth and the rising use of household electrical appliances.

The available data indicates that the residential electrical energy consumption in this area was approximately 0.5 MWh in 2021, while the forecasted load for 2026 is around 4 MWh. It was also observed that the pattern of electricity consumption varies across the seasons. During winter and summer, energy consumption reaches its peak due to the increased use of heating and cooling devices in homes. In contrast, during spring and autumn, when the weather is moderate, energy consumption decreases.

Overall, it can be concluded that residential energy consumption in this area will continue to show an upward trend over the next three years.

6. Recommendations

The research results show that residential electrical energy consumption has an upward trend, meaning it is gradually increasing. The findings indicate that the load consumption rises from 0.5 MWh to 4 MWh, which represents a significant increase. Therefore, the relevant authorities should consider this issue, assess the capacity of the existing network, and be prepared for the forecasted conditions.

References

Abdul Azeem1, I. I. (2017). Electrical Load Forecasting Models for Different Generation Modalities: A Review. *IEEE Access*.

Allende-Cid, E. V. (2025). Long Shortâ€• Term Memory Wavelet Neural Network for Renewable Energy Generation Forecasting. *International Journal of Intelligent Systems*.

EenjunHwang, J. P. (2021). A Two-Stage Multistep-Ahead Electricity Load Forecasting Scheme Based on LightGBM and Attention-BiLSTM. *Sensors*.

Gautham Bekal, M. B. (2021). An XGBoost-Based Forecasting Framework for Product Cannibalization.

Hambali, M. A. (2016). Electric Power Load Forecast Using Decision Tree Algorithms. *Computing, Information Systems, Development Informatics & Allied Research Journal, 7,* 29-42.

Hiraga, J. M. (2025). Recent Advances in Long-Term Wind-Speed and -Power Forecasting: A Review. *Climate*.

Ibrahim Salem Jahan ,. (2020). Intelligent Systems for Power Load Forecasting: A Study Review. *Energies*.

Milind Kolambe, S. A. (2024). Forecasting the Future: A Comprehensive Review of Time Series Prediction Techniques. *Journal of Electrical Systems*.

Sharifi, M. S. (2009). *Electric Residential Load Growth in Kabul City, Afghanistan for Sustainable Situation.* Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

Swasti R. Khuntia1, J. L. (2016). Forecasting the load of electrical power systems in mid- and long-term horizons: a review. *IET, 10*(16), 3971–3977.

Teleron, J. I. (2025). Electrical Energy Demand Forecasting using Time Series in LSTM and CNN-LSTM Models in Deep Learning Applications. *Journal of Information Systems Engineering and Management*.

Wiens, I. F.-B. (2018). Deep Multi-Output Forecasting: Learning to Accurately Predict Blood Glucose Trajectories. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, 2018*.

Energy Assessment and Economic Evaluation of Fixed-Tilt and Tracking Solar Photovoltaic Systems for Enhanced Energy Yield and Cost-Effectiveness

Wahidullah Zgham*[1], Massoud Danishmal[2], Samiullah Popal[1], Dost Mohammad Sarwari[2], Khalilullah Haqfal[1], Zarbat Shah Ulfat[1]

1 Energy Engineering Department, Electro-mechanic Faculty, Ghazni Technical University

2 Electric Power Engineering Department, Electro-mechanic Faculty, Ghazni Technical University

*Corresponding author: Wahidullah Zgham, Energy Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan. Email: zghamafg@gmail.com ORCID: 0009-0004-2768-3769

Abstract

This study investigates the performance of fixed-tilt and tracking solar photovoltaic (PV) systems in a cold semi-arid climate, with a case study in Kabul. The main objective of this study is to compare the energy production, efficiency, and economic performance of different PV system configurations to identify the most efficient and cost-effective option. Six systems were analyzed, including three fixed-tilt angles (latitude, latitude +13°, and latitude −13°), single-axis tracking (north–south and east–west), and dual-axis tracking systems. The analysis was carried out using PVsyst with solar radiation and climate data obtained from NASA SSE satellite databases. A 5 kWp mono-crystalline PV system was used as the reference model for all simulations to ensure consistent comparison. The results show that tracking systems significantly improve energy production compared to fixed-tilt systems. The dual-axis tracking system achieved the highest energy output, followed by the east–west tracking system. However, tracking systems also showed higher system losses and costs. Among all configurations, the east–west tracking system provided the best balance between energy yield and economic performance. The findings highlight that both technical and economic factors must be considered when selecting PV systems in cold semi-arid regions.

Keywords: Energy Assessment, Economic Evaluation, Fixed tilt, Tracking system, Solar PV system

1. Introduction

Photovoltaic (PV) technology for solar energy conversion is increasingly recognized as a promising solution to the growing global energy demand, with applications ranging from decentralized small-scale systems to large utility-scale installations (Kazem et al., 2024). PV modules are solid-state devices that directly convert incident solar irradiance into electrical energy through semiconductor-based processes (El Hammoumi et al., 2022). Despite significant technological advancements and ongoing research, the efficiency of commercially available PV modules remains limited, with the highest reported conversion efficiency reaching approximately 22.8% (Elbreki et al., 2021).

Solar energy is widely considered one of the most sustainable and environmentally friendly resources for future electricity generation (Awasthi et al., 2020; El Hammoumi et al., 2022) The continuous depletion of non-renewable energy resources has placed considerable pressure on conventional power systems, resulting in persistent electricity shortages and load shedding in many regions (Eiva et al., 2026) In addition, fossil fuel–based power generation emits large amounts of greenhouse gases and particulate matter, contributing to environmental pollution, global warming, and climate-related hazards (Awasthi et al., 2020; Eiva et al., 2026) Consequently, renewable energy technologies, particularly solar energy systems, have gained substantial attention as viable alternatives for sustainable electricity generation (El Hammoumi et al., 2022)

Afghanistan possesses considerable solar irradiance potential, providing favorable conditions for the deployment of photovoltaic systems to support electricity generation and energy sustainability (Irshad et al., 2026) Among the various PV system configurations, grid-connected systems are generally regarded as more efficient and reliable than off-grid and hybrid systems because of their capability to integrate with existing electrical infrastructure (Eiva et al., 2026) However, one of the major limitations of PV systems is their relatively low conversion efficiency and the variability in power output due to changing solar irradiance throughout the day and across seasons (Ahmadullah et al., 2026; AL-Rousan et al., 2018)

To overcome these limitations and improve energy production, several enhancement techniques have been developed, including maximum power point tracking (MPPT) controllers, cooling systems, cleaning mechanisms, floating PV systems, and solar tracking technologies (El Hammoumi et al., 2022) Among these approaches, solar tracking systems have attracted significant attention due to their ability to continuously adjust the orientation of PV modules toward the sun, thereby maximizing incident solar radiation and improving overall energy yield (El Hammoumi et al., 2022; Kazem et al., 2024)

The performance of photovoltaic power generation systems can be significantly enhanced through the integration of solar tracking technologies. These systems employ electromechanical actuators, typically driven by electric motors, to dynamically align PV modules with the sun's position throughout the day (Kazem et al., 2024) By maintaining optimal orientation, tracking systems help maximize the amount of solar irradiance received by the PV surface, resulting in improved electrical power generation and more stable energy output (AL-Rousan et al., 2018; Kazem et al., 2024).

Solar tracking systems are commonly categorized into single-axis and dual-axis configurations. In single-axis tracking systems, PV modules rotate along one axis, usually from east to west, to follow the apparent daily motion of the sun (AL-Rousan et al., 2018; Kazem et al., 2024). In contrast, dual-axis tracking systems enable movement along both horizontal and vertical axes, allowing more accurate alignment with the sun throughout the day and across different seasons (Kazem et al., 2024). Figure 1 illustrates the schematics of horizontal-axis, vertical-axis, and dual-axis tracking systems. The primary objective of these technologies is to maximize the utilization of available solar energy and improve the annual electrical energy generation of PV systems (Kazem et al., 2024).

Based on their control mechanisms, solar tracking systems are further classified into passive and active tracking systems (AL-Rousan et al., 2018; Kazem et al., 2024). Passive tracking systems utilize solar heat to move a fluid inside containers attached to the PV modules, enabling the modules to orient toward sunlight (AL-Rousan et al., 2018; El Hammoumi et al., 2022). In contrast, active tracking systems rely on electrical and mechanical components such as motors, gears, sensors, and control units to continuously align PV modules with solar radiation. Each tracking method presents specific advantages and limitations related to installation complexity, maintenance requirements, reliability, energy consumption, operational cost, and system efficiency (AL-Rousan et al., 2018; Kazem et al., 2024)

Several studies have investigated the performance improvement achieved through solar tracking technologies (Awasthi et al., 2020). However, most previous research has primarily focused on the technical enhancement of individual tracking systems without conducting comprehensive comparative assessments between multiple fixed-tilt and tracking configurations under identical climatic and operational conditions (Kazem et al., 2024) Furthermore, limited studies have simultaneously evaluated both the energy performance and economic feasibility of different PV configurations, particularly in Afghanistan, where solar energy applications remain relatively underexplored (El Hammoumi et al., 2022; Irshad et al., 2026) Existing research has also largely concentrated on one or two tracking methods, while broader comparisons among several tracking configurations are still limited.

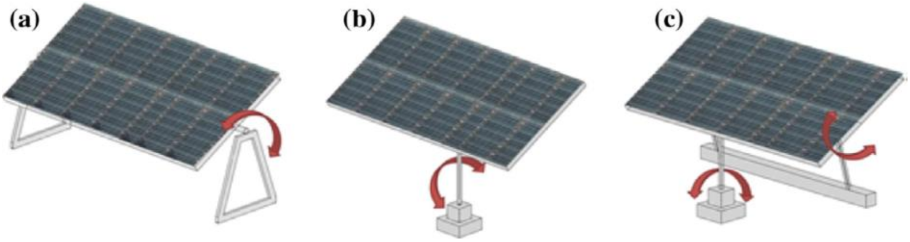


Figure 1: Schematics of a) horizontal axis, b) vertical axis, and c) dual-axis tracking system.

Tracking-based PV systems may also present certain practical challenges. Since tracking panels receive higher levels of direct solar irradiance, the operating temperature of PV cells may increase, potentially reducing module efficiency. Moreover, the continuous movement of tracking panels may contribute to greater dust accumulation due to varying orientations. These operational aspects require further investigation in separate studies.

Therefore, the novelty of this study lies in its comprehensive comparative assessment of six different photovoltaic system configurations, including both fixed-tilt and solar tracking systems, under identical environmental and operational conditions. Unlike earlier studies that mainly focused on energy enhancement alone, this research integrates both technical and economic evaluations to identify the most optimized and cost-effective PV configuration. The study specifically investigates the influence of different tracking mechanisms on annual energy production, system efficiency, and economic indicators related to investment optimization and cost-effectiveness. In addition, this research contributes to the limited literature on solar tracking systems in Afghanistan by providing a region-specific assessment based on local solar irradiance conditions and practical deployment considerations.

2. Literature Review

The existing literature highlights the importance of optimizing solar photovoltaic (PV) systems for enhanced energy yield and economic performance, especially in specific climatic and geographic contexts (Eiva et al., 2026) Studies emphasize the impact of environmental factors like humidity and temperature on PV performance, noting that high operating temperatures can reduce module efficiency and that humidity can lead to a thin layer of water forming on panel surfaces (El Hammoumi et al., 2022) In contrast, research focuses on the significance of tilt angle optimization, demonstrating that site-specific adjustments such as the annual optimum tilt angle of 29.25° identified for northern India are necessary to maximize energy yield (Sinha & Chandel, 2016a) These findings underscore the critical role of site-specific tilt

adjustments in fixed-tilt systems to capture maximum solar radiation (Kazem et al., 2024; Sinha & Chandel, 2016b)

Additionally, economic evaluations reveal that fixed-tilt systems are often more cost-effective than tracking systems in certain contexts; for instance, fixed PV can show greater economic feasibility over a 20-year operation period despite the tracking systems' higher energy gains (Kazem et al., 2024; Sinha & Chandel, 2016b). Furthermore, comparative analyses of bifacial and mono-facial modules indicate that bifacial panels can significantly optimize energy output, with some studies showing performance increases ranging from 3.78% to 8.16% compared to fixed panels (Ayadi et al., 2024) Collectively, these studies suggest that in cold and semi-arid climates, a combination of environmental assessment, tilt optimization, and economic considerations are vital for designing efficient and cost-effective PV systems (Kazem et al., 2024) While fixed-tilt systems are generally favored for their simplicity, lower costs, and minimal maintenance, incorporating bifacial modules and site-specific tilt angles can further enhance energy yield and economic returns, especially in regions with high solar insolation and specific land use constraints (Ayadi et al., 2024; Irshad et al., 2026; Kazem et al., 2024). (Ayadi et al., 2024; Irshad et al., 2026; Kazem et al., 2024).

3. Materials and Method

3.1 Study Area

The study is conducted in Kabul, Afghanistan, a high-altitude city situated at approximately 1798 m above sea level, which contributes to enhanced solar radiation due to reduced atmospheric attenuation. According to the Köppen–Geiger climate classification system, Kabul is classified as a cold semi-arid climate (BSk), characterized by low annual precipitation, relatively cold winters, hot dry summers, and high solar irradiance potential. Such climatic conditions are considered favorable for photovoltaic applications due to the combination of abundant sunshine hours and relatively low ambient temperatures, which can improve PV module efficiency. The region experiences an average annual ambient temperature of approximately 12.8°C, while its geographic position and frequent clear-sky conditions make it a suitable location for assessing solar energy systems, particularly for evaluating the performance of different tilt angles and solar tracking configurations (WeatherSpark, 2023; Global Solar Atlas, 2023).

3.2 Metrological Data

The meteorological data used in this study were obtained from the NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) database, which provides long-term satellite-derived solar and climate parameters. According to this dataset, Kabul has a global horizontal irradiation (GHI) of 2036.8 kWh/m²/year, a direct normal irradiation

(DNI) of 2206.6 kWh/m²/year, and a diffuse horizontal irradiation (DIF) of 670.3 kWh/m²/year. The global tilted irradiation at the optimum angle (GTI) reaches 2323.2 kWh/m²/year, indicating the benefit of optimized panel inclination. The optimum tilt angle is identified as 32° with a south-facing orientation (180° azimuth). Additionally, the site demonstrates a high specific photovoltaic power output (PVout) of 1855.3 kWh/kWp/year, confirming its strong solar energy potential for photovoltaic system deployment (NASA POWER, 2023; Global Solar Atlas, 2023).

3.3 Photovoltaic Model

In this study, a monocrystalline silicon photovoltaic module from Trina Solar is adopted due to its proven efficiency, durability, and suitability for grid-connected applications. Monocrystalline technology is selected because of its relatively higher conversion efficiency and better performance under varying environmental conditions, making it appropriate for the climatic characteristics of the study area. The selected module operates within standard electrical ranges and ensures stable energy production throughout its lifetime. The detailed technical specifications of the PV module are provided in Table 1.

For power conversion, a string inverter developed by Huawei Technologies is utilized to convert the generated DC electricity into usable AC power. The inverter is chosen based on its compatibility with the system size, high conversion efficiency, and reliable operational performance. It is designed to function over a wide voltage range and incorporates essential protection features, ensuring safe and stable operation under different environmental conditions. Moreover, its compact structure and high protection rating make it suitable for outdoor installation. The complete specifications of the inverter are summarized in Table 2.

Table 1: Specification of PV Panel considered in this study

Solar PV Specification	
Type	Mono-Si
Manufacturer	Trina Solar
Model No	TSM-DEG5-(II)-280
Power	280 Wp
Module size (W x L)	0.992 x 1.658 m2
Number of cells	1 x 60
Open-circuit voltage (Voc)	38.4 V
Max. power point voltage (Vmpp)	31.7 V
Model Efficiency	17%
Cell Efficiency	19.20%

Table 2: Specification of DC-AC converter considered in this study

Inverter Specifications	
Manufacturer	Huawei Technologies
Model No	SUN2000-4.95KTL- JPL1
Nominal AC Power (Pnom AC)	5 kW AC
Operating voltage	90-560 V
Nominal AC	24.5 A
Max. power (=>40°C)	5.21 kW AC
Pnom ratio (DC: AC)	1.13
Absolute max. PV Voltage	600 V
Number of string inputs	4
Protection	IP65
Size	365x649x159mm3
Weight	19 kg

3.4 System description

A 5 kWp grid-connected solar photovoltaic system is selected as the base case for all simulations to ensure consistency in comparison. The system utilizes mono-crystalline PV modules, chosen due to their high efficiency and suitability for relatively cold climatic conditions (Zgham et al., 2024). The main components of the PV system include mono-crystalline PV modules, a grid-connected inverter (kept constant across all cases), mounting structures (including both fixed tilt and tracking configurations), and associated system losses such as wiring, inverter, temperature, and mismatch losses, which are uniformly considered in all simulations. All system parameters, except the tilt angle and tracking mechanism, are maintained constant to ensure that any variation in energy yield is attributed solely to differences in orientation and tracking. The overall research methodology followed in this study is illustrated in Figure 2, which presents a systematic workflow starting from data acquisition and system design to simulation and performance evaluation. It further demonstrates how simulation outputs are analyzed using technical and economic indicators to determine the most efficient and cost-effective configuration.

3.5 Simulation Tool

The performance analysis is carried out using PVsyst, an advanced and widely validated software for PV system modeling and simulation. PVsyst is used to model system design and configuration, simulate solar irradiation on tilted and tracking planes, estimate annual and monthly energy production, and analyze system losses and performance ratio (PR). The software incorporates detailed meteorological data and advanced algorithms to simulate realistic PV system behavior under varying

environmental conditions. It is also important to mention that the statistical data analysis was conducted by the MS Excel software.

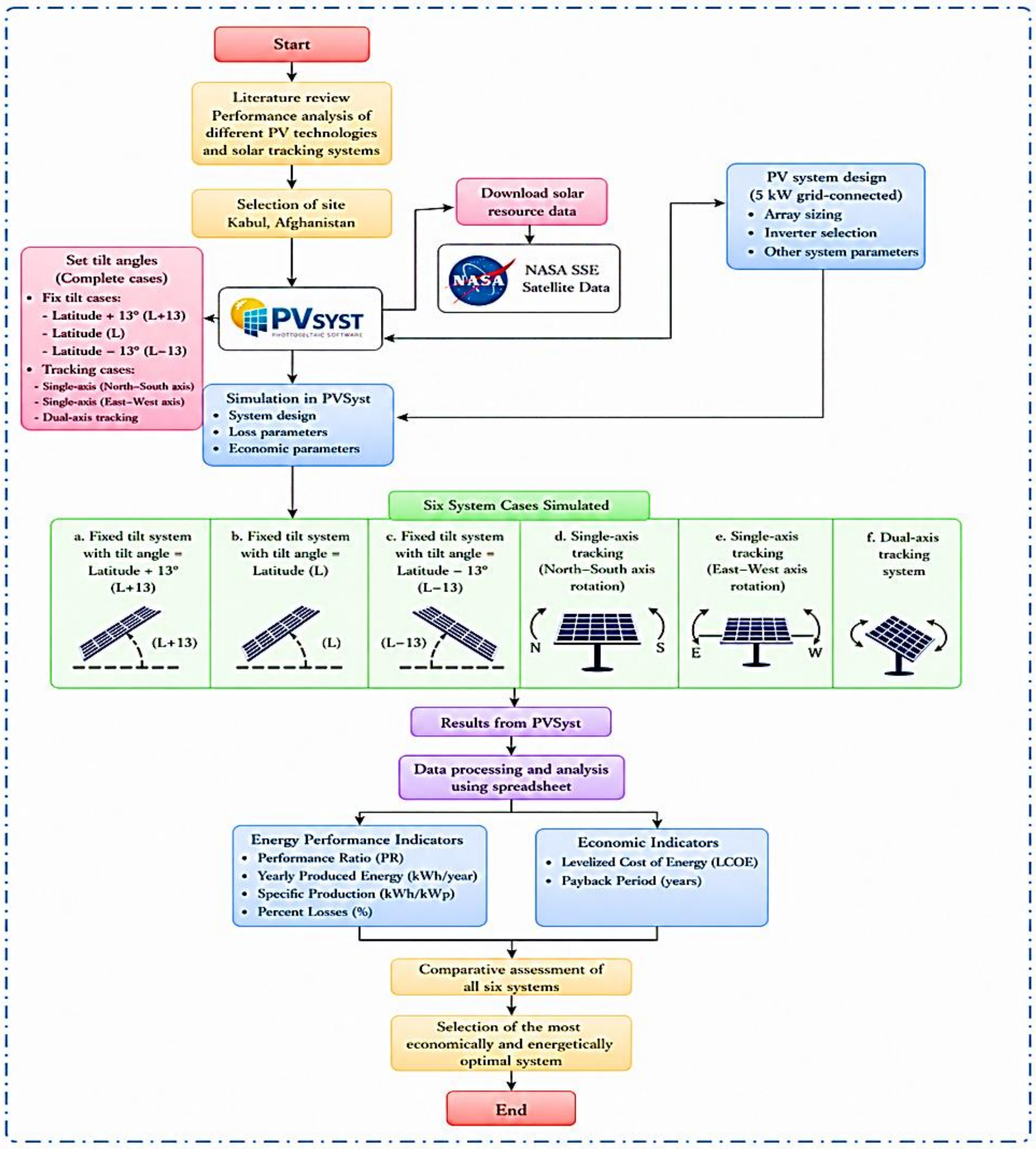


Figure 2: Research Methodology diagram for this study

3.6 System Scenarios

Six different PV system configurations are analyzed in this study:

a. Fixed tilt system with tilt angle = Latitude + 13°
b. Fixed tilt system with tilt angle = Latitude
c. Fixed tilt system with tilt angle = Latitude − 13°
d. Single-axis tracking (North–South axis rotation)
e. Single-axis tracking (East–West axis rotation)
f. Dual-axis tracking system

These configurations are selected to evaluate the effect of tilt angle optimization and solar tracking mechanisms under seasonal variations, particularly under the cold semi-arid climatic conditions of Kabul, based on the Köppen–Geiger climate classification system. The tracking systems are modeled to dynamically follow the sun's movement throughout the day and across seasons, thereby maximizing incident solar radiation on the photovoltaic surface and enhancing the overall energy yield of the PV system.

3.7 Economic Assumptions

The economic assumptions adopted in this study were based on the default financial analysis framework of PVsyst and were uniformly applied to all photovoltaic system configurations to ensure a fair comparative assessment. The selected assumptions are considered acceptable for preliminary techno-economic evaluations of photovoltaic systems. However, it is important to mention that component replacement costs, inflation effects, and the auxiliary electricity consumption of tracking motors were not included in the present analysis. Therefore, the obtained LCOE and payback period values represent simplified economic indicators intended mainly for comparative evaluation among the studied fixed-tilt and tracking photovoltaic systems.

Table 3: Economic Analysis Assumptions Used in the Study

Parameter	Assumed Value	Description / Justification
Project Lifetime	25 years	A 25-year operational lifetime was assumed based on the typical design lifetime of grid-connected photovoltaic systems and PV module manufacturer warranties.
Discount Rate	5%	A constant discount rate of 5% was applied in the PVsyst financial model to simplify the comparative economic evaluation among different PV configurations.
Inflation Rate	0%	Inflation was neglected in the simulation to maintain identical economic conditions for all system scenarios.

Annual Degradation Rate	1%/year	1% of annual degradation in PV output was considered in the financial analysis to focus primarily on comparative system performance.
Electricity Tariff (Feed-in Tariff)	0.085 USD/kWh	The generated electricity value was estimated using a feed-in tariff of 0.085 USD/kWh in the PVsyst financial model.
Annual O&M Cost	75 USD/year	Annual operation and maintenance costs were assumed based on routine inspection, cleaning, and minor maintenance requirements of the PV system.
System Lifetime Warranty	25 years	The tariff, warranty, and economic analysis period were considered equal to the project lifetime.
Initial Investment Cost	Variable depending on configuration	The capital cost varied according to the selected PV configuration, especially due to additional tracking structures and mechanical components in tracking systems.
Replacement Cost	Not considered	Replacement costs for inverters, motors, or other components were not included in the present economic analysis.

4. Results & Discussion

This study investigates that 5KW grid connected PV system in mono-crystalline solar PV technologies in six different tracking and fixed systems. The results of this study explores that the output power is the least in fixed tilted with (34+13)°=47° tilted with the horizontal surface, Figure 3 presents the energy generation percentage for each of the six states, if the energy generation from the fixed tilt with 47° tilted set as a 100% all other relative percentages are presented in the chart that the N-S horizontal axis tracking generate more than 10% of excess energy compared to the fixed tilted with 47° tilted with horizontal surface and the one which can generate the most energy compared to all the five states is Dual axis tracking E-W (-120° to +120°) and N-S (15°-55°) which generate 41% more energy than the fixed tilted with 47° tilted with the horizontal surface.

The results of the simulation show clear differences in the performance of the six photovoltaic (PV) system configurations under the climatic conditions of Kabul. The comparison of annual energy production, specific yield, performance ratio, and economic indicators provides a detailed understanding of how system orientation and tracking methods affect overall system performance. As shown in Table 4, the energy output increases gradually from fixed-tilt systems to tracking systems, which confirms the importance of optimizing solar panel orientation.

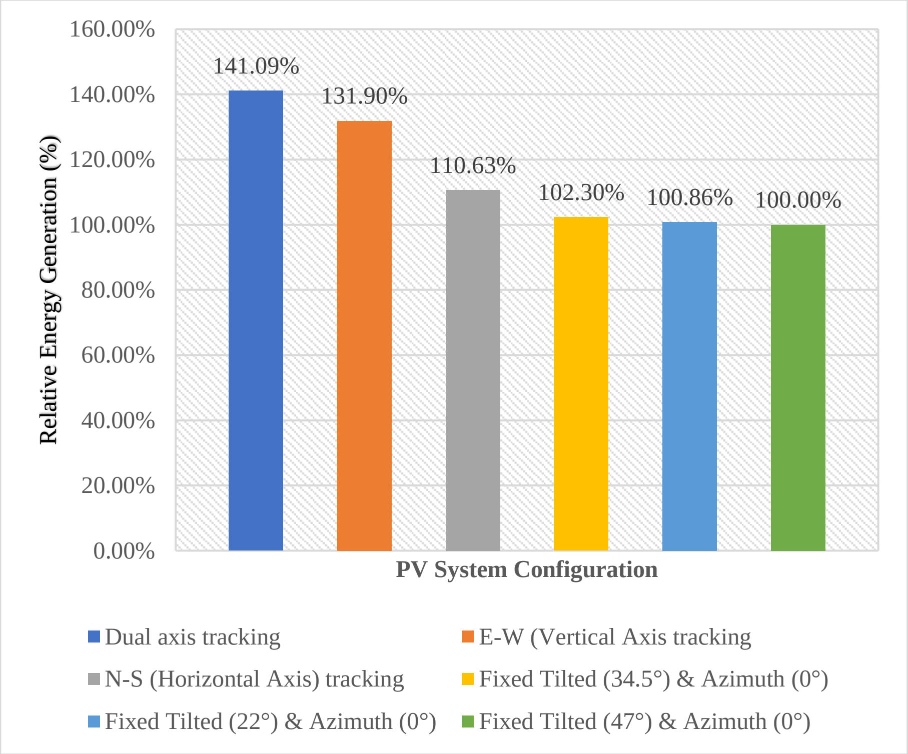


Figure 3: Comparative annual energy generation of the six investigated photovoltaic system configurations, normalized with respect to the fixed-tilt system at 47° inclination.

Among the fixed-tilt systems, three tilt angles were analyzed: 47°, 22°, and 34.5°. The results indicate that the system with a tilt angle equal to the latitude (34.5°) produces the highest annual energy, reaching 10.68 MWh/year, as presented in Table 4. This system also shows the highest specific production of 1908 kWh/kWp/year, which means it utilizes the available solar radiation more effectively compared to the other fixed configurations. The systems with tilt angles of 47° and 22° produce slightly lower energy, with 10.44 MWh/year and 10.53 MWh/year, respectively. This difference can also be observed in Figure 4, where the monthly energy production curves show that the optimized tilt (latitude) performs better across most months of the year.

Table 4: Summary of annual energy yield, performance ratio, economic indicators, and losses for different fixed and tracking PV systems simulated using PVsyst

No	PV System Types	Yearly Energy (MWh/Yr)	Prod. (kWh/kWp/yr)	PR (%)	Cost/Wp (USD)	LCOE (USD/kWh)	Payback (Year)	Losses (%)
1	Fixed Tilted (47°) & Azimuth (0°)	10.44	1864	85.50%	$0.59/Wp	0.0198	4.1	13.31%
2	Fixed Tilted (22°) & Azimuth (0°)	10.53	1879	85.30%	$0.59/Wp	0.0197	4.1	13.48%
3	Fixed Tilted (34.5°) & Azimuth (0°)	10.68	1908	85.31%	$0.59/Wp	0.0194	4.0	13.58%
4	N-S Horizontal Tracking (15°–55°), Azimuth (0°)	11.55	2063	85.25%	$0.64/Wp	0.0189	4.0	14.00%
5	E-W Vertical Tracking (−120° to +120°), Tilt (34.5°)	13.77	2458	85.12%	$0.64/Wp	0.0158	3.3	15.17%
6	Dual Axis Tracking E-W (−120°/+120°) & N-S (15°–55°)	14.73	2630	84.38%	$0.73/Wp	0.0162	3.5	16.13%

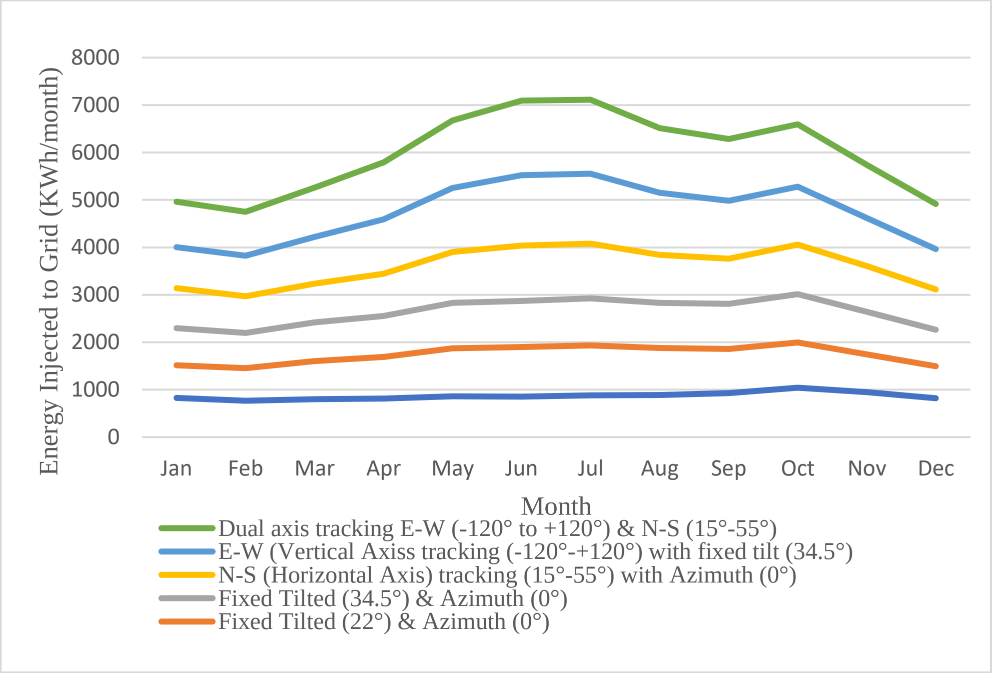


Figure 4: Monthly electrical energy injected into the grid by the six 5 kWp photovoltaic system configurations simulated in PVsyst

The results indicate that the tilt angle close to the geographical latitude provides a better balance between summer and winter performance. The higher tilt angle (47°) improves energy production during winter months but reduces output in summer, while the lower tilt angle (22°) performs better in summer but loses efficiency in winter. As a result, the latitude-based tilt offers the most stable annual performance. This behavior can also be observed in Figure 5, where the normalized production remains more consistent throughout the year for the optimized tilt. In addition, the performance ratio (PR) remains almost constant at around 85% for all fixed systems, as shown in Table 4, indicating that system losses are similar and that the differences in output are mainly due to panel orientation.

When tracking systems are introduced, a noticeable performance improvement is observed. The north–south (N–S) single-axis tracking system increases annual energy production to 11.55 MWh/year, as shown in Table 4, about 8% higher than the best fixed-tilt system. This improvement can also be seen in Figure 3, where the daily and monthly energy profiles show higher output during morning and afternoon hours. This is because the N–S tracking system allows the panels to follow the sun from east to west during the day, increasing solar exposure.

However, the improvement over the N–S tracking system remains limited compared to other tracking options. A much larger increase in energy production is observed in the east–west (E–W) tracking system. This system produces 13.77 MWh/year, which is significantly higher than both fixed and N–S tracking systems. The specific production also increases to 2458 kWh/kWp/year, indicating a great improvement in system efficiency. This result is clearly supported by Figure 4, where the E–W tracking system shows higher energy injection throughout the year. Similarly, Figure 5 shows that the normalized production of this system is consistently higher compared to the other configurations.

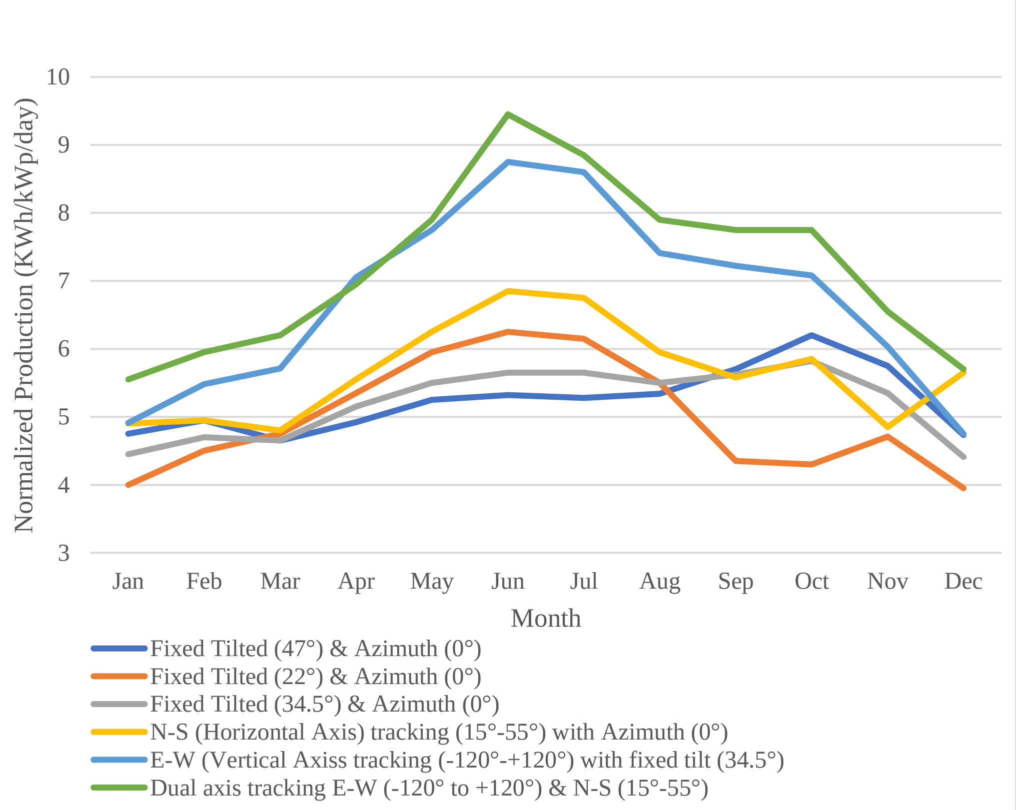


Figure 5: Monthly normalized energy production (kWh/kWp/day) of the investigated 5 kWp photovoltaic systems, illustrating the influence of tilt angle and tracking mechanism on system productivity throughout the year.

The best performance is achieved by the dual-axis tracking system. According to Table 4, this system produces 14.73 MWh/year, which is the highest among all configurations. The specific production reaches 2630 kWh/kWp/year, which is about 38% higher than the best fixed-tilt system. This significant increase is also observed in Figure 3, where the dual-axis system shows the highest energy injected into the grid

in all months. The obtained specific production values of 2458 kWh/kWp/year for the E–W vertical axis tracking system and 2630 kWh/kWp/year for the dual-axis tracking system are found to be consistent with previously published studies conducted in high solar irradiation regions. A recent study evaluating fixed, single-axis, and dual-axis photovoltaic systems under desert climatic conditions reported average specific yields of 2372 kWh/kWp/year for single-axis tracking systems and 2555 kWh/kWp/year for dual-axis tracking systems, confirming the feasibility of achieving high energy yields under favorable solar conditions (Ayadi et al., 2024). The slightly higher values obtained in the present study can be attributed to the high solar irradiation potential and clear-sky conditions of Kabul. It is important to note that the auxiliary energy consumption of tracking motors and actuators was not included in the present analysis; therefore, the reported energy outputs represent the gross energy generation of the tracking systems.

Although the dual-axis system provides the highest energy output, it also shows slightly lower performance ratio values. The PR decreases to 84.38%, and the percentage losses increase to 16.13%, which are higher than in the other systems. This indicates that the increased mechanical movement and system complexity lead to additional losses. Similar trends can be seen in Figure 6, where the performance ratio of tracking systems is slightly lower than that of fixed systems.

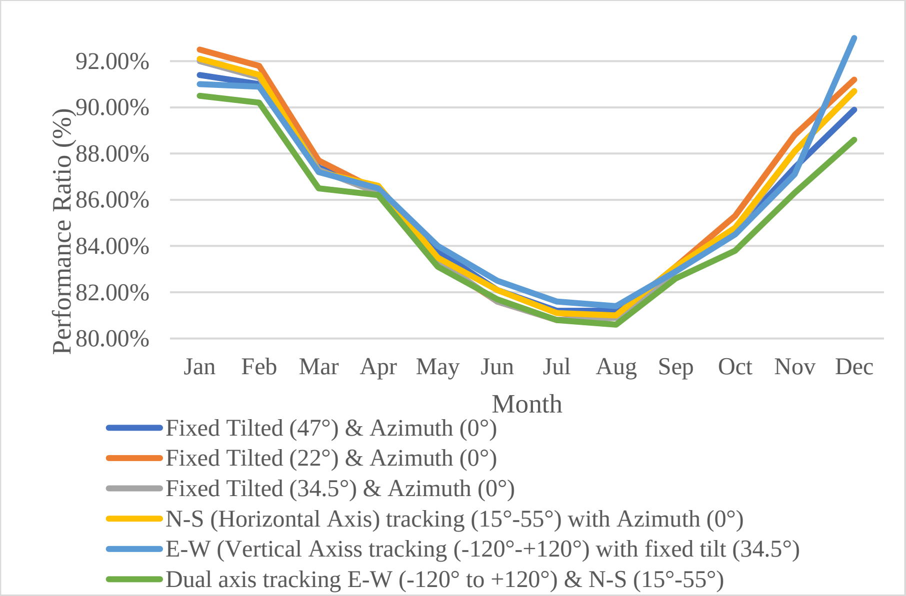


Figure 6: Monthly performance ratio (PR) comparison of the six photovoltaic system configurations. This demonstrates the effect of tracking mechanisms and operating conditions on overall system performance and losses.

The relatively small variation in performance ratio (PR) among the investigated PV configurations indicates that all systems operated under comparable electrical and environmental conditions; however, the slightly lower PR observed in the tracking systems can be attributed to the increase in overall system losses identified in the PVsyst simulations. Although the dual-axis and E–W tracking systems received significantly higher incident solar irradiation, continuous exposure to direct sunlight increased the operating temperature of PV modules, leading to greater thermal losses compared to the fixed-tilt configurations. In addition, tracking systems exhibited slightly higher mismatch and wiring losses due to the more complex array geometry, longer cable routing, and variable operating conditions during continuous movement. The inverter losses remained nearly constant across all configurations because the same inverter model and capacity were used in every case; however, under higher irradiance conditions, the inverter operated more frequently near its upper loading range, which marginally affected conversion efficiency. Therefore, despite the substantial increase in annual energy yield, the PR values of tracking systems were slightly reduced by approximately 1% because PR represents the ratio between actual and theoretical energy generation after accounting for all thermal, electrical, and system-related losses. These findings confirm that the lower PR of tracking systems is mainly associated with increased thermal and operational losses rather than poor system performance, since the tracking configurations still delivered significantly higher net energy production than the fixed-tilt systems.

Higher operating temperatures reduce the efficiency of mono-crystalline PV modules by lowering their voltage and power output. Tracking systems are more exposed to direct solar radiation throughout the day, causing higher panel temperatures and greater thermal losses than fixed-tilt systems. As a result, part of the additional energy gained through tracking is offset by increased temperature-related losses. Effective cooling methods can help reduce these losses and improve overall energy production.

Overall, the results demonstrate that tracking systems significantly improve energy production compared to fixed-tilt systems in Kabul's climate. While the dual-axis system provides the highest energy output, the E–W tracking system offers a strong balance between performance and cost. The findings suggest that selecting the optimal system depends not only on maximizing energy yield but also on considering economic feasibility and system complexity.

4.1. Economic Analysis

The economic evaluation was performed using a project lifetime of 25 years, which corresponds to the typical operational life and warranty period of grid-connected PV systems. To ensure a consistent comparison among the studied configurations, a discount rate of 5%, an annual PV module degradation rate of 1%, and a zero inflation rate were assumed. Under these assumptions, the future value of energy production

decreases over time due to both the degradation of PV output and the discounting of future cash flows. The generated electricity was valued at a feed-in tariff of 0.085 USD/kWh, while the annual operation and maintenance cost was fixed at 75 USD/year for all systems.

The results show that tracking systems can achieve higher economic returns because their increased energy production compensates for their higher installation costs. However, the economic benefits are reduced over the project lifetime as annual energy generation gradually declines due to the assumed 1% degradation rate. The 5% discount rate further lowers the present value of future revenues, making early energy production more economically valuable than energy generated in later years. Consequently, the economic performance of each system depends not only on its initial energy yield but also on its ability to maintain energy production over time.

Although tracking systems produced more electricity than fixed-tilt systems, the higher capital costs associated with tracking mechanisms must be considered when assessing their overall economic attractiveness. Fixed-tilt systems benefited from lower installation costs and simpler system design, whereas tracking systems required additional mechanical and control components. It should also be noted that replacement costs for inverters, motors, and tracking equipment were not included in this analysis. Therefore, the reported economic indicators should be regarded as a simplified comparative assessment of the studied PV configurations under identical financial assumptions.

5. Conclusion

This study evaluated the technical and preliminary economic performance of six photovoltaic (PV) system configurations, including three fixed-tilt systems and three tracking systems, under the cold semi-arid climatic conditions of Kabul using a 5 kWp mono-crystalline PV system simulated in PVsyst.

The main findings can be summarized as follows:

1. Among the fixed-tilt configurations, the tilt angle equal to the site latitude (34.5°) produced the highest annual energy output of 10.68 MWh/year and a specific yield of 1908 kWh/kWp/year.
2. The east–west tracking system offered the best balance of technical and economic performance, producing 13.77 MWh/year, achieving the lowest LCOE of 0.0158 USD/kWh, and delivering the shortest payback period of 3.3 years across all configurations investigated.
3. Total system losses increased from 13.31% in the fixed-tilt system to 16.13% in the dual-axis tracking system, indicating that greater thermal and operational losses accompanied the higher energy gains achieved by tracking configurations.

4. In the economic assessment, the east–west tracking system achieved the lowest LCOE of 0.0158 USD/kWh and the shortest payback period of 3.3 years. In contrast, the latitude-tilt fixed system had an LCOE of 0.0194 USD/kWh and a payback period of 4 years.

Overall, the results demonstrate that solar tracking substantially increases energy yield under Kabul's climatic conditions, with the dual-axis configuration providing the highest technical performance. However, tracking systems also introduce higher losses, greater complexity, and increased capital costs. While the east–west tracking system exhibited the most favorable economic indicators under the assumptions adopted in this study, these results should be interpreted as a preliminary comparative assessment because component replacement costs, degradation effects, inflation, discount rates, and tracking motor energy consumption were not included. Future research should incorporate detailed lifecycle cost analysis and long-term operational data to provide a more comprehensive evaluation of the economic feasibility of tracking PV systems in cold semi-arid regions.

6. Limitations and future works

The present study is simulation-based and does not include experimental validation. Future work should include real-time operational measurements to validate the simulation outcomes under actual climatic conditions.

Solar tracking systems provide higher efficiency and better energy performance than fixed or stationary photovoltaic systems. However, they are generally more costly because they involve advanced technologies and complex mechanical and control components. In addition, the installation process requires skilled experts to perform accurate measurements and calculations to ensure proper system operation. Tracking panels may receive more direct sunlight, increasing cell temperature, which reduces the efficiency of PV modules, and moving panels may accumulate more dust and dirt due to changing orientations, which must be evaluated in a separate study.

Regarding the future development of solar tracking systems, greater attention should be given to introducing advanced and more efficient sun-tracking methods. Different approaches, including expert systems and intelligent control techniques for photovoltaic modules, can be developed or improved to maximize the utilization of solar energy.

References

Ahmadullah, A. B., Faizi, M., Alyami, F. H., Alshammari, N. F., & Irshad, A. S. (2026). Which PV works best in each climate? Global mapping for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *203*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.153106

AL-Rousan, N., Isa, N. A. M., & Desa, M. K. M. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 2548–2569). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077

Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review of sun tracking technology in solar PV systems. In *Energy Reports* (Vol. 6, pp. 392–405). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004

Ayadi, O., Rinchi, B., Al-Dahidi, S., Abdalla, M. E. B., & Al-Mahmodi, M. (2024). Techno-Economic Assessment of Bifacial Photovoltaic Systems under Desert Climatic Conditions. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(16). https://doi.org/10.3390/su16166982

Eiva, U. R. J., Chowdury, T. A., Islam, S. S., Ullah, A., Tuli, J. N., & Islam, M. T. (2026). Comprehensive analysis of fixed tilt and dual-axis tracking photovoltaic systems for enhanced grid integration and energy efficiency. *Renewable Energy*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123865

El Hammoumi, A., Chtita, S., Motahhir, S., & El Ghzizal, A. (2022). Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. In *Energy Reports* (Vol. 8, pp. 11992–12010). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.054

Elbreki, A. M., Muftah, A. F., Sopian, K., Jarimi, H., Fazlizan, A., & Ibrahim, A. (2021). Experimental and economic analysis of a passive cooling PV module using fins and a planar reflector. *Case Studies in Thermal Engineering*, *23*, 100801. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2020.100801

Irshad, A. S., Hilali, A., Ahmadullah, A. B., Zaray, A. H., & Muslih, N. M. (2026). Techno-economic benchmarking of green hydrogen production using fixed and tracking PV systems: a PVsyst–MATLAB integrated analysis. *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-026-46077-w

Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Sopian, K. (2024). Recent advancements in solar photovoltaic tracking systems: An in-depth review of technologies, performance metrics, and future trends. In *Solar Energy* (Vol. 282). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112946

Sinha, S., & Chandel, S. S. (2016a). Analysis of fixed tilt and sun tracking photovoltaic–micro wind based hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, *115*, 265–275. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.02.056

Zgham, W., Shirzad, S., & Fatemi, S. A. Z. (2024). Energy Assessment & Comparative Study of Mono and Poly Solar PV Technologies Using Advanced PVsyst Software. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1–7. https://doi.org/10.47852/bonviewaaes42021881

NASA POWER. (2023). NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer.

Global Solar Atlas. (2023). Solar resource data. World Bank Group.

WeatherSpark. (2023). Average Weather Data for Kabul, Afghanistan

Optimizing Energy Efficiency in Residential Buildings: A Comprehensive Analysis of Heating and Cooling Loads Using HAP Software in Ghazni, Afghanistan

Samiullah Popal [1], Asadullah Shakir [2], Wahidullah Zgham [1], Haji Mohammad Hemat [3], Nik Mohammad Rishten [4], and Shear Ahmed Atif [3]*

1 Energy Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan.*

2 Geology and Mining Exploration Engineering Department, Ghazni Technical University, Afghanistan.

3 Department Civil, Ghazni Technical University, Afghanistan.

4 Natural Science Department, Ghazni Technical University, Afghanistan

Email: samiullahpopal79@gmail.com

Abstract:

The purpose of this study is to use the Hourly Analysis Program (HAP) software to assess the system design and energy efficiency of DX Split Units for residential structures in Ghazni, Afghanistan. Given the harsh climate of Ghazni, which is marked by hot, dry summers and cold, snowy winters, the main goal was to precisely estimate the heating and cooling loads of a residential building there. To model heating and cooling loads, the research technique comprised obtaining comprehensive building data, such as thermal conditions, dimensions, orientation, and material attributes, which were then entered into the HAP program. According to the study, the DX Split Unit system successfully controlled the building's thermal needs, with peak heating loads of 41.8 kW in January and cooling loads of 111.5 kW in July. These results show that the technology can maximize energy use while maintaining indoor comfort. The findings emphasize the importance of precise load assessment when developing energy-efficient HVAC systems, especially in arid environments. The study's conclusions imply that energy savings and carbon emissions might be further decreased by using cutting-edge technology, such as deep reinforcement learning for thermal comfort control, and upgrading the building envelope with energy-efficient materials. In line with sustainable development objectives, this study offers insightful information for upcoming energy-saving projects in residential structures.

***Keywords**: Energy Efficiency, HAP Software, Heating and Cooling Loads, Residential Buildings, Ghazni, Afghanistan.*

1. Introduction

وَجَعَلْنَا النَّهَارَ مَعَاشًا[سُوْرَةُ النَّبَإِ : ۱۱]

Locally and globally, buildings are the main source of energy use. The evaluation of the heating and cooling load is a crucial part of energy management and building design. By using this data, suitable HVAC systems are constructed, leading to significant energy savings and a reduced carbon footprint (Zangheri et al., 2014). Assessing the building's heating and cooling loads is essential to preserving energy efficiency and reducing energy use (Ahmad et al., 2014). Determining the amount of thermal energy required to maintain a room at a comfortable temperature is known as estimating the heating and cooling load. Accurate load estimates lead to significant energy savings by enabling the selection of appropriate HVAC systems and equipment (Aized et al., 2017).

One of the various load estimation methods is the HAP program. These methods provide useful data on the energy efficiency of the building, which aids in guiding future energy-saving initiatives. Several studies have emphasized the need for accurate load assessment in building design and optimization; for example, accurate load estimation led to a 20% reduction in energy consumption in residential buildings (Zaphar & Sheworke, 2018). However, the accuracy of the HAP technique depends on the accuracy of the input data and assumptions used in the calculations.

In recent years, there has been an increase in the use of sophisticated software tools such as HAP (Hourly Analysis Program), which calculates the heating and cooling loads of buildings. Advanced modeling techniques and algorithms are used in these applications (Saragasan & Sies, 2021). Another study found that energy consumption was lowered by 33.6% when HVAC systems were optimized using accurate load estimates. These results highlight how crucial accurate load predictions are to reducing energy consumption and carbon emissions (*2020 ASHRAE Handbook : Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment*, 2020).

Maintaining energy efficiency requires estimating the residential block's heating and cooling needs. Predicting the loads can help create the right HVAC system, which saves a lot of energy. Energy-efficient HVAC systems can help minimize the building's carbon footprint, which is necessary to accomplish sustainable development goals (Huang & Franconi, 1999).

This study aims to address the following research question: How can the Hourly Analysis Program (HAP) be used to reliably estimate the heating and cooling loads of

residential buildings in Ghazni, Afghanistan, and what are the main factors impacting these loads?

The purpose of this study is to use HAP software to evaluate heating and cooling loads. Future energy-saving measures for the building can be guided by the study's findings, which will reduce energy consumption and carbon emissions. Estimating a building's heating and cooling demand is crucial for achieving energy efficiency and reducing carbon emissions. The residential block in Ghazni province requires energy-efficient HVAC equipment to improve occupant comfort and reduce energy consumption. Accurate load assessments provided by HAP software can guide future energy-saving initiatives and provide valuable insights into the building's energy performance.

2. Literature Review

Energy efficiency in residential HVAC systems is crucial for reducing energy consumption and improving thermal comfort. Deep reinforcement learning-based thermal comfort control methods, such as the SVR-DNN model combined with Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), can optimize HVAC thermal comfort control strategies, minimizing energy consumption while satisfying occupants' thermal comfort (Ding et al., 2022). This approach could be adapted for DX split units in Ghazni to improve energy efficiency.

The building envelope plays a significant role in energy efficiency. In hot climates, using appropriate window glazing and shading devices can significantly reduce annual energy consumption. For instance, low-E glass and box shading can save approximately 15.1% and 13.6% of annual air conditioner electricity consumption, respectively (Su et al., 2023). These strategies could be particularly relevant for Ghazni's climate to reduce cooling loads on DX split units.

Mixed-mode ventilation has been proven to reduce energy consumption and introduce fresh air effectively (Su et al., 2023). Optimizing air-velocity adjustment strategies based on thermal comfort models can improve building energy efficiency while maintaining occupant comfort (Mitterrutzner et al., 2023). This approach could be integrated with the DX split unit operation in Ghazni to maximize energy savings.

When designing HVAC systems for residential buildings, it's important to consider the trade-offs between filter efficiency, energy consumption, and indoor air quality. Higher efficiency filters may not always lead to significant energy penalties, and their effectiveness depends on factors such as system runtime and particle removal rates (Alavy & Siegel, 2019). This consideration is relevant for DX split unit design in Ghazni, especially given potential air quality concerns in the region.

2.1. Theoretical framework

The theoretical framework offers a strong basis for examining the DX Split Units' system design and energy efficiency in residential structures. The study intends to maximize system performance and lower energy consumption in Ghazni's difficult climate by combining thermodynamics, HVAC design principles, energy efficiency models, and climate effect theories. This framework will serve as a guide for the research approach and aid in achieving the study's goals of lowering carbon emissions and increasing energy efficiency.

3. Research Methodology

3.1. Building Data Gathering

The purpose of this study is to estimate the heating and cooling load of the residential building in Ghazni province, Afghanistan, which can accommodate 13 people, using the HAP software. The building's thermal condition, dimensions, volume, orientation, and external materials were among the information acquired. Table 1 displays the Building Summary of the residential building: Table 2 shows window & door constructions, Table 3 demonstrates roof assembly layers & Table 4 shows wall assembly layers in its current condition. (DOAS Sizing Summary for DX Split Unit (In Alternative: DX Split Unit), n.d.) The residential structure was constructed. The building's 2D and 3D views are shown in Figures (1, 2, &3) & (4), respectively.

Table 1
Building Summary

Level	Space Count	Floor Area (sqm)	Volume (m3)	Interior Wall Gross Area (sqm)	Exterior Wall Gross Area (sqm)
Level 3	5	118.5	355.6	148.9	143.6
Level 2	9	187.4	562.3	289.2	176.3
Level 1	9	187.4	562.3	289.2	176.3
Total	23	493.4	1480.3	727.3	496.2

Table 2

Window & Door constructions

Tag	Count	Total Area (sqm)	Width	Height	glazing, frame type & overall U-value
Glass Panel	10	23.4	900 mm	2600 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Glass Panel 2	3	7.8	1000 mm	2600 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
St W	2	13.5	2600 mm	2600 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Window 1.1	16	70.4	2000 mm	2200 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Window 1.2	5	27.5	2500 mm	2200 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Window 1.3	2	0.4	500 mm	400 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Window 1.4	5	10	1000 mm	2000 mm	single, wood & 5.92w/sqm k
Door 1	3	7.2	1000 mm	2400 mm	Opaque Door & 3.975W/(sqm K)
Door 2	1	1.7	800 mm	2100 mm	Opaque Door & 3.975W/(sqm K)

Table 3

Roof Assembly Layers-(Outside to Inside Space)

Layers	Thickness mm	R-Value (sqm K)/W	Total Roof Area (sqm)	Heat Transfer Area (sqm)
Outside Surface Resistance		0.12	187.4	187.4
gypsum plaster	20	0.05645		
LW concrete	150	0.28558		
Membrane	10	0.05		
Inside Surface Resistance		0.06		
Totals	180	0.57203		

Table 4
Wall Assembly Layers-(Inside Space to Outside)

Layers	Thickness mm	R-Value (sqm K)/W
Inside Surface Resistance		0.12
cement plaster	15	0.0208
common brick	220	0.14622
cement plaster	15	0.0208
Outside Surface Resistance		0.06
Totals	250	0.36782

Figure 1
Level one of the residential building

3.2. HAP Software Design

An effective tool for estimating building heating and cooling needs is the HAP (Hourly Analysis Program) software. Here's how you use the HAP software to determine heating and cooling loads.

3.2.1. Building Data Input

The user enters all the geometry, orientation, envelope, window, and occupancy schedules of the building. This information is used to create a 3D model of the structure, which is shown in Figure 4.

Figure 1; Level one of the residential building

Figure 2; Level two of the residential building

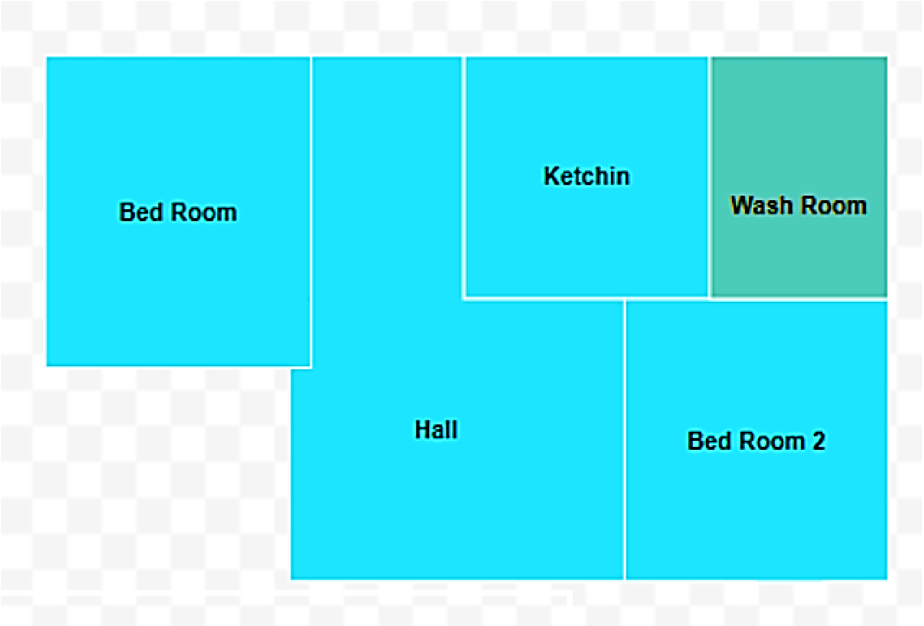


Figure 3; Level three of the residential building

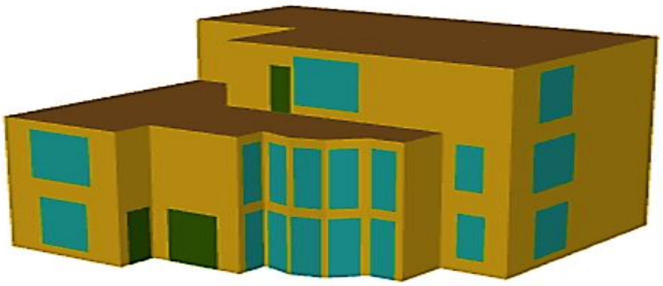


Figure 4; 3D model of the residential building

3.2.2. HVAC System Input

The user inputs details about the HVAC system, including control methods, equipment capabilities, and system type.

3.2.3. Weather Data Input

The user inputs weather data for the location of the building, including temperature, humidity, and solar radiation. The residential building is shown in Table 5 in its current state (*ASHRAE Climatic Design Conditions 2009/2013/2017/2021*, n.d.).

Table 4

Thermal condition for residential buildings

Specification	Value
Outdoor Max temperature (°C)	33
Indoor temperature (°C)	18
Outdoor Min temperature (°C)	19
Outside relative humidity (%)	35
Inside relative humidity (%)	50

3.2.4. Simulation:

The HVAC system is simulated by the HAP software, which also determines the heating and cooling loads for each room and the total structure. The software computes the HVAC system's energy usage by simulating building energy use.

3.2.5. Analysis

The program provides a range of output reports that allow the user to analyze the results of the simulation, including system performance, energy consumption, and heating and cooling loads.

4. Result

4.1. Climate & Weather Conditions

The summers in Ghazni are hot, dry, and clear, and the winters are very cold, snowy, and mostly clear. Over the course of the year, the temperature typically varies from -5°C to 33°C and is rarely below -11°C or above 36°C.

Based on the beach/pool score, the best time of year to visit Ghazni for hot-weather activities is from late June to late August. The hot season lasts for 3.9 months, from May 22 to September 17, with an average daily high temperature above 27°C. The hottest month of the year in Ghazni is July, with an average high of 33°C and a low of 19°C (Zgham et al., 2024).

The cold season lasts for 3.0 months, from December 2 to March 3, with an average daily high temperature below 10°C. The coldest month of the year in Ghazni is January, with an average low of 5°C and a high of 5°C. Is shown in figures 5 & 6 (Ghazni Climate, Weather By Month, Average Temperature (Afghanistan) - Weather Spark, n.d.)

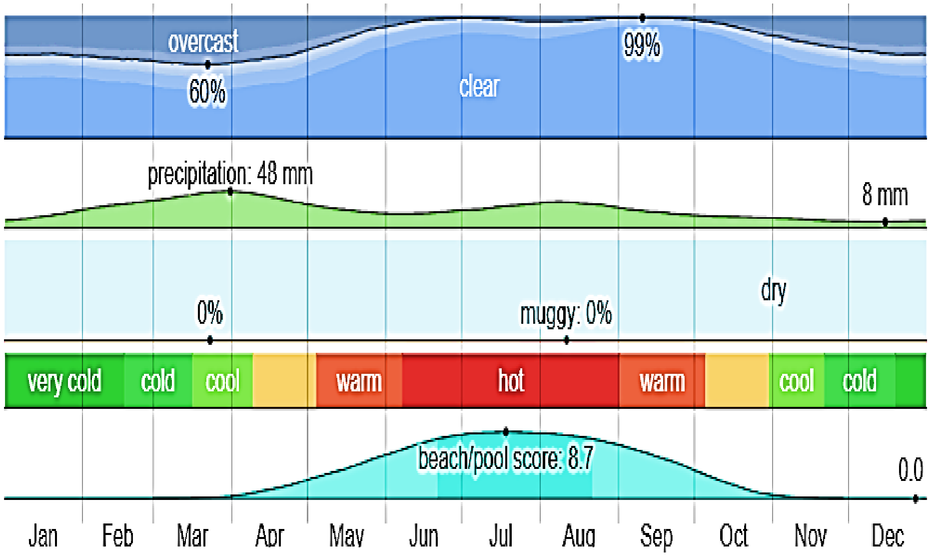


Figure 5; Climate in Ghazni

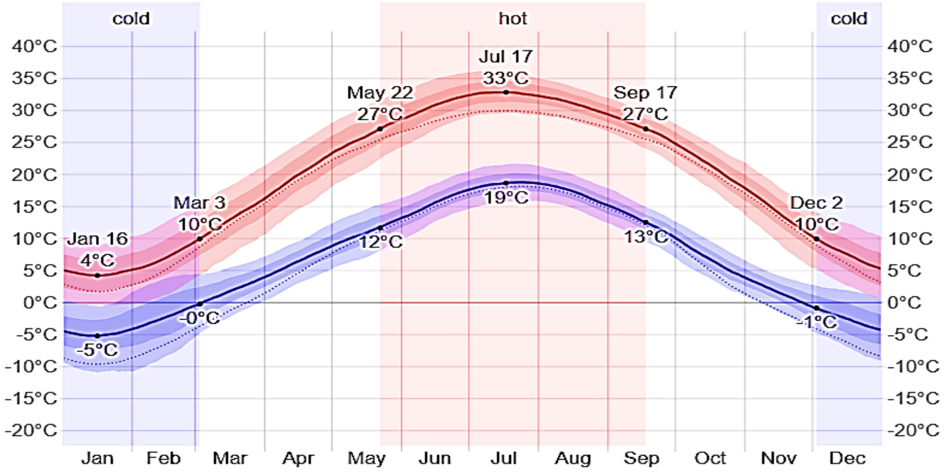


Figure 6: Average High and Low Temperature in Ghazni

4.2. Calculating heating and cooling loads with HAP software

The cooling load for a residential building in a designated province in July, as determined by HAP software, is shown in Figure 7. The maximum cooling load is 111.5 kW. The heating load for a teacher's home complex in January is shown in Figure 8. In terms of heating load, 41.8 kW (DOAS Sizing Summary for DX Split Unit (In Alternative: DX Split Unit), n.d.).

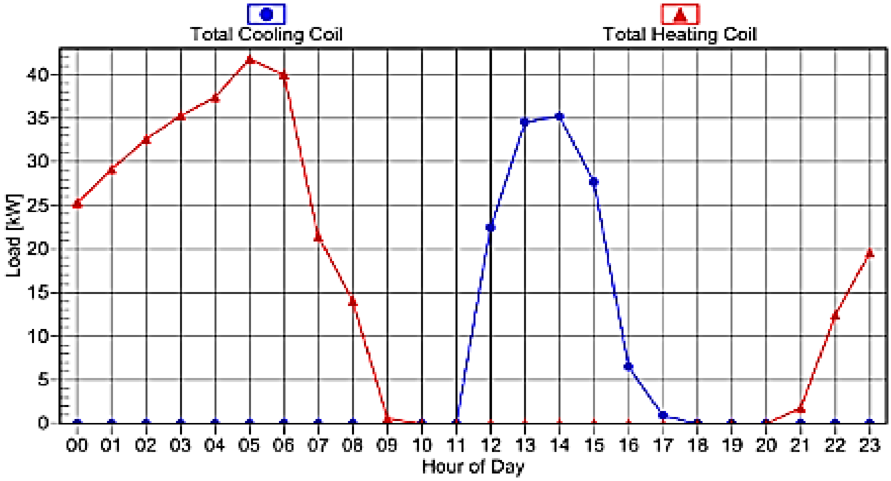


Figure 6; Data for July

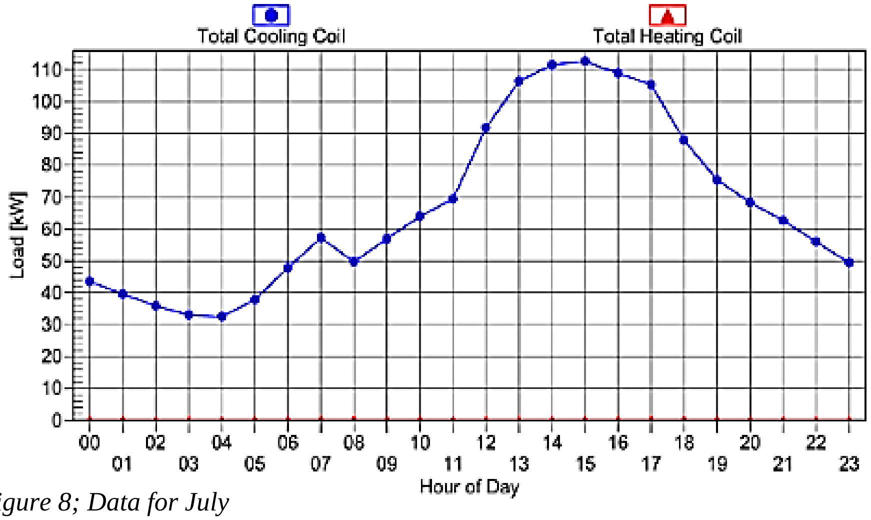


Figure 8; Data for July

5. Conclusion

Using the Hourly Analysis Program (HAP) software, this study sought to evaluate the system design and energy efficiency of DX Split Units for residential structures in Ghazni, Afghanistan. The study's main goal was to calculate the heating and cooling loads of a Ghazni residential building while accounting for the harsh environment of the area, which is marked by extremely cold winters and scorching, dry summers. The results show that, even in the face of harsh weather, the DX Split Unit system is a reliable and efficient way to keep indoor comfort throughout the year.

With the system reaching a peak cooling load of 111.5 kW in July and a high heating load of 41.8 kW in January, the HAP software was essential in precisely estimating the heating and cooling loads. Through thorough hourly load profile analysis, the system's ability to handle both summer cooling and winter heating requirements was verified, guaranteeing that vital areas like dining rooms, corridors, kitchens, and bedrooms receive specialized heating and cooling. Additionally, the ventilation system improves indoor air quality and fosters a healthy living environment by continuously supplying fresh outdoor air.

The study emphasizes how important it is to accurately estimate load when designing energy-efficient HVAC systems, especially in areas with harsh climates like Ghazni. According to the findings, the DX Split Unit system provides a complete and energy-efficient solution that is suited to the particular requirements of local residential buildings. In keeping with sustainable development objectives, this technology not only guarantees peak performance and passenger comfort but also helps lower energy use and carbon emissions.

6. Recommendations

Based on this research, we consider the following recommendations to be beneficial.
Integration of Advanced Technologies: To further maximize the performance of DX Split Units, future studies should investigate the integration of cutting-edge energy-saving technologies, such as thermal comfort control based on deep reinforcement learning. These innovations can reduce energy use without sacrificing occupant comfort.
Building Envelope Improvements: It is advised to use energy-efficient materials, such as low-emissivity (low-E) glass and appropriate shading devices, to improve the building envelope in order to lower cooling and heating loads. By taking these steps, HVAC systems' yearly energy usage can be greatly decreased.

References

ASHRAE. (2020). *ASHRAE handbook—Heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment*. ASHRAE.

Ahmad, K., Badshah, S., & Rafique, A. F. (2014). A simulated case study of an office building in Pakistan to improve energy efficiency. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, *3*(2). https://www.researchgate.net/publication/311644954

Aized, T., Mehmood, S., & Anwar, Z. (2017). Building energy consumption analysis, energy saving measurements, and verification by applying HAP software. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, *21*, 1–10.

Alavy, M., & Siegel, J. A. (2019). IAQ and energy implications of high-efficiency filters in residential buildings: A review (RP-1649). *Science and Technology for the Built Environment*, *25*(3), 261–271. https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1526012

ASHRAE. (n.d.). *ASHRAE climatic design conditions (2009/2013/2017/2021)*. Retrieved March 12, 2025, from https://ashrae-meteo.info/v2.0/index.php

Ding, Z. K., Fu, Q. M., Chen, J. P., Wu, H. J., Lu, Y., & Hu, F. Y. (2022). Energy-efficient control of thermal comfort in multi-zone residential HVAC via reinforcement learning. *Connection Science*, *34*(1), 2364–2394. https://doi.org/10.1080/09540091.2022.2120598

DOAS sizing summary for DX split unit (alternative: DX split unit). (n.d.). *Unpublished technical document*.

Ghazni climate, weather by month, average temperature (Afghanistan). (n.d.). *Weather Spark*. Retrieved March 12, 2025, from https://weatherspark.com/y/106638/Average-Weather-in-Ghazni-Afghanistan-Year-Round

Huang, J., & Franconi, E. (1999). *Commercial heating and cooling loads component analysis* (Report No. LBNL-37208). Lawrence Berkeley National Laboratory.

Mitterrutzner, B., Callegher, C. Z., Fraboni, R., Wilczynski, E., & Pezzutto, S. (2023). Review of heating and cooling technologies for buildings: A techno-economic case study of eleven European countries. *Energy*, *284*, 129252. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129252

Saragasan, S., & Sies, M. F. (2021). Comparison of cooling load calculation using the manual method and the Hourly Analysis Program. *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*, *2*(2), 972–981. https://doi.org/10.30880/rpmme.2021.02.02.105

Su, L., Ouyang, J., & Yang, L. (2023). Mixed-mode ventilation based on adjustable air velocity for energy benefits in residential buildings. *Energies*, *16*(6), 2746. https://doi.org/10.3390/en16062746

Zangheri, P., Armani, R., Pietrobon, M., Pagliano, L., Kockat, J., Rohde, C., & Isi, F. (2014). *Heating and cooling energy demand and loads for building types in different EU countries* (Deliverable D2.3, Entranze Project). http://www.entranze.eu

Zaphar, S., & Sheworke, T. (2018). Computer program for cooling load estimation and comparative analysis with the Hourly Analysis Program (HAP) software. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, *7*(7). http://www.ijltemas.in

Zgham, W., Shirzad, S., & Fatemi, S. A. Z. (2024). Energy assessment and comparative study of mono and poly solar PV technologies using advanced PVsyst software. *Archives of Advanced Engineering Science*. https://doi.org/10.47852/bonviewaaes42021881

GHAZNI TECHNICAL UNIVERSITY
DEPUTY CHANCELLERY FOR SCIENTIFIC RESEARCH
AND JOURNAL AFFAIRS
SCIENTIFIC JOURNAL DIRECTORATE
GENERAL MANAGEMENT OF THE SCIENTIFIC JOURNAL

Zarkashan Journal of Engineering Studies

Volume 1, Issue 2, Spring 1405 (Solar Hijri), Corresponding to 1447 AH