

Digital Twin of Atmospheric Environment: Sensory Data Fusion for High-Resolution PM2.5 Estimation and Action Policies Recommendation

Md Khaja Pasha¹, Md Touseef Sumer², . Sapna Gangrade³, Zainab Unnissa⁴

^{1, 2, 3, 4} Assistant professor,

Department of Electronics and Communication Engineering, Lords Institute of Engineering and Technology, Hyderabad, Telangana.

వాతావరణ పర్యావరణం యొక్క డిజిటల్ ట్విన్: హై-రిజల్యూషన్ PM 2.5 అంచనా మరియు కార్యాచరణ విధానాల సిఫార్సు కోసం సెన్సర్ డేటా ఫ్యూజన్

ఎండి ఖాజా పాషా¹, ఎండి తౌసీఫ్ సుమర్², . సప్నా గాంగ్రేడ్³, జైనబ్ ఉన్నిసా⁴

^{1, 2, 3, 4} అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్,

విభాగం ఎలక్ట్రానిక్స్ మరియు కమ్యూనికేషన్ ఇంజనీరింగ్, లార్డ్స్ ఇన్స్టిట్యూట్ యొక్క ఇంజనీరింగ్ మరియు టెక్నాలజీ, హైదరాబాద్, తెలంగాణ.

వియక్త

ఈ అధ్యయనం 2.5 మైక్రోగ్రామ్స్ (PM2.5) కంటే తక్కువ పరిమాణంలో ఉండే కణ పదార్థం వల్ల కలిగే ఆరోగ్య ప్రమాదాలను పరిష్కరిస్తుంది, ఇవి ఊపిరితిత్తులు మరియు రక్తప్రవాహంలోకి లోతుగా చొచ్చుకుపోయి శ్వాసకోశ మరియు హృదయ సంబంధ సమస్యలకు దారితీస్తాయి. సాంప్రదాయ పర్యవేక్షణ పద్ధతుల యొక్క అసమర్థతలను మరియు పరిమిత కవరేజీని అధిగమించడానికి, వాతావరణ వాతావరణం యొక్క డిజిటల్ ట్విన్ (DT) అభివృద్ధి చేయబడింది, రిమోట్ సెన్సింగ్ మరియు పరిశీలనా డేటాను డైనమిక్ ప్రాతినిధ్యం కోసం ఫీడ్బ్యాక్ మెకానిజంలతో అనుసంధానిస్తుంది. PM2.5 స్థాయిలు యాదృచ్ఛిక అటవీ మరియు గ్రేడియంట్ బూస్టింగ్ నమూనాల సమిష్టిని ఉపయోగించి అంచనా వేయబడతాయి, అధిక ఖచ్చితత్వంతో బలమైన అంచనాలను ఇస్తాయి (RMSE 38.94, R² 0.728). అంచనా వేసిన విలువలు కాలుష్య కారకాలను చెదరగొట్టడానికి క్లౌడ్ సీడింగ్, ఇండోర్ కాలుష్యాన్ని తగ్గించడానికి షెడ్యూల్ చేయబడిన గాలి వడపోత మరియు అధిక కాలుష్య రోజులలో నివారణ చర్యలను ప్రోత్సహించడానికి పబ్లిక్ SMS హెచ్చరికలు వంటి కార్యాచరణ సిఫార్సులను తెలియజేస్తాయి. అత్యంత ప్రభావవంతమైన కార్యాచరణ విధానాలను గుర్తించడానికి ఆప్టిమైజేషన్ సమస్య

రూపొందించబడింది. అదనంగా, అధ్యయనం PM2.5 స్థాయిలకు వేరియబుల్ సహకారాలను పరిమాణాత్మకంగా అంచనా వేస్తుంది, వాయు కాలుష్యం యొక్క ప్రతికూల ఆరోగ్య ప్రభావాలను తగ్గించడానికి మ్యాప్లను అందిస్తూ పర్యావరణ పర్యవేక్షణ మరియు నిర్వహణను మెరుగుపరచడంలో డిజిటల్ కవలల సామర్థ్యాన్ని ప్రదర్శిస్తుంది.

I. పరిచయం

వాయు కాలుష్యం అత్యంత తీవ్రమైన పర్యావరణ సవాళ్లలో ఒకటి, ఇది ప్రపంచవ్యాప్తంగా గణనీయమైన ఆరోగ్య ప్రమాదాలకు కారణమవుతుంది. ప్రపంచ ఆరోగ్య సంస్థ (WHO) ప్రకారం, వాయు కాలుష్యం వల్ల ఏటా 4.2 మిలియన్ల మరణాలు సంభవిస్తున్నాయి మరియు 10 మందిలో 9 మంది WHO మార్గదర్శకాల పరిమితులను మించి గాలిని పీలుస్తున్నారు. వివిధ కాలుష్య కారకాలలో, PM2.5 - 2.5 మైక్రోమీటర్ల కంటే చిన్న కణ పదార్థం - ఊపిరితిత్తులలోకి లోతుగా చొచ్చుకుపోయే సామర్థ్యం కారణంగా ముఖ్యంగా ప్రమాదకరమైనది, దీని వలన తీవ్రమైన శ్వాసకోశ మరియు హృదయ సంబంధ వ్యాధులు వస్తాయి. PM2.5 తగ్గింపు కోసం ప్రభావవంతమైన విధానాలను అభివృద్ధి చేయడం చాలా ముఖ్యం, అయినప్పటికీ సాంప్రదాయ భూ పర్యవేక్షణ వ్యవస్థలు చాలా తక్కువగా, ఖరీదైనవిగా మరియు కవరేజీలో పరిమితంగా ఉంటాయి, అనేక ప్రాంతాలలో సకాలంలో నివారణ చర్యలకు అవి సరిపోవు.

రిమోట్ సెన్సింగ్ మరియు వాతావరణ డేటా మోడలింగ్లో పురోగతులు PM2.5 అంచనాకు ఆశాజనకమైన ప్రత్యామ్నాయాలను అందిస్తాయి. మల్టిపుల్ లీనియర్ రిగ్రెషన్ (MLR), మిక్స్డ్-ఎఫెక్ట్ మోడల్ (MEM), కెమికల్ ట్రాన్స్పోర్ట్ మోడల్ (CTM) మరియు జియోగ్రాఫిక్ వేయిటెడ్ రిగ్రెషన్ (GWR) వంటి ప్రారంభ నమూనాలు విస్తృతంగా అన్వేషించబడ్డాయి. ప్రతి మోడల్ దాని అప్లికేషన్ దృశ్యం ఆధారంగా నిర్దిష్ట బలాలు మరియు బలహీనతలను కలిగి ఉంటుంది. ఉదాహరణకు, MEM అరుదైన డేటాతో బాగా పనిచేస్తుంది, CTM ప్రపంచ స్థాయి అంచనాలకు మెరుగ్గా ఉంటుంది మరియు GWR స్థానిక సెట్టింగ్లలో రాణిస్తుంది, అయితే MLR బలహీనమైన అంచనా సామర్థ్యాలను చూపించింది. సహాయక వాతావరణ వేరియబుల్స్ మరియు భూ వినియోగ డేటాను చేర్చడం మోడల్ ఖచ్చితత్వం మరియు పనితీరును పెంచడంలో కీలకమైనదిగా కనుగొనబడింది. మరింత అధునాతన యంత్ర అభ్యాసం (ML) మరియు లోతైన అభ్యాసం (DL) పద్ధతుల ఆవిర్భావం PM2.5 అంచనా పద్ధతుల దృష్టిని మార్చింది. అయితే, ఆచరణాత్మక అనువర్తనాలు మరియు ఈ నమూనాలను విస్తృత చట్రాలలోకి ఏకీకృతం చేయడం ఇంకా తక్కువగా అన్వేషించబడలేదు. డిజిటల్ ట్వీన్స్ (DT) - ద్వి దిశాత్మక సమాచార మార్పిడితో పర్యావరణాలు లేదా వస్తువుల డిజిటల్ ప్రతిరూపాలు - అనే భావన సంభావ్య పరిష్కారంగా ఆకర్షణను పొందింది. గాలి నాణ్యత నియంత్రణలో, DT ఫైఫ్టైన్ నివారణ చర్యలు వంటి సమాచారం మరియు

స్వయంచాలక నిర్ణయాలు తీసుకోవడానికి మోడల్ అంచనాలను ఉపయోగించుకోవచ్చు. దాని వాగ్దానం ఉన్నప్పటికీ, PM2.5 నిర్వహణ కోసం DT ల అమలుకు సంబంధించి క్లిష్టమైన ప్రశ్నలు తెరిచి ఉన్నాయి, ఈ రంగంలో భవిష్యత్తు పరిశోధన మరియు అభివృద్ధికి మార్గం సుగమం చేస్తుంది.

II. సాహిత్యం సమీక్ష:

ఈ సూచనలు పర్యావరణ ఆరోగ్యం, అధునాతన మోడలింగ్ పద్ధతులు మరియు వినూత్న సాంకేతికతలపై విభిన్న అధ్యయనాలను కలిగి ఉన్నాయి. హోయెక్ మరియు ఇతరులు (2013) దీర్ఘకాలిక వాయు కాలుష్య బహిర్గతం మరియు కార్డియో-శ్వాసకోశ మరణాలకు దాని సంబంధాన్ని సమీక్షించారు, జనాభా మరియు పద్ధతిపరమైన తేడాల కారణంగా ప్రభావాలలో వైవిధ్యాన్ని హైలైట్ చేశారు. బ్రూక్ మరియు ఇతరులు (2010) కణ పదార్థాల బహిర్గతం మరియు హృదయ సంబంధ వ్యాధుల మధ్య కారణ సంబంధాన్ని పరిశీలించారు. లండన్ మరియు లీ (2017) మోడల్ అంచనాలను వివరించడానికి SHAPని ప్రవేశపెట్టారు, ఫీచర్ ప్రాముఖ్యతలో స్థిరత్వాన్ని అందించారు. గ్రీన్ మరియు వికర్స్ (2017) సంక్లిష్ట వ్యవస్థ ప్రవర్తనను అంచనా వేయడానికి వర్చువల్ ప్రతిరూపాలుగా డిజిటల్ ట్విన్స్ను అన్వేషించారు. పిలియానిడిస్ మరియు ఇతరులు (2021) వ్యవస్థ నియంత్రణను మెరుగుపరచడానికి వ్యవసాయంలో డిజిటల్ ట్విన్ అనువర్తనాలను చర్చించారు. కెట్లర్ మరియు ఇతరులు (2020) నగర నిర్వహణ మెరుగుదలల కోసం పట్టణ ప్రణాళికలో డిజిటల్ ట్విన్స్ పాత్రను సమీక్షించారు. టోబియాస్ మరియు ఇతరులు (2020) బార్సిలోనాలో COVID-19 లాక్డౌన్ సమయంలో గాలి నాణ్యత మార్పులను విశ్లేషించారు, కాలుష్య కారకాల తగ్గింపులు మరియు ఓజోన్ పెరుగుదలను గుర్తించారు. చివరగా, లిమ్ మరియు ఇతరులు. (2021) డేటాసెట్లలో వర్తించే, అర్థమయ్యే మరియు అధిక-పనితీరు గల మల్టీ-హోజాన్ టైమ్ సిరీస్ అంచనా కోసం టెంపోరల్ ష్రాజ్స్ ఫ్రామ్స్ ఫార్మర్ను ప్రదర్శించింది. ఈ సేకరణ పర్యావరణ పర్యవేక్షణ, ప్రిడిక్టివ్ అనలిటిక్స్ మరియు నిర్ణయం తీసుకునే ఫ్రేమ్వర్క్లలో పురోగతిని ప్రతిబింబిస్తుంది.

III. వాతావరణ పర్యావరణం యొక్క డిజిటల్ జంట:

వాతావరణ వాతావరణంలోని డిజిటల్ ట్విన్ PM2.5 సాంద్రతల అంచనాను మెరుగుపరచడానికి మరియు కార్యాచరణ విధాన సిఫార్సులను అందించడానికి ఇంద్రియ డేటా ష్రాజ్స్ మరియు ప్రిడిక్టివ్ మోడలింగ్ను ఏకీకృతం చేస్తుంది. ఇది భౌతిక వాతావరణ వ్యవస్థ యొక్క డైనమిక్ వర్చువల్ ప్రతిరూపాన్ని సూచిస్తుంది, రిమోట్ సెన్సింగ్ మరియు గ్రౌండ్-బేస్డ్ అబ్జర్వేషన్ల డేటాను రియల్-టైమ్ అప్డేట్ కోసం ఫీడ్బ్యాక్ మెకానిజంలతో కలుపుతుంది. రాండమ్ ఫారెస్ట్ మరియు గ్రేడియంట్ బూస్టింగ్ వంటి

అధునాతన మెషిన్ లెర్నింగ్ మోడల్లను అధిక-రిజల్యూషన్ PM2.5 అంచనాల కోసం ఉపయోగిస్తారు, ప్రభావవంతమైన ఉపశమన వ్యూహాలను గుర్తించడానికి ఆప్టిమైజేషన్ ఫ్రేమ్వర్క్లతో. ఈ వ్యూహాలలో క్లాడ్ సీడింగ్, ఎయిర్ ఫిల్టరింగ్ షెడ్యూల్లు మరియు అధిక-కాలుష్య రోజులకు పబ్లిక్ నోటిఫికేషన్లు వంటి చర్యలు ఉన్నాయి. ఇంద్రియ డేటా, రియల్-టైమ్ ఇంటరాక్షన్ మరియు పునరావృత మెరుగుదలలను చేర్చడం ద్వారా, డిజిటల్ ట్విన్ గాలి నాణ్యతను పర్యవేక్షించడానికి మరియు నిర్వహించడానికి, కాలుష్య సంబంధిత ఆరోగ్య ప్రమాదాలను తగ్గించడానికి వినూత్న పరిష్కారాలను అందించడానికి ఒక బలమైన వేదికను సృష్టిస్తుంది.

PM2.5 అంచనాలో రాస్పిర్రీ పై:

అంచనా మరియు విధాన సిఫార్సు కోసం ఒక బలమైన వ్యవస్థను రూపొందించడానికి కింది భాగాలను ఉపయోగించగలదు. హార్డ్వేర్ సెటప్లో గ్యాస్ సెన్సార్లకు (MQ2, MQ7, MQ135) అనుసంధానించబడిన Raspberry Pi Pico మైక్రోకంట్రోలర్ మరియు గాలి నాణ్యత పారామితులను పర్యవేక్షించడానికి PM2.5 డస్ట్ సోక్ పార్టికల్ సెన్సార్ ఉన్నాయి. OLED డిస్ప్లే రియల్-టైమ్ విజువల్ ఫీడ్బ్యాక్ను అందిస్తుంది, అయితే WiFi మాడ్యూల్ డేటా ట్రాన్స్మిషన్ కోసం వైర్లెస్ కమ్యూనికేషన్లను అనుమతిస్తుంది. అధిక కాలుష్య స్థాయిల సమయంలో నివారణ చర్యల కోసం SMS నోటిఫికేషన్ల వంటి హెచ్చరికలను పంపడానికి GSM మాడ్యూల్ను ఏకీకృతం చేయవచ్చు. ఈ వ్యవస్థలో గాలి ప్రవాహాన్ని నియంత్రించడానికి ఎయిర్ వాల్వ్ మోటార్ మరియు అలారాలు లేదా హెచ్చరికల కోసం బజర్ కూడా ఉన్నాయి. ఈ కార్యాచరణలకు మద్దతు ఇవ్వడానికి, సాఫ్ట్వేర్ భాగాలు అభివృద్ధి మరియు విస్తరణ కోసం Arduino IDEతో పాటు ఎంబెడెడ్ C మరియు మైక్రో పైథాన్లో ప్రోగ్రామింగ్ను కలిగి ఉంటాయి. ఈ కలయిక డిజిటల్ ట్విన్ ఫ్రేమ్వర్క్లో అవసరమైన డైనమిక్ మరియు హై-రిజల్యూషన్ సామర్థ్యాలకు అనుగుణంగా సెన్సర్ డేటా ఫ్యూజన్, రియల్-టైమ్ ఇంటరాక్షన్ మరియు కార్యాచరణ సిఫార్సులను సులభతరం చేస్తుంది.

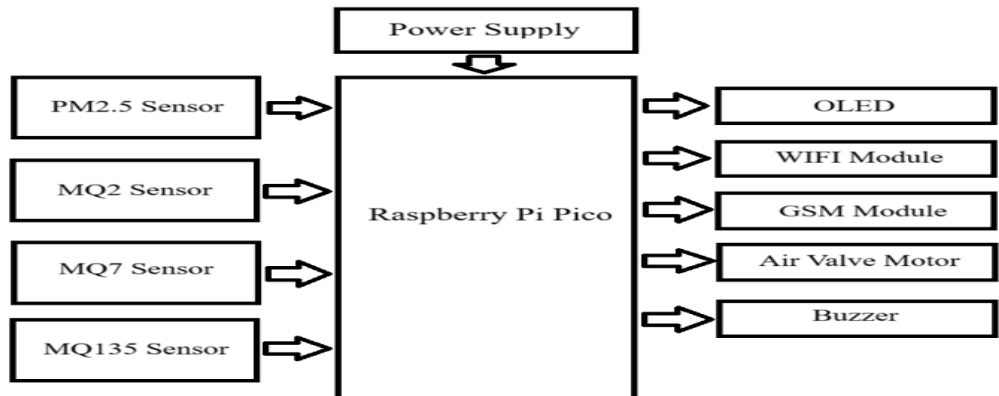
IV. ప్రతిపాదించబడింది వ్యవస్థ

ప్రతిపాదిత డిజిటల్ ట్విన్ (DT) ఆధారిత PM2.5 వ్యవస్థ వాయు కాలుష్యాన్ని సమర్థవంతంగా పర్యవేక్షించడానికి మరియు తగ్గించడానికి అధునాతన సాంకేతికతలు మరియు డేటా ఫ్యూజన్ పద్ధతులను ఏకీకృతం చేస్తుంది. ఇది సమగ్ర డేటాసెట్ను రూపొందించడానికి గాలి నాణ్యత మానిటర్ల నుండి ఉపగ్రహ చిత్రాలు మరియు గ్రౌండ్ అబ్జర్వేషన్ల డేటా వంటి రిమోట్ సెన్సింగ్ డేటాను సేకరించడం

మరియు విలీనం చేయడంతో ప్రారంభమవుతుంది. రాండమ్ ఫారెస్ట్ మరియు గ్రేడియంట్ బూస్టింగ్ వంటి మెషిన్ లెర్నింగ్ మోడల్లు PM2.5 స్థాయిలను అంచనా వేయడానికి ఉపయోగించబడతాయి, భవిష్యత్ ఇన్పుట్ డేటాను సర్దుబాటు చేయడానికి ఫీడ్బ్యాక్ మెకానిజంల ద్వారా మెరుగుపరచబడతాయి. శిక్షణ పొందిన DT మోడల్ అధిక-రిజల్యూషన్ PM2.5 అంచనాలను అందిస్తుంది మరియు కాలుష్యాన్ని ప్రభావితం చేసే కీలక వేరియబుల్స్‌ను విశ్లేషిస్తుంది. కాలుష్య కారకాలను చెదరగొట్టడానికి క్లౌడ్ సీడింగ్, ఇండోర్ కాలుష్యాన్ని తగ్గించడానికి ఎయిర్ ఫిల్టరింగ్ షెడ్యూల్లు మరియు అధిక కాలుష్య రోజుల గురించి ప్రజలకు తెలియజేయడానికి SMS నోటిఫికేషన్లు వంటి ప్రభావవంతమైన కార్యాచరణ విధానాలను గుర్తించడానికి ఆప్టిమైజేషన్ ఫ్రేమ్వర్క్ ఉపయోగించబడుతుంది.

సిఫార్సు చేయబడిన విధానాల ప్రభావాన్ని నిర్ధారిస్తూ, వాస్తవ ప్రపంచ దృశ్యాలలో అమలు మరియు నిరంతర పర్యవేక్షణ ద్వారా ఈ వ్యవస్థ ముందుకు సాగుతుంది. భవిష్యత్ అంచనాలు మరియు సిఫార్సులను మెరుగుపరచడానికి రియల్-టైమ్ డేటా మరియు ఫీడ్బ్యాక్ లూప్లు DT మోడల్‌ను మెరుగుపరుస్తాయి, అయితే మోడల్ పనితీరును అంచనా వేయడానికి RMSE మరియు R^2 వంటి మెట్రిక్ లను క్రమం తప్పకుండా మూల్యాంకనం చేస్తారు. కొత్త డేటా వనరులు మరియు అల్గారిథమ్‌లను చేర్చడానికి చేసే ప్రయత్నాలు వ్యవస్థ యొక్క ఖచ్చితత్వం మరియు విశ్వసనీయతను మరింత పెంచడం లక్ష్యంగా పెట్టుకున్నాయి. ఈ సమగ్ర విధానం PM2.5 కాలుష్య సవాళ్లను పరిష్కరించడంలో DT టెక్నాలజీ సామర్థ్యాన్ని హైలైట్ చేస్తుంది మరియు మానవ ఆరోగ్యాన్ని రక్షించడానికి మరియు ప్రాంతాలలో గాలి నాణ్యతను మెరుగుపరచడానికి డైనమిక్ పరిష్కారాన్ని అందిస్తుంది.

వి. బ్లాక్ రేఖాచిత్రం



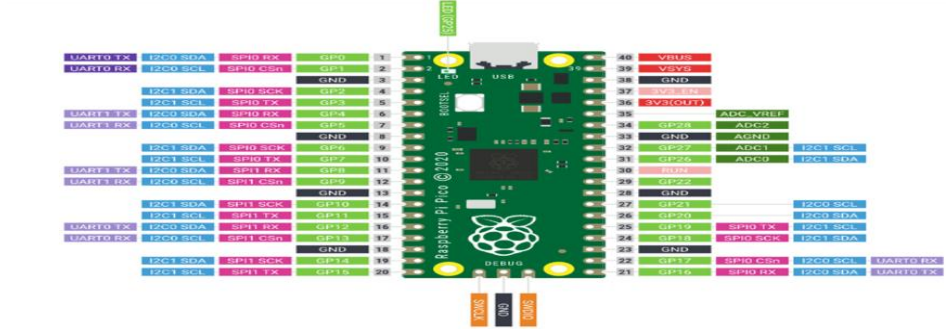
బ్లాక్ రేఖాచిత్రం యొక్క వాతావరణ పర్యావరణం యొక్క డిజిటల్ జంట

రాస్పబ్బరీ పై పికో మైక్రోకంట్రోలర్:

Raspberry Pi Pico అనేది Raspberry Pi RP2040 మైక్రోకంట్రోలర్ చిప్ ఆధారంగా రూపొందించబడిన మైక్రోకంట్రోలర్ బోర్డు. Raspberry Pi కంప్యూటర్ల మాదిరిగానే, Raspberry Pi Pico 40 కనెక్షన్లతో కూడిన పిన్ హెడర్ను కలిగి ఉంటుంది, అలాగే మీ ప్రోగ్రామ్లను మరొక కంప్యూటర్ నుండి నేరుగా విశ్లేషించడానికి మిమ్మల్ని అనుమతించే కొత్త డీబగ్ కనెక్షన్ను కలిగి ఉంటుంది (సాధారణంగా Raspberry Piలోని GPIO పిన్లకు నేరుగా కనెక్ట్ చేయడం ద్వారా). Raspberry Pi Pico అనేది Raspberry Pi రూపొందించిన కస్టమ్-బిల్డ్ RP2040 మైక్రోకంట్రోలర్ చిప్ చుట్టూ రూపొందించబడిన సరికొత్త, తక్కువ-ధర, కానీ అత్యంత సౌకర్యవంతమైన అభివృద్ధి బోర్డు. Raspberry Pi Pico - సంక్షిప్తంగా 'Pico' - డ్యూయల్-కోర్ కార్టెక్స్-M0+ ప్రాసెసర్ (అందుబాటులో ఉన్న అత్యంత శక్తి-సమర్థవంతమైన ఆర్మీ ప్రాసెసర్), 264kb SRAM, 2MB ఫ్లాష్ స్టోరేజ్, పరికరం మరియు హోస్ట్ మద్దతుతో USB 1.1 మరియు విస్తృత శ్రేణి సౌకర్యవంతమైన I/O ఎంపికలను కలిగి ఉంటుంది.

రాస్పబ్బరీ పై పికో యొక్క లక్షణాలు :

- 21 మిమీ × 51 మిమీ ఫారమ్ ఫ్యాక్టర్
- UK లో రాస్పబ్బరీ పై రూపొందించిన RP2040 మైక్రోకంట్రోలర్ చిప్
- డ్యూయల్-కోర్ ఆర్మీ కార్టెక్స్ -M0+ ప్రాసెసర్, 133 MHz వరకు నడుస్తున్న ఫ్లెక్సిబుల్ క్లాక్
- 264KB ఆన్-చిప్ SRAM
- 2MB ఆన్-బోర్డ్ QSPI ఫ్లాష్
- 3 అనలాగ్ ఇన్పుట్లతో సహా 26 మల్టీఫంక్షన్ GPIO పిన్లు
- 2 × UART , 2 × SPI కంట్రోలర్లు, 2 × I2C కంట్రోలర్లు, 16 × PWM ఛానెల్లు
- 1 × USB 1.1 కంట్రోలర్ మరియు PHY , హోస్ట్ మరియు పరికర మద్దతుతో
- కస్టమ్ పెరిఫెరల్ సపోర్ట్ కోసం 8 × ప్రోగ్రామబుల్ I/O (PIO) స్టేట్ మెషిన్లు
- మద్దతు ఉన్న ఇన్పుట్ పవర్ 1.8–5.5V DC
- ఆపరేటింగ్ ఉష్ణోగ్రత -20°C నుండి +85°C వరకు
- కాస్టలేటెడ్ మాడ్యూల్ క్యారియర్ బోర్డులకు నేరుగా సోల్డరింగ్ చేయడానికి అనుమతిస్తుంది.
- USB ద్వారా మాస్ స్టోరేజ్ ఉపయోగించి డ్రాగ్-అండ్-డ్రాప్ ప్రోగ్రామింగ్
- తక్కువ శక్తి గల నిద్ర మరియు నిద్రాణస్థితి మోడ్లు
- ఖచ్చితమైన ఆన్-చిప్ గడియారం
- ఉష్ణోగ్రత సెన్సార్
- యాక్సిలరేటెడ్ పూర్ణాంకం మరియు స్టోటింగ్-పాయింట్ లైబ్రరీలు ఆన్-చిప్



రాస్పెర్రీ పై పికో పిన్ వివరణ:

అంజీర్- రాస్పెర్రీ పై పికో పిన్ అవుట్

గ్యాస్ సెన్సార్

వాయువుల ఉనికిని గుర్తించే పరికరం , ఇది సాధారణంగా భద్రతా వ్యవస్థలో భాగంగా ఉంటుంది. ఈ రకమైన పరికరాలు గ్యాస్ లీక్ ను గుర్తించడానికి మరియు నియంత్రణ వ్యవస్థతో ఇంటర్ ఫేస్ చేయడానికి ఉపయోగించబడతాయి, తద్వారా ప్రక్రియ స్వయంచాలకంగా ఆపివేయబడుతుంది. గ్యాస్ డిటెక్టర్ లీక్ జరుగుతున్న ప్రాంతంలోని ఆపరేటర్లకు అలారం మోగించగలదు, తద్వారా వారు ఆ ప్రాంతాన్ని వదిలి వెళ్ళే అవకాశం లభిస్తుంది. ఈ రకమైన పరికరం ముఖ్యమైనది ఎందుకంటే మానవులు లేదా జంతువులు వంటి జీవసంబంధమైన జీవితానికి హాని కలిగించే అనేక వాయువులు ఉన్నాయి.



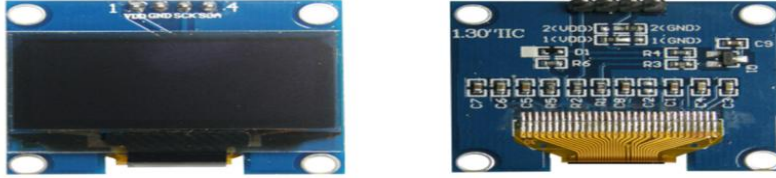
చిత్రం -: గ్యాస్ సెన్సార్

లక్షణాలు

- LPG, సహజ వాయువు, టోన్ గ్యాస్ కు అధిక సున్నితత్వం.
- మద్యం, పొగకు స్వల్ప సున్నితత్వం.
- వేగవంతమైన ప్రతిస్పందన.
- స్థిరమైన మరియు దీర్ఘకాల జీవితం.
- సాధారణ డ్రైవ్ సర్క్యూట్.

OLED (సేంద్రియ కాంతి ఉద్గార డయోడ్లు):

OLED (ఆర్గానిక్ లైట్ ఎమిటింగ్ డయోడ్లు) అనేది ఒక ప్లాట్ లైట్ ఎమిటింగ్ టెక్నాలజీ, ఇది రెండు కండక్టర్ల మధ్య వరుస సేంద్రియ సన్నని ఫిల్మ్లను ఉంచడం ద్వారా తయారు చేయబడింది. విద్యుత్ ప్రవాహాన్ని ప్రయోగించినప్పుడు, ప్రకాశవంతమైన కాంతి వెలువడుతుంది. OLED లు బ్యాక్లైట్ అవసరం లేని ఎమిసివ్ డిస్ప్లేలు మరియు LCD డిస్ప్లేల కంటే సన్నగా మరియు సమర్థవంతంగా ఉంటాయి (వీటికి తెల్లటి బ్యాక్లైట్ అవసరం). OLED డిస్ప్లేలు సన్నగా మరియు సమర్థవంతంగా ఉండటమే కాదు - అవి అత్యుత్తమ చిత్ర నాణ్యతను అందిస్తాయి మరియు వాటిని భవిష్యత్తులో పారదర్శకంగా, సరళంగా, మడతపెట్టగలిగేలా మరియు రోల్ చేయగల మరియు సాగదీయగలవిగా కూడా తయారు చేయవచ్చు. OLED లు డిస్ప్లే టెక్నాలజీ భవిష్యత్తును సూచిస్తాయి.



చిత్రం: OLED మాడ్యూల్

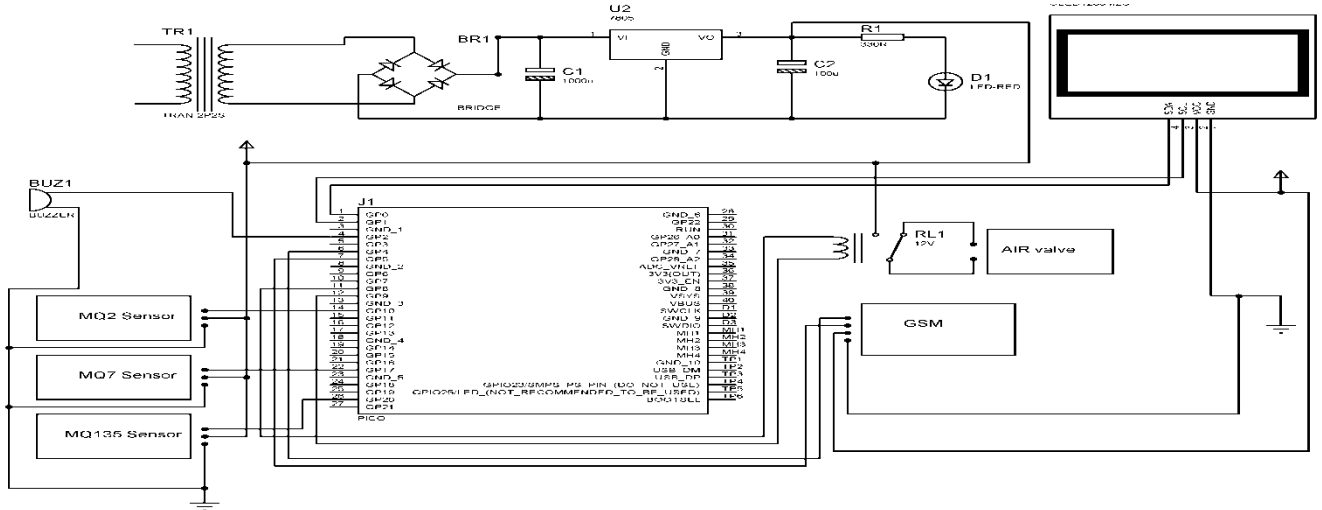
PM2.5 సెన్సార్ మాడ్యూల్

PM2.5 డస్ట్ స్మోక్ సెన్సార్ మాడ్యూల్ GP2Y1010AU0F అనేది ఒక ఆప్టికల్ ఎయిర్ క్వాలిటీ సెన్సార్, ఇది దుమ్ము కణాలను గ్రహించడానికి రూపొందించబడింది. ఇది సిగరెట్ పొగ లాగానే $0.8\mu\text{m}$ కంటే పెద్ద వ్యాసం కలిగిన సూక్ష్మ కణాలను గుర్తించగలదు. గాలిలోని ధూళి యొక్క ప్రతిబింబించే కాంతిని గుర్తించడానికి వీలుగా ఇన్ఫ్రారెడ్ ఉద్గార డయోడ్ మరియు ఫోటోట్రాన్సిస్టర్ ఈ పరికరంలో వికర్ణంగా అమర్చబడి ఉంటాయి. సిగరెట్ పొగ వంటి చాలా సూక్ష్మ కణాలను గుర్తించడంలో ఇది చాలా ప్రభావవంతంగా ఉంటుంది మరియు దీనిని సాధారణంగా ఎయిర్ ప్యూరిఫైయర్ వ్యవస్థలలో ఉపయోగిస్తారు. సెన్సార్ యొక్క అనలాగ్ వోల్టేజ్ అవుట్పుట్ ధూళి సాంద్రతతో సరళంగా ఉంటుంది. విస్తృత శ్రేణి విద్యుత్ సరఫరాకు మద్దతు ఇవ్వడానికి మాడ్యూల్ ఎంబెడెడ్ వోల్టేజ్ బూస్ట్ సర్క్యూట్ను కలిగి ఉంది.



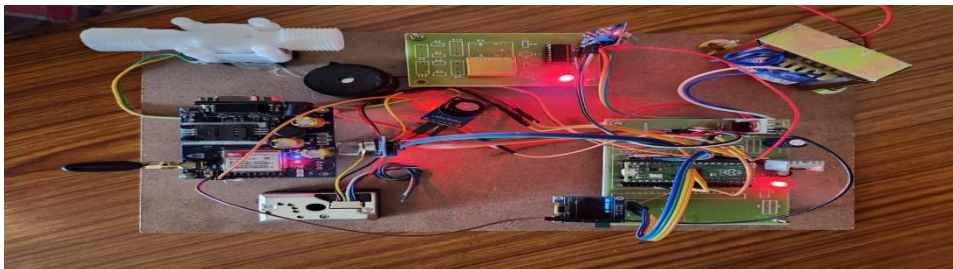
చిత్రం 4.20: PM2.5 సెన్సార్ మాడ్యూల్

V. స్క్రీమాటిక్ రేఖాచిత్రం



VI. ఫలితం

హార్డ్వేర్ కిట్ ఆన్లో ఉన్నప్పుడు



PM2.5 అంచనా మరియు కార్యాచరణ విధానాల కోసం డిజిటల్ ట్విన్ వ్యవస్థ యొక్క విజయవంతమైన అభివృద్ధి ఈ క్రింది వాటికి దారితీసింది:

1. హై-రిజల్యూషన్ PM2.5 పర్యవేక్షణ:

ఈ వ్యవస్థ సెన్సార్లను (MQ2, MQ7, MQ135, మరియు PM2.5 డస్ట్ పార్టికల్ సెన్సార్) ఉపయోగించి PM2.5 మరియు ఇతర వాయు కాలుష్య కారకాలను ఖచ్చితంగా గుర్తించింది. అధిక ఖచ్చితత్వంతో గాలి నాణ్యత యొక్క నిజ-సమయ పర్యవేక్షణను ప్రారంభించింది.

2. ఇంద్రియ డేటా పూజన్:

CO, NO2 మరియు PM2.5 వంటి కాలుష్య కారకాలపై సమగ్ర డేటా సేకరణ కోసం బహుళ సెన్సార్లను ఏకీకృతం చేసింది.

కాలుష్య కారకాల స్థాయిల ఆధారంగా అమలు చేయగల విధానాలను సిఫార్సు చేయడానికి ఇంద్రియ డేటా పూజన్ను ఉపయోగించారు.

3. సమర్థవంతమైన డేటా ప్రాసెసింగ్ :

కాలుష్య ధోరణులను అంచనా వేయడానికి రాస్పెర్రీ పై పికో మైక్రోకంట్రోలర్ నిజ సమయంలో ఇంద్రియ ఇన్పుట్లను ప్రాసెస్ చేసింది.

సాఫ్ట్వేర్ (ఎంబెడెడ్ సి, మైక్రో పైథాన్, ఆర్డునో ఐడిఇ) సజావుగా డేటా నిర్వహణ మరియు సిస్టమ్ నియంత్రణను నిర్ధారిస్తుంది.

4. స్థిరమైన కనెక్టివిటీ:

Wi-Fi మరియు GSM మాడ్యూల్స్ క్లౌడ్ ప్లాట్ఫామ్లతో బలమైన కమ్యూనికేషన్ను నిర్వహించాయి, డైనమిక్ నవీకరణలను ప్రారంభించాయి.

5. ఇంటరాక్టివ్ ఫీడ్బ్యాక్ మెకానిజం:

తక్షణ అభిప్రాయం కోసం OLED డిస్ప్లే కాలుష్య కారకాల స్థాయిలు మరియు సిస్టమ్ స్థితిని ప్రదర్శించింది.

క్లిష్టమైన కాలుష్య స్థాయిల సమయంలో బజర్ వినియోగదారులను అప్రమత్తం చేస్తుంది.

6. అనుకూల నియంత్రణ లక్షణాలు:

సెన్సార్ ఇన్పుట్ల ఆధారంగా గాలి ప్రవాహాన్ని నియంత్రించడానికి, గాలి నాణ్యతను మెరుగుపరచడానికి ఎయిర్ వాల్వ్ మోటారును అమలు చేశారు.

ప్రభావవంతమైన జోక్యాలను నిర్ధారిస్తూ, డైనమిక్ గా అమలు చేయగల విధానాలను సిఫార్సు చేయడం.

7. స్కేలబిలిటీ మరియు విస్తరణ సంభావ్యత:

ఈ వ్యవస్థ రూపకల్పన మరియు కాలుష్య కారకాలను పర్యవేక్షించడానికి లేదా కార్యాచరణలను విస్తరించడానికి కొత్త సెన్సార్లు మరియు మాడ్యూల్స్ జోడించడానికి మద్దతు ఇస్తుంది.

8. శక్తి సామర్థ్యం:

తక్కువ విద్యుత్ వినియోగంతో నిర్వహించబడుతుంది, సమర్థవంతమైన విద్యుత్ సరఫరా రూపకల్పనను ఉపయోగించుకుంటుంది.

9. విధాన నిర్ణయ మద్దతు:

విధాన రూపకర్తలకు ఆధారాల ఆధారిత కార్యాచరణ ప్రణాళికలను రూపొందించడంలో సహాయపడటానికి అధిక రిజల్యూషన్ వాయు కాలుష్య పటాలు మరియు విశ్లేషణలను రూపొందించారు.

స్థిరమైన అభివృద్ధి లక్ష్యాల (SDG లు) అమరిక

SDG 3: మంచి ఆరోగ్యం మరియు శ్రేయస్సు

1. కాలుష్య హాట్ స్పాట్స్ ను గుర్తించడానికి మరియు ఆరోగ్య ప్రమాదాలను తగ్గించడానికి PM2.5 స్థాయిలను ట్రాక్ చేస్తుంది.
2. ఆరోగ్య ధోరణులను అంచనా వేయడానికి మరియు నివారణ సంరక్షణను మెరుగుపరచడానికి డేటాను ఉపయోగిస్తుంది.
3. సురక్షితమైన బహిరంగ కార్యకలాపాల కోసం ప్రజలకు అవగాహన పెంచుతుంది

SDG 11: స్థిరమైన నగరాలు మరియు సంఘాలు

1. గాలి నాణ్యత డేటాను ఉపయోగించి పర్యావరణ అనుకూల పట్టణ ప్రదేశాలను రూపొందించడంలో సహాయపడుతుంది.
2. ట్రాఫిక్ మరియు పారిశ్రామిక ఉద్గార నియంత్రణ కోసం అంతర్దృష్టులను అందిస్తుంది.
3. కాలుష్య సంబంధిత అత్యవసర పరిస్థితులకు నగర సంసిద్ధతను పెంచుతుంది

SDG 13: వాతావరణ చర్య

1. కాలుష్యం మరియు కార్బన్ ఉద్గారాలను తగ్గించడానికి విధాన రూపకల్పనకు మద్దతు ఇస్తుంది.
2. గాలి నాణ్యత అంతర్దృష్టుల ఆధారంగా క్లీన్ ఎనర్జీ షిఫ్ట్లను మార్గనిర్దేశం చేస్తుంది.
3. సమగ్ర కాలుష్య నియంత్రణ కోసం సహకారాన్ని ప్రోత్సహిస్తుంది.

VIII. భవిష్యత్తు పరిధి :

1. అధునాతన డేటా ఇంటిగ్రేషన్
2. AI-ఆధారిత విశ్లేషణలు
3. సమగ్ర పర్యావరణ నమూనా.
4. స్థానికీకరించిన జోక్యాలు
5. స్మార్ట్ సిటీస్ ఇంటిగ్రేషన్

ప్రస్తావనలు

- [1] Wh0 గ్లోబల్ ఎయిర్ క్వాలిటీ మార్గదర్శకాలు: ఓజోన్, నైట్రోజన్ డయాక్సైడ్, సల్ఫర్ డయాక్సైడ్ మరియు కార్బన్ మోనాక్సైడ్. సేకరణ తేదీ: ఫిబ్రవరి 15, 2022.
- [2] జి. హోయేక్, ఆర్.ఎమ్. కృష్ణన్, ఆర్. బీలెన్, ఎ. పీటర్స్, బి. ఓస్ట్రా, బి. బ్రూనెక్స్, మరియు జె.డి. కౌఫ్మాన్, "దీర్ఘకాలిక వాయు కాలుష్య బహిరంగత మరియు కార్డియో-శ్వాసకోశ మరణాలు: ఒక సమీక్ష," ఎన్విరాన్. హెల్త్, వాల్యూమ్. 12, నం. 1, పేజీ. 43, డిసెంబర్. 2013.
- [3] RD బ్రూక్, S . రాజగోపాలన్, CA పోప్, JR బ్రూక్, A . భట్నాగర్, AV డీజ్-రోక్స్, F . హోల్లయిన్, Y . హంగ్, R . V . లుయెష్కర్, MA మిటిల్వాన్, A . పీటర్స్, D . సిస్కావిక్, SC స్కిత్, L . విట్నల్, మరియు JD కౌఫ్మాన్, "పార్తిక్యులేట్ మ్యాటర్ ఎయిర్ పొల్యూషన్ అండ్ కార్డియోవాస్కులర్ డిసీజ్," సర్క్యులేషన్, వాల్యూమ్. 121, నం. 21, పేజీలు. 2331-2378, 2010.
- [4] వై.-ఎల్. జాంగ్ మరియు ఎఫ్. కావో, "చైనాలో నగర స్థాయిలో సూక్ష్మ కణ పదార్థం (PM2.5)," సైన్స్ ప్రతినిధి, వాల్యూమ్. 5, నం. 1, పేజీ. 14884, అక్టోబర్. 2015.
- [5] వై. చు, వై. లియు, ఎక్స్. లి, జెడ్. లియు, హెచ్. లు, వై. లు, జెడ్. మావో, ఎక్స్. చెన్, ఎన్.లి, ఎం. రెన్, ఎఫ్. లియు, ఎల్. టియాన్, జెడ్. జు, మరియు హెచ్. జియాంగ్, "ఉపగ్రహ ఏరోసోల్ ఆప్టికల్ డెప్త్ ఉపయోగించి భూమి PM2.5 గాఢతను అంచనా వేయడంపై సమీక్ష," వాతావరణం, వాల్యూమ్. 7, నం. 10, పేజీ. 129, అక్టోబర్. 2016. [ఆన్లైన్]. అందుబాటులో ఉంది: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/10/129>
- [6] MZ జోహరేస్తానీ, C . కావో, X . ని, B . బషీర్, మరియు S . తలేబీస్పాండరాణి, "యాదృచ్ఛిక అడవి, XG బూస్ట్ మరియు మల్టీసోర్స్ రిమోట్ సెన్సింగ్ డేటాను ఉపయోగించి లోతైన అభ్యాసం ఆధారంగా PM2.5 అంచనా," వాతావరణం, వాల్యూమ్. 10, నం. 7, పేజీ. 373, జూలై. 2019.
- [7] జె. మా, జెడ్. యు, వై. క్యూ, జె. జు, మరియు వై. కావో, "PM2.5 అంచనాలో XG బూస్ట్ మెషిన్ లెర్నింగ్ పద్ధతి యొక్క అప్లికేషన్: షాంఘై యొక్క కేస్ స్టడీ," ఏరోసోల్ ఎయిర్ క్వాలిటీ రెన్., వాల్యూమ్. 20, నం. 1, పేజీలు. 128-138, 2020.
- [8] ఎ. మసూద్ మరియు కె. అహ్మద్, "మెషిన్ లెర్నింగ్ విధానాల ఆధారంగా ఢిల్లీకి కణిక పదార్థం (PM2.5) అంచనాకు ఒక నమూనా," ప్రోక్. కంప్యూట్. సైన్స్., వాల్యూమ్. 167, పేజీలు. 2101-2110, జనవరి 2020.
- [9] MD యాజ్జి, Z . కువాంగ్, K . డిమాకోపాలో, B . బారట్, E . సుయెల్, H . అమిని, A . లియాపుస్టిన్, K . కాటొయన్నీ, మరియు J . స్క్వాట్జ్, "గ్రేటర్ లండన్ ప్రాంతంలో సూక్ష్మ కణ పదార్థాన్ని (PM2.5) అంచనా వేయడం: యంత్ర అభ్యాస పద్ధతులను ఉపయోగించి ఒక సమిష్టి విధానం," రిమోట్ సెన్స్., వాల్యూమ్. 12, నం. 6, పేజీ. 914, 2020.
- [10] టి. లి, ఎం. హువా, మరియు ఎక్స్. వు, "కణ పదార్థాన్ని అంచనా వేయడానికి ఒక హైబ్రిడ్ CNN-LSTM మోడల్ (PM2.5)," IEEE యాక్సెస్, వాల్యూమ్. 8, పేజీలు. 26933-26940, 2020.

Digital Twin of Atmospheric Environment: Sensory Data Fusion for High-Resolution PM2.5 Estimation and Action Policies Recommendation

Md Khaja Pasha¹, Md Touseef Sumer², . Sapna Gangrade³, Zainab Unnissa⁴
,^{1,2,3,4}Assistant professor,

Department of Electronics and Communication Engineering, Lords Institute of Engineering and Technology, Hyderabad, Telangana.

Abstract

This study addresses the health risks posed by particulate matter smaller than 2.5 microns (PM2.5), which can penetrate deep into the lungs and bloodstream, leading to respiratory and cardiovascular issues. To overcome the inefficiencies and limited coverage of traditional monitoring methods, a digital twin (DT) of the atmospheric environment is developed, integrating remote sensing and observational data with feedback mechanisms for dynamic representation. PM2.5 levels are estimated using an ensemble of Random Forest and Gradient Boosting models, yielding robust predictions with high accuracy (RMSE of 38.94, R^2 of 0.728 within a 95% confidence interval). The predicted values inform actionable recommendations such as cloud seeding to disperse pollutants, scheduled air filtering to reduce indoor pollution, and public SMS alerts to encourage preventive measures during high pollution days. An optimization problem is formulated to identify the most impactful action policies. Additionally, the study quantitatively assesses variable contributions to PM2.5 levels, demonstrating the potential of digital twins in enhancing environmental monitoring and management while offering strategies to mitigate the adverse health effects of air pollution.

I. Introduction

Air pollution is one of the most pressing environmental challenges, causing significant health risks worldwide. According to the World Health Organization (WHO), air pollution results in 4.2 million deaths annually, and 9 out of 10 people breathe air that exceeds WHO guideline limits. Among the various pollutants, PM2.5—particulate matter smaller than 2.5 micrometers—is particularly hazardous due to its ability to penetrate deep into the lungs, causing severe respiratory and cardiovascular diseases. Developing effective policies for PM2.5 mitigation is vital, yet traditional ground monitoring systems are sparse, costly, and limited in coverage, making them inadequate for timely preventive measures in many regions.

Advances in remote sensing and meteorological data modeling provide promising alternatives for PM2.5 forecasting. Early models, such as Multiple Linear Regression (MLR), Mixed-Effect Model (MEM), Chemical Transport Model (CTM), and Geographically Weighted Regression (GWR), have been explored extensively. Each model has specific strengths and weaknesses based on its application scenario. For example, MEM performs well with scarce

data, CTM is better for global-scale predictions, and GWR excels in local settings, while MLR has shown the weakest predictive capabilities. Incorporating auxiliary meteorological variables and land-use data has been found crucial in enhancing model accuracy and performance. The emergence of more sophisticated machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques has shifted the focus of PM_{2.5} estimation methods. However, practical applications and integration of these models into broader frameworks remain underexplored. The concept of Digital Twins (DT)—digital replicas of environments or objects with bidirectional information exchange—has gained traction as a potential solution. In air quality control, a DT pipeline can utilize model predictions to make informed and automated decisions, such as preventive actions. Despite its promise, critical questions remain open regarding the implementation of DTs for PM_{2.5} management, paving the way for future research and development in this field

II. Literature Review:

These references encompass diverse studies in environmental health, advanced modeling techniques, and innovative technologies. Hoek et al. (2013) reviewed long-term air pollution exposure and its link to cardio-respiratory mortality, highlighting the variability in effects due to population and methodological differences. Brook et al. (2010) examined the causal relationship between particulate matter exposure and cardiovascular diseases. Lundberg and Lee (2017) introduced SHAP for interpreting model predictions, offering consistency in feature importance. Grieves and Vickers (2017) explored Digital Twins as virtual replicas for predicting complex system behavior. Pylaniadis et al. (2021) discussed Digital Twin applications in agriculture to enhance system control. Ketzler et al. (2020) reviewed the role of Digital Twins in urban planning for city management improvements. Tobías et al. (2020) analyzed air quality changes during the COVID-19 lockdown in Barcelona, noting pollutant reductions and ozone increases. Lastly, Lim et al. (2021) presented the Temporal Fusion Transformer for interpretable and high-performing multi-horizon time series forecasting, applicable across datasets. This collection reflects advancements in environmental monitoring, predictive analytics, and decision-making frameworks.

III. Digital Twin of the Atmospheric Environment:

A Digital Twin of the Atmospheric Environment integrates sensory data fusion and predictive modeling to enhance the estimation of PM_{2.5} concentrations and provide actionable policy recommendations. It represents a dynamic virtual replica of the physical atmospheric system, combining remote sensing and ground-based observational data with feedback mechanisms for real-time updates. Advanced machine learning models, such as Random Forest and Gradient Boosting, are employed for high-resolution PM_{2.5} predictions, with optimization

frameworks to identify impactful mitigation strategies. These strategies include measures like cloud seeding, air filtering schedules, and public notifications for high-pollution days. By incorporating sensory data, real-time interaction, and iterative improvements, the Digital Twin creates a robust platform for monitoring and managing air quality, offering innovative solutions to reduce pollution-related health risks

Raspberry Pi in Estimation of PM2.5:

The A Digital Twin of the Atmospheric Environment can leverage the following components to create a robust system for PM2.5 estimation and policy recommendation. The hardware setup includes a Raspberry Pi Pico Microcontroller connected to gas sensors (MQ2, MQ7, MQ135) and a PM2.5 Dust Smoke Particle Sensor to monitor air quality parameters. An OLED display provides real-time visual feedback, while a WiFi module enables wireless communication for data transmission. A GSM module can be integrated to send alerts, such as SMS notifications, for preventive measures during high pollution levels. The system also includes an air valve motor for controlling air flow, and a buzzer for alarms or warnings. To support these functionalities, the software components include programming in Embedded C and Micro Python, alongside the Arduino IDE for development and deployment. This combination facilitates sensory data fusion, real-time interaction, and actionable recommendations, aligning with the dynamic and high-resolution capabilities required in the Digital Twin framework.

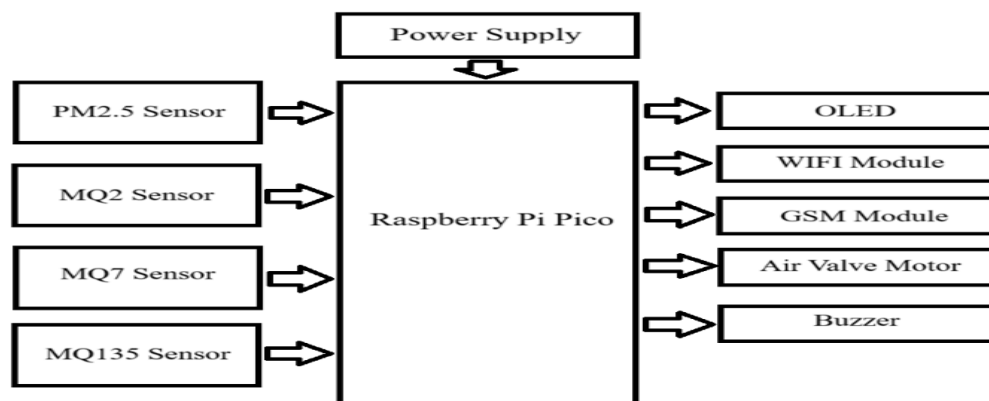
IV. Proposed System

The proposed Digital Twin (DT)-based PM2.5 system integrates advanced technologies and data fusion techniques to monitor and mitigate air pollution effectively. It begins with the collection and fusion of remote sensing data, such as satellite imagery, and ground observational data from air quality monitors to create a comprehensive dataset. Machine learning models like Random Forest and Gradient Boosting are employed to estimate PM2.5 levels, enhanced by feedback mechanisms for adjusting future input data. The trained DT model provides high-resolution PM2.5 predictions and analyzes key variables influencing pollution. An optimization framework is used to identify impactful action policies, such as cloud seeding to disperse pollutants, air filtering schedules to minimize indoor pollution, and SMS notifications to inform the public about high pollution days.

The system advances through implementation and continuous monitoring in real-world scenarios, ensuring the effectiveness of the recommended policies. Real-time data and feedback loops refine the DT model to improve future predictions and recommendations, while metrics such as RMSE and R^2 are regularly evaluated to assess model performance. Efforts to

incorporate new data sources and algorithms aim to enhance the system's accuracy and reliability further. This holistic approach highlights the potential of DT technology in addressing PM2.5 pollution challenges and offers a dynamic solution for protecting human health and improving air quality across regions.

V. Block Diagram



Block diagram of Digital Twin of Atmospheric Environment

Raspberry Pi Pico Microcontroller:

The Raspberry Pi Pico is a microcontroller board based on the Raspberry Pi RP2040 microcontroller chip. Like Raspberry Pi computers, Raspberry Pi Pico features a pin header with 40 connections, along with a new debug connection enabling you to analyze your programs directly from another computer (typically by connecting it directly to the GPIO pins on a Raspberry Pi). Raspberry Pi Pico is a brand new, low-cost, yet highly flexible development board designed around a custom-built RP2040 microcontroller chip designed by Raspberry Pi. Raspberry Pi Pico – ‘Pico’ for short – features a dual-core Cortex-M0+ processor (the most energy-efficient Arm processor available), 264kb of SRAM, 2MB of flash storage, USB 1.1 with device and host support, and a wide range of flexible I/O options.

Features of Raspberry Pi Pico:

- 21 mm × 51 mm form factor
- RP2040 microcontroller chip designed by Raspberry Pi in the UK

- Dual-core Arm Cortex-M0+ processor, flexible clock running up to 133 MHz
- 264KB on-chip SRAM
- 2MB on-board QSPI Flash
- 26 multifunction GPIO pins, including 3 analog inputs
- $2 \times$ UART, $2 \times$ SPI controllers, $2 \times$ I2C controllers, $16 \times$ PWM channels
- $1 \times$ USB 1.1 controller and PHY, with host and device support
- $8 \times$ Programmable I/O (PIO) state machines for custom peripheral support
- Supported input power 1.8–5.5V DC
- Operating temperature -20°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Castellated module allows soldering direct to carrier boards
- Drag-and-drop programming using mass storage over USB
- Low-power sleep and dormant modes
- Accurate on-chip clock
- Temperature sensor
- Accelerated integer and floating-point libraries on-chip

Raspberry Pi Pico Pin Description:

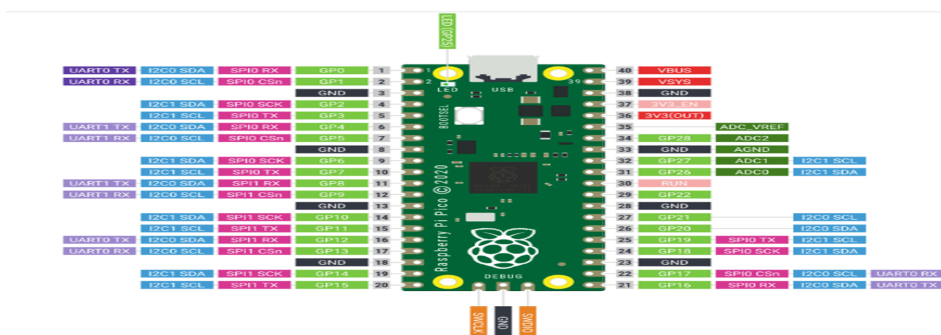


Fig- Raspberry Pi Pico Pinout

GAS SENSOR

A gas detector is a device which detects the presence of various gases within an area, usually as part of a safety system. This type of equipment is used to detect a gas leak and interface with a control system so a process can be automatically shut down. A gas detector can also sound an alarm to operators in the area where the leak is occurring, giving them the opportunity to leave the area. This type of device is important because there are many gases that can be harmful to organic life, such as humans or animals.



Fig -: Gas Sensor

FEATURES

- High sensitivity to LPG, natural gas, town gas.
- Small sensitivity to alcohol, smoke.
- Fast response.
- Stable and long life.
- Simple drive circuit.

OLED (Organic Light Emitting Diodes):

OLED (Organic Light Emitting Diodes) is a flat light emitting technology, made by placing a series of organic thin films between two conductors. When electrical current is applied, a bright light is emitted. OLEDs are emissive displays that do not require a backlight and so are thinner and more efficient than LCD displays (which do require a white backlight). OLED displays are not just thin and efficient - they provide the best image quality ever and they can also be made transparent, flexible, foldable and even rollable and stretchable in the future. OLEDs represent the future of display technology

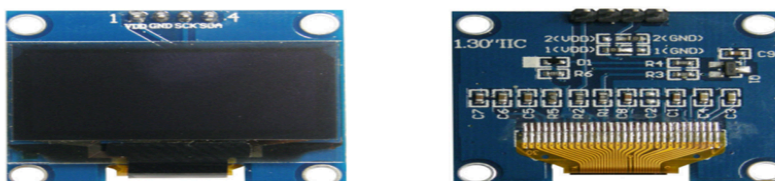


Fig: OLED Module

PM2.5 Sensor Module

PM2.5 Dust Smoke Sensor Module GP2Y1010AU0F is an optical air quality sensor, designed to sense dust particles. It is capable of detecting fine particle larger than $0.8\mu\text{m}$ in diameter, even like the cigarette smoke. An infrared emitting diode and a phototransistor are diagonally arranged into this device, to allow it to detect the reflected light of dust in air. It is especially effective in detecting very fine particles like cigarette smoke, and is commonly used in

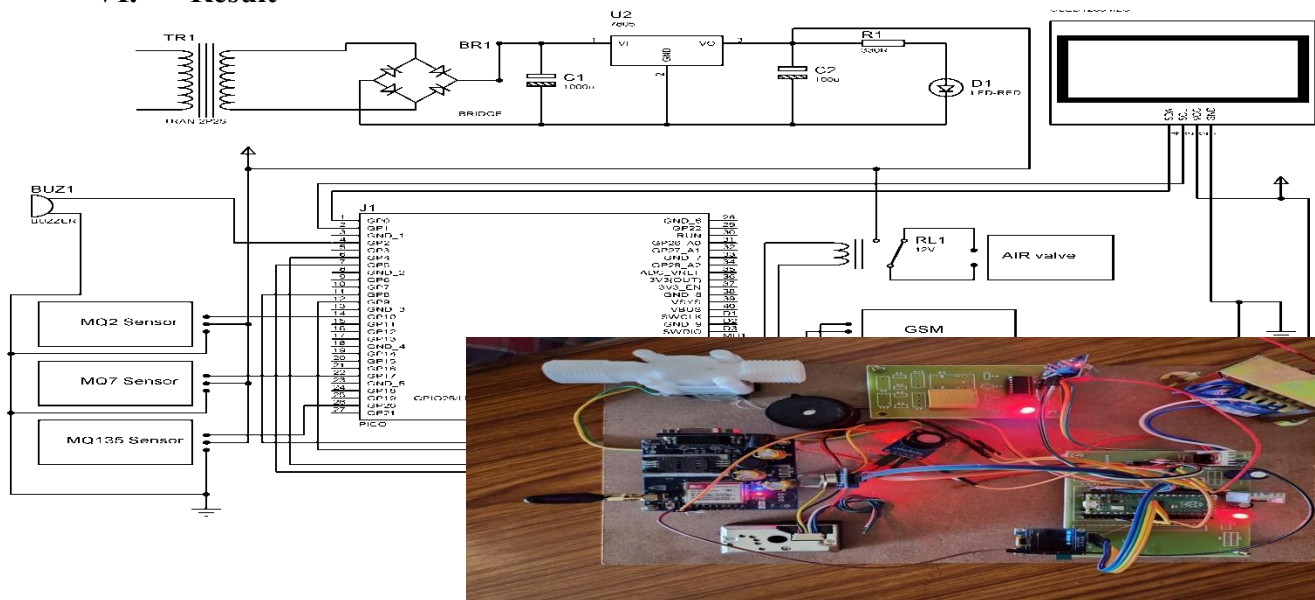
air purifier systems. Analog voltage output of the sensor is linear with dust density. The module has embedded voltage boost circuit to support wide range of power supply.



Fig 4.20: PM2.5 Sensor Module

V. Schematic Diagram

VI. Result



Hardware Kit When in ON condition

The successful development of the Digital Twin system for PM2.5 estimation and action policies resulted in the following:

1. High-Resolution PM2.5 Monitoring:

The system accurately detected PM2.5 and other air pollutants using sensors (MQ2, MQ7, MQ135, and PM2.5 Dust Particle Sensor). Enabled real-time monitoring of air quality with high precision.

2. Sensory Data Fusion:

Integrated multiple sensors for comprehensive data collection on pollutants like CO, NO2, and PM2.5.

Used sensory data fusion to recommend actionable policies based on pollutant levels.

3. Efficient Data Processing:

The Raspberry Pi Pico microcontroller processed sensory inputs in real time to estimate pollution trends.

Software (Embedded C, Micro Python, Arduino IDE) ensured seamless data handling and system control.

4. Stable Connectivity:

The Wi-Fi and GSM modules maintained robust communication with cloud platforms, enabling dynamic updates.

5. Interactive Feedback Mechanism:

The OLED display showcased pollutant levels and system status for immediate feedback.

The buzzer alerted users during critical pollution levels.

6. Adaptive Control Features:

Implemented an air valve motor to regulate airflow based on sensor inputs, improving air quality. Recommended actionable policies dynamically, ensuring effective interventions.

7. Scalability and Expansion Potential:

The system design supports the addition of new sensors and modules to monitor more pollutants or expand functionalities.

8. Energy Efficiency:

Operated with low power consumption, leveraging an efficient power supply design.

9. Policy Decision Support:

Generated high-resolution air pollution maps and analytics to assist policymakers in creating evidence-based action plans.

Alignment of Sustainable Development Goals (SDG's)

SDG 3: Good Health and Well-being

1. Tracks PM2.5 levels to identify pollution hotspots and reduce health risks.

2. Uses data to predict health trends and improve preventive care.
3. Raises public awareness for safer outdoor activities

SDG 11: Sustainable Cities and Communities

1. Helps design eco-friendly urban spaces using air quality data.
2. Provides insights for traffic and industrial emission control.
3. Enhances city readiness for pollution-related emergencies

SDG 13: Climate Action

1. Supports policy-making to cut pollution and carbon emissions.
2. Guides clean energy shifts based on air quality insights.
3. Promotes collaboration for integrated pollution control.

VIII. Future Scope:

1. Advanced Data Integration
2. AI-Powered Analytics
3. Comprehensive Environmental Modeling .
4. Localized Interventions
5. Smart Cities Integration

References

- [1] Who Global Air Quality Guidelines: Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Accessed: Feb. 15, 2022.
- [2] G. Hoek, R. M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Brunekreef, and J. D. Kaufman, "Long-term air pollution exposure and cardio—Respiratory mortality: A review," *Environ. Health*, vol. 12, no. 1, p. 43, Dec. 2013.
- [3] R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope, J. R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux, F. Holguin, Y. Hong, R. V. Luepker, M. A. Mittleman, A. Peters, D. Siscovick, S. C. Smith, L. Whitsel, and J. D. Kaufman, "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease," *Circulation*, vol. 121, no. 21, pp. 2331–2378, 2010.
- [4] Y.-L. Zhang and F. Cao, "Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level," *Sci. Rep.*, vol. 5, no. 1, p. 14884, Oct. 2015.
- [5] Y. Chu, Y. Liu, X. Li, Z. Liu, H. Lu, Y. Lu, Z. Mao, X. Chen, N. Li, M. Ren, F. Liu, L. Tian, Z. Zhu, and H. Xiang, "A review on predicting ground PM_{2.5} concentration using satellite aerosol optical depth," *Atmosphere*, vol. 7, no. 10, p. 129, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/10/129>
- [6] M. Z. Joharestani, C. Cao, X. Ni, B. Bashir, and S. Talebiesfandarani, "PM_{2.5} prediction based on random forest, XG Boost, and deep learning using multisource remote sensing data," *Atmosphere*, vol. 10, no. 7, p. 373, Jul. 2019.
- [7] J. Ma, Z. Yu, Y. Qu, J. Xu, and Y. Cao, "Application of the XG Boost machine learning method in PM_{2.5} prediction: A case study of Shanghai," *Aerosol Air Quality Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 128–138, 2020.

- [8] A. Masood and K. Ahmad, "A model for particulate matter (PM_{2.5}) prediction for Delhi based on machine learning approaches," *Proc. Comput. Sci.*, vol. 167, pp. 2101–2110, Jan. 2020.
- [9] M. D. Yazdi, Z. Kuang, K. Dimakopoulou, B. Barratt, E. Suel, H. Amini, A. Lyapustin, K. Katsouyanni, and J. Schwartz, "Predicting fine particulate matter (PM_{2.5}) in the greater London area: An ensemble approach using machine learning methods," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 6, p. 914, 2020.
- [10] T. Li, M. Hua, and X. Wu, "A hybrid CNN-LSTM model for forecasting particulate matter (PM_{2.5})," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26933–26940, 2020.