



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Paulius Mušauskas

NUOTOLINIŲ TYRIMŲ TAIKYMAS MIŠKŲ KITIMUI STEBĖTI
APPLICATION OF REMOTE SENSING TO FOREST CHANGE
MONITORING

Baigiamasis magistro darbas

Geografinės Informacinės sistemos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Paulius Mušauskas

NUOTOLINIŲ TYRIMŲ TAIKYMAS MIŠKŲ KITIMUI STEBĖTI

**APPLICATION OF REMOTE SENSING TO FOREST CHANGE
MONITORING**

Baigiamasis magistro darbas

Geografinių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX036

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Vadovė

Prof. dr. Jūratė Sužiedelytė Visockienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantė

Dr. Vitalija Karaciejūtė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vilnius, 2025

Matavimų inžinerijos studijų kryptis

Geografinės informacinės sistemos studijų programa,
valstybinis kodas 6211EX036

Geografinės informacinės sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėja

(Parašas)

Jūratė Sužiedelytė Visockienė

(Vardas, pavardė)

2025-

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Pauliui Mušauskui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Nuotolinių tyrimų taikymas miškų kitimui stebėti

patvirtinta 2025 m. d. dekanų potvarkiu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2025 m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Duomenys: Palydoviniai duomenys: *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*. Paviršiaus reljefo duomenys: *LIDAR*

Aiškinamasis aprašas:

Darbo tikslas – ištirti nuotolinių tyrimų metodų taikymo galimybes Švenčionių rajono miškų pavyzdžiu. Įvertinti metodų efektyvumą, tikslumą ir tinkamumą skirtingiems miško tipams, taikant augmenijos vegetacijos būklės ir pokyčių spektrinius indeksus.

Uždaviniai: išanalizuoti naujausią mokslinę literatūrą apie nuotolinių tyrimų metodų taikymą miškų kaitos stebėsenai; įvertinti *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* palydovinių duomenų taikymo privalumus miškų būklės analizėje; atlikti Švenčionių rajono miškų pokyčių analizę, taikant minėtus palydovinius duomenis bei apskaičiuojant indeksus; palyginti skirtingų palydovinių duomenų taikymo galimybes pagal tikslumą, raišką ir gebėjimą fiksuoti miškų pokyčius.

Darbo naujumas – miškų kaitos stebėsenai pasiūlyta kompleksiška trijų skirtingų specifikacijų palydovinių duomenų metodologija.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Prof. Eimuntas Paršeliūnas

Doc. dr. Rūta Puzienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovė prof. dr. Jūratė Sužiedelytė Visockienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Paraša)

Užduotį gavau

.....

(Parašas)

Paulius Mušauskas

(Vardas, pavardė)

.....

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Geodezijos ir kadastro katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Antrosios pakopos studijų Geodezijos ir kartografijos programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Nuotolinių tyrimų taikymas miškų kitimui stebėti**
Autorius **Paulius Mušauskas**
Vadovė doc. dr. **Jūratė Sužiedytė Visockienė**

Thesis language

☒ X

Lithuanian



Foreign (English)

Anotacija

Magistro darbe analizuojamas nuotolinių tyrimų taikymas miškų pokyčių stebėsenai, naudojant palydovinius duomenis *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*. Tyrimo objektu pasirinktas Švenčionių rajonas – viena miškingiausių Lietuvos teritorijų, pasižyminti dideliu ekologiniu jautrumu ir įvairiapusiu antropogeniniu bei gamtiniu poveikiu. Tyrimo tikslas – įvertinti miškų dangos būklę ir palyginti skirtingų palydovinių duomenų gebėjimą identifikuoti galimus degradacijos ar regeneracijos procesus, taikant spektrinius vegetacijos indeksus ir geoinformacinius metodus.

Analizė atlikta remiantis 2024 m. gegužės mėnesio duomenimis, naudojant pagrindinius vegetacijos indeksus – normalizuotą diferencialinį vegetacijos indeksą (*NDVI*), patobulintą vegetacijos indeksą (*EVI*), normalizuotą degimo indeksą (*NBR*) ir normalizuotą vegetacijos indeksą (*NVI*). Palydovinių vaizdų duomenys buvo apdoroti QGIS aplinkoje.

Tyrimo rezultatai parodė, kad nuotoliniai tyrimai, integruoti su *GIS* sprendimais, leidžia efektyviai identifikuoti miškų struktūros pokyčius ir vertinti jų būklę regioniniu mastu. Tyrimas patvirtino, kad *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* duomenys yra tinkami miškų pokyčių analizei, tačiau jų taikymo efektyvumas priklauso nuo erdvinės raiškos, spektrinių savybių ir stebėsenos laikotarpio.

Darbą sudaro šešios dalys: įvadas, ankstesni tyrimai ir jų rezultatai, literatūros apžvalga, nuotolinių tyrimų taikymas miškų kitimui stebėti, nuotolinių tyrimų pritaikymas švenčionių rajono miškų pokyčių analizei, tyrimas, vegetacijos būklės klasifikavimo rezultatų palyginimas pagal *NDVI*, *NVI*, *NBR* ir *EVI* indeksus (*Sentinel-2* duomenys), tyrimo apibendrinimas, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 71 p. teksto be priedų, 18 iliustr., 16 lent., 55 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: nuotoliniai tyrimai, palydoviniai duomenys, vegetacijos indeksai, *NDVI*, *NVI*, *EVI*, *NBR*, miškų pokyčiai, miškų degradacija, miškų regeneracija, miškų stebėseną, *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*, *GIS* analizė, geoinformaciniai metodai, Švenčionių rajonas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Master Degree Studies Geographic Information Systems study programme Master Graduation Thesis

Title: **Application of remote sensing to forest change monitoring**

Author **Paulius Mušauskas**

Academic supervisor **Jūratė Sužiedelytė Visockienė**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The master's thesis analyzes the application of remote sensing methods for forest change monitoring using satellite data from *Sentinel – 2*, *Landsat*, and *MODIS*. The study area selected is the Švenčionys District – one of the most forested regions in Lithuania, characterized by high ecological sensitivity and diverse anthropogenic and natural impacts. The main objective of the study is to assess forest cover conditions and compare the capabilities of different satellite data sources in identifying potential degradation or regeneration processes, applying spectral vegetation indices and geoinformation methods.

The analysis was carried out using satellite data from May 2024, employing key vegetation indices – the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*), the Enhanced Vegetation Index (*EVI*), the Normalized Burn Ratio (*NBR*), and the Normalized Vegetation Index (*NVI*). All satellite imagery data were processed within the *QGIS* environment.

The results of the study demonstrated that remote sensing methods, integrated with *GIS*-based approaches, allow for the effective identification of forest structure changes and condition assessment at a regional scale. The research confirmed that *Sentinel 1– 2*, *Landsat*, and *MODIS* data are suitable for forest change monitoring, but their effectiveness depends on spatial resolution, spectral characteristics, and the temporal resolution of observations.

The thesis consists of six main parts: introduction, review of previous research and results, literature review, application of remote sensing for forest change monitoring, practical implementation of remote sensing methods for forest change detection in Švenčionys District, vegetation condition classification comparison based on *NDVI*, *NVI*, *NBR*, and *EVI* indices (*Sentinel-2* data), research summary, conclusions, and references.

Thesis consist of: 71 p. text without appendixes, 18 pictures, 16 tables, 55 bibliographical entries.

Keywords: remote sensing, satellite data, vegetation indices, *NDVI*, *NVI*, *EVI*, *NBR*, forest changes, forest degradation, forest regeneration, forest monitoring, *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*, *GIS* analysis, geoinformation methods, Švenčionys District.

TURINYS

IVADAS.....	10
1. ANKSTESNI TYRIMAI IR JŲ REZULTATAI: LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. MIŠKŲ POKYČIŲ LIGYNAMOJI ANALIZĖ	14
2. NUOTOLINIŲ TYRIMŲ TAIKYMAS MIŠKŲ KITIMUI STEBĖTI	16
2.1. PALYDOVINĖS SISTEMOS	16
2.2. RADARINIAI PALYDOVYNIAI TYRIMAI (SAR).....	18
2.3. <i>LIDAR</i> (ŠVIESOS RADARO) TECHNOLOGIJA	19
2.4. DRONŲ (<i>UAV</i>) TECHNOLOGIJOS.....	21
2.5. MIŠKŲ STEBĖJIMO METODAI.....	23
2.6. DIRBTINIS INTELEKTAS IR MAŠININIS MOKYMASIS NUOTOLINIUOSE TYRIMUOSE	26
2.6.1. Dirbtinio intelekto metodų taikymas miškų stebėsenai	26
2.6.2. Objektų atpažinimo ir klasifikavimo modeliai.....	27
2.6.3. Algoritmų palyginimas	27
2.6.4. Integracija su <i>GIS</i> ir debesų platformomis.....	28
3. NUOTOLINIŲ TYRIMŲ PRITAIKYMAS ŠVENČIONIŲ RAJONO MIŠKŲ POKYČIŲ ANALIZEI	29
3.1 TYRIMO OBJEKTAS IR VIETA.....	29
3.1.1. Tyrimo vieta.....	29
3.1.2. Tyrimo objektas, ribos ir pagrindimas	30
3.2. DUOMENŲ RINKIMAS IR ANALIZĖ	31
3.2.1. Palydoviniai vaizdai	31
3.2.2. Vegetacijos indeksų analizė	32
3.2.3. Tyrimo eiga	33
4. TYRIMAS.....	35
4.1. <i>NDVI</i> RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ	35
4.1.1. Apibendrinimas.....	40
4.1.2. Išvada	41
4.2. <i>NVI</i> RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ	41
4.2.1. Apibendrinimas.....	46
4.2.2. Išvada	47
4.3. <i>NRB</i> RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ.....	47
4.3.1. Apibendrinimas.....	52
4.3.2. Išvada	53
4.4. <i>EVI</i> RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ	53
4.4.1. Apibendrinimas.....	56

4.4.2.	Išvada	57
5.	Vegetacijos būklės klasifikavimo rezultatų palyginimas pagal <i>NDVI</i> , <i>NVI</i> , <i>NRB</i> ir <i>EVI</i> indeksus (<i>Sentinel-2</i> duomenys).....	58
5.1.1.	Apibendrinimas.....	61
5.1.2.	Išvada	61
6.	TYRIMO APIBENDRINIMAS.....	63
	IŠVADOS	64
	REKOMENDACIJOS	65
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	67

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1. lentelė.	Pasaulio, Europos ir Lietuvos miškų pokyčių lyginamoji analizė. Šaltiniai: FAO, 2020; Forest Europe, 2020; Valstybinė miškų tarnyba, 2020.	15
2.1. lentelė.	<i>Sentinel-1</i> ir <i>ALOS PALSAR</i> palydovinių duomenų charakteristikos. Šaltiniai: European Space Agency (ESA), 2023; Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2023.	19
2.2. lentelė.	Oro ir palydovinio <i>LIDAR</i> duomenų charakteristikos. Šaltiniai: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2023; Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2023.	20
2.3. lentelė.	Optinių, multispektrinių, hiperspektrinių ir <i>LIDAR</i> jutiklių charakteristikos miškų stebėjimui. Šaltiniai: Wulder et al., 2023; Liu et al., 2023; National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2022.....	22
2.4. lentelė.	Vegetacijos indeksų charakteristikos ir taikymas miškų stebėjimui. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Wang et al., 2023; European Space Agency (ESA), 2024.....	25
2.5. lentelė.	<i>VIIRS</i> ir <i>MODIS</i> palydovinių duomenų charakteristikos gaisrų stebėjimui. Šaltinis: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2023.	25
2.6. lentelė.	Dirbtinio intelekto metodai miškų stebėjimui. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Sabat-Tomala et al., 2020.....	27
2.7. lentelė.	Algoritmų palyginimas miškų stebėsenos uždaviniuose. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Sabat-Tomala et al., 2020.....	28
4.1. lentelė.	Skirtingų palydovų (<i>Sentinel</i> , <i>Landsat</i> , <i>MODIS</i>) taikymo tinkamumo įvertinimas miškų kaitos <i>NVDI</i> analizėje	41
4.2. lentelė.	Skirtingų palydovų (<i>Sentinel-2</i> , <i>Landsat</i> , <i>MODIS</i>) taikymo tinkamumo įvertinimas <i>NVI</i> analizėje	47
4.3. lentelė.	Skirtingų palydovų (<i>Sentinel-2</i> , <i>Landsat</i> , <i>MODIS</i>) taikymo tinkamumo įvertinimas <i>NRB</i> analizėje	53
4.4. lentelė.	Skirtingų palydovų (<i>Sentinel-2</i> , <i>Landsat</i> , <i>MODIS</i>) taikymo tinkamumo įvertinimas <i>EVI</i> analizėje.	57
5.1. lentelė.	Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal <i>NDVI</i> indeksą.	58
5.2. lentelė.	Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal <i>NVI</i> indeksą.	59
5.3. lentelė.	Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal <i>NRB</i> indeksą.	59
5.4. lentelė.	Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal <i>EVI</i> indeksą.....	59

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1. pav. Įprastos nuotolinio stebėjimo platformos (šaltinis: Lechner et al., 2020)	12
1.2. pav. Pastovūs bareliai miško inventorizacijai (šaltinis: Kuliešis & Kasperavičius, 2022).....	13
1.3. pav. Medžių išsidėstymo pastoviam barelyje planas (šaltinis: Nacionalinė miškų tarnyba, 2022)	14
3.1. pav. Švenčionių rajono žemėlapis (šaltinis: sudaryta autoriaus remiantis regioninės geoinformacinės aplinkos duomenimis, www.regia.lt).	30
4.1. pav. NDVI reikšmės pagal <i>Sentinel-2</i> duomenis Švenčionių rajone.....	35
4.2. pav. NDVI reikšmės pagal <i>Landsat</i> duomenis Švenčionių rajone.....	37
4.3. pav. NDVI reikšmės pagal <i>MODIS</i> duomenis Švenčionių rajone.	39
4.4. pav. NVI reikšmės pagal <i>Sentinel-2</i> duomenis Švenčionių rajone.	42
4.5. pav. NVI reikšmės pagal <i>Landsat</i> duomenis Švenčionių rajone.....	43
4.6. pav. NVI reikšmės pagal <i>MODIS</i> duomenis Švenčionių rajone.	45
4.7. pav. NRB reikšmės pagal <i>Sentinel-2</i> duomenis Švenčionių rajone.....	48
4.8. pav. NRB reikšmės pagal <i>Landsat</i> duomenis Švenčionių rajone.....	49
4.9. pav. NRB reikšmės pagal <i>MODIS</i> duomenis Švenčionių rajone.	51
4.10. pav. EVI reikšmės pagal <i>Sentinel-2</i> duomenis Švenčionių rajone.....	54
4.11. pav. EVI reikšmės pagal <i>Landsat</i> duomenis Švenčionių rajone.....	55
4.12. pav. EVI reikšmės pagal <i>MODIS</i> duomenis Švenčionių rajone.	56
5.1. pav. Vegetacijos būklės pasiskirstymas pagal procentinę dalį Švenčionių rajone.....	60
5.2. pav. Vegetacijos būklės pasiskirstymas pagal plotą Švenčionių rajone.....	61

IVADAS

Temos reikšmingumas

Miškų ekosistemos yra vienos svarbiausių Žemės aplinkos komponentų, atliekančios esminį vaidmenį reguliuojant klimatą, palaikant biologinę įvairovę ir kaupiant anglies dioksidą. Miškai sugeria didelius kiekius CO₂, padeda stabilizuoti atmosferos sudėtį ir prisideda prie klimato kaitos švelninimo. Jie taip pat palaiko dirvožemio stabilumą, reguliuoja vandens ciklą bei užtikrina buveines tūkstančiams augalų ir gyvūnų rūšių, tuo pačiu teikdami žmogui svarbias ekosistemines funkcijas (FAO, 2022). Tačiau pastaraisiais dešimtmečiais miškų būklę vis labiau veikia antropogeniniai ir klimato veiksniai – intensyvūs kirtimai, žemės ūkio plėtra, urbanizacija, miškų gaisrai, sausras, audros bei kenkėjų protrūkiai. Šie procesai lemia miškų nykimą, fragmentaciją ir mažėjantį atsparumą aplinkos pokyčiams (Li et al., 2023; Zhao et al., 2022).

Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, kyla poreikis nuolat ir tiksliai stebėti miškų būklę bei pokyčius. Šioje srityje itin svarbus vaidmuo tenka nuotoliniams tyrimams (angl. *Remote Sensing*), kurie leidžia sistemingai, plačiu mastu ir ekonomiškai fiksuoti miškų kaitos procesus. Palydoviniai, aeronuotraumų ir bepiločių orlaivių (UAV, angl. *Unmanned Aerial Vehicles*) duomenys suteikia galimybę nustatyti augmenijos būklę, stebėti gaisrų poveikį, aptikti ligų židinius ar nelegalius kirtimus net ir sunkiai prieinamose teritorijose (Wulder et al., 2019; Zald et al., 2020). Šiuolaikinės technologijos, įskaitant dirbtinį intelektą bei giluminio mokymosi algoritmus, leidžia automatizuoti duomenų analizę, padidinti tikslumą ir taikyti pokyčių stebėseną realiu ar beveik realiu laiku (Lang et al., 2023).

Palydovinės platformos *Sentinel-2*, *Landsat* ir vidutinės skiriamosios gebos vaizdavimo spektrometras (*MODIS*, angl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) pasižymi skirtingomis spektrinėmis ir erdvinėmis charakteristikomis, todėl jų sinerginis taikymas leidžia ne tik fiksuoti miško pokyčius skirtingais masteliais, bet ir atlikti retrospektyvias bei sezonines analizes. *Sentinel-2* duomenys tinka detaliai augalijos struktūros ir būklės analizei, *Landsat* – ilgalaikiai retrospektyvai, o *MODIS* – dinamiškiems pokyčiams stebėti didelio masto plotuose. Tokios analizės yra ypač aktualios rengiant nacionalinius ir regioninius miškų valdymo planus bei reaguojant į ekstremalius reiškinius klimato kaitos kontekste (Brodrick et al., 2023; Immitzer et al., 2019).

Trumpas aprašas

Darbas grindžiamas nuotolinių tyrimų metodais, taikomais Švenčionių rajono miškų pokyčių stebėsenai. Tyrimui naudoti trijų palydovinių platformų – *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* – duomenys, pasižymintys skirtinga erdvine ir laiko raiška, kas leido sujungti aukštos detalės analizę su ilgalaikiu pokyčių stebėjimu. Apskaičiuoti vegetacijos indeksai – normalizuotas diferencialinis vegetacijos indeksas (*NDVI*, angl. *Normalized Difference Vegetation Index*), normalizuotas vegetacijos indeksas

(*NVI*, angl. *Normalized Vegetation Index*), normalizuotas degimo rodiklis (*NRB*, angl. *Normalized Burn Ratio*) ir patobulintas vegetacijos indeksas (*EVI*, angl. *Enhanced Vegetation Index*) – buvo taikomi augmenijos būklės ir pokyčių nustatymui. Analizė atlikta pasitelkiant *GIS* programas, lyginant palydovinių duomenų efektyvumą ir pritaikomumą miškingų teritorijų stebėsenai. Darbo išskirtinumas – integruotas metodinis požiūris, sujungiantis kelių duomenų šaltinių analizę toje pačioje geografinėje vietovėje.

Darbo tikslas

Ištirti nuotolinių tyrimų metodų taikymo galimybes Švenčionių rajono miškų pavyzdžiu. Įvertinti metodų efektyvumą, tikslumą ir tinkamumą skirtingiems miško tipams, taikant augmenijos vegetacijos būklės ir pokyčių spektrinius indeksus.

Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti naujausią mokslinę literatūrą apie nuotolinių tyrimų metodų taikymą miškų kaitos stebėsenai.
2. Įvertinti *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* palydovų duomenų taikymo privalumus miškų būklės analizėje.
3. Atlikti Švenčionių rajono miškų analizę, taikant minėtus palydovinius duomenis bei apskaičiuojant *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI* indeksus.
4. Palyginti skirtingų palydovų duomenis pagal tikslumą, raišką ir gebėjimą fiksuoti miško pokyčius.

Darbo naujumas

Šis darbas išsiskiria tuo, kad vienoje geografinėje teritorijoje kompleksiškai taikomi trys skirtingų specifikacijų palydoviniai duomenys *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS*, kurių analizė atliekama naudojant tuos pačius spektrinius vegetacijos indeksus. Toks integruotas požiūris leidžia įvertinti duomenų efektyvumą miškų kaitos stebėsenai skirtingais masteliais. Gauti rezultatai gali būti reikšmingi tiek mokslinių tyrimų tikslais, tiek formuojant praktines rekomendacijas tvariam miškų valdymui.

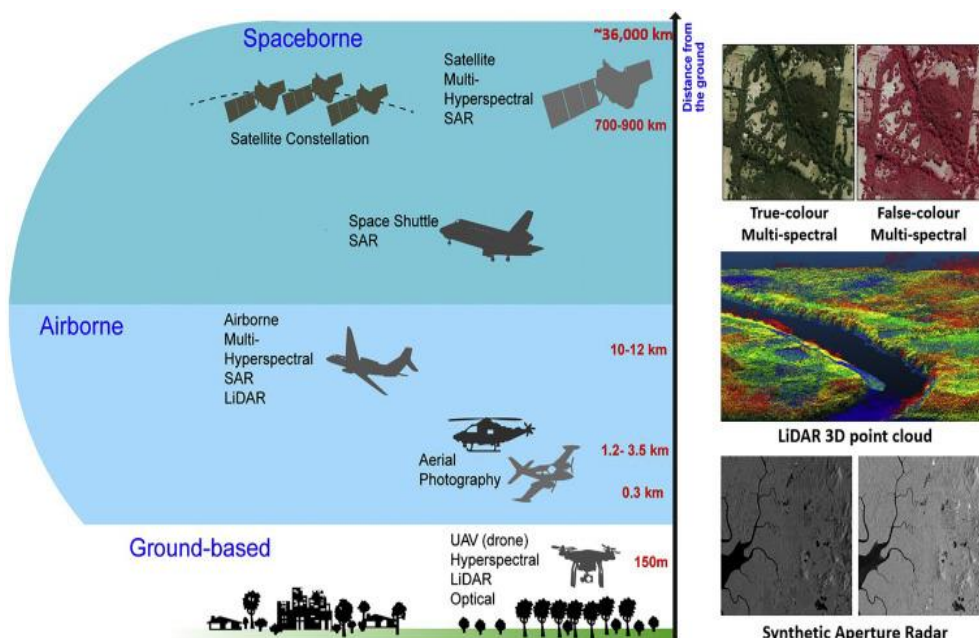
Darbo apimtis

Darbą sudaro 6 skyriai, 71 puslapis, 18 iliustracijų ir 55 literatūros šaltiniai.

1 ANKSTESNI TYRIMAI IR JŲ REZULTATAI: LITERATŪROS APŽVALGA

Miškų pokyčių stebėseną yra aktuali tiek globaliuoju, tiek regioniniu mastu, nes miškai atlieka reikšmingą vaidmenį reguliuojant anglies apytaką, palaikant biologinę įvairovę ir stabilizuojant klimatą. Naujausi tyrimai rodo, kad nors kai kuriose pasaulio vietovėse miškų plotai didėja, daugelyje regionų stebimas ne tik jų nykimas, bet ir ekologinės būklės prastėjimas dėl antropogeninės veiklos poveikio bei klimato kaitos (Potapov et al., 2022; Li et al., 2023). Intensyvūs kirtimai, urbanizacija, žemės ūkio plėtra bei ekstremalūs klimato reiškiniai lemia miškų fragmentaciją, biologinės įvairovės nykimą ir mažėjantį miškų gebėjimą absorbuoti atmosferos anglį (Zhao et al., 2022; IPCC, 2023).

Siekdami veiksmingai įvertinti šiuos pokyčius, tyrėjai vis plačiau taiko pažangius nuotolinių tyrimų metodus, leidžiančius stebėti didelius plotus tiek globaliu, tiek vietiniu mastu. Palydoviniai multispektriniai ir hiperspektriniai jutikliai, sintetinės apertūros radaras (SAR, angl. *Synthetic Aperture Radar*), šviesos aptikimo ir nuotolio nustatymo technologija (LIDAR, angl.) bei UAV taikymas sudaro galimybes tiksliai identifikuoti miško dangos pokyčius, įvertinti vegetacijos būklę ir aptikti degradacijos procesus (Cheng et al., 2023; Zhang et al., 2023). Šie metodai ypač naudingi sunkiai pasiekiamose vietovėse, kur tradicinės stebėsenos priemonės yra ribotos (žr. 1.1 pav.). Toliau pateikiamos pagrindinės nuotolinio stebėjimo platformos, plačiai naudojamos miškų tyrimuose.

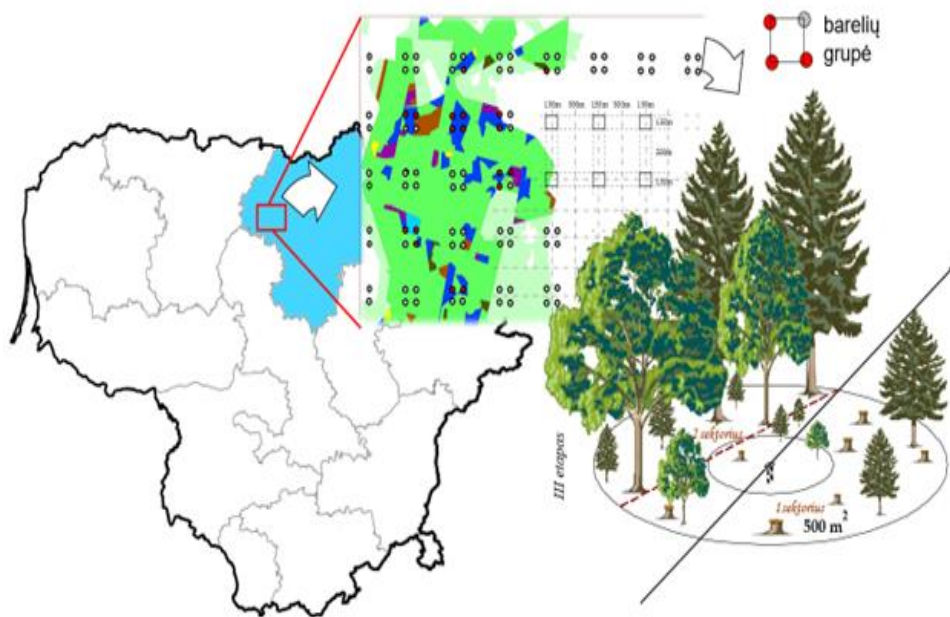


1.1 pav. Įprastos nuotolinio stebėjimo platformos (šaltinis: Lechner et al., 2020)

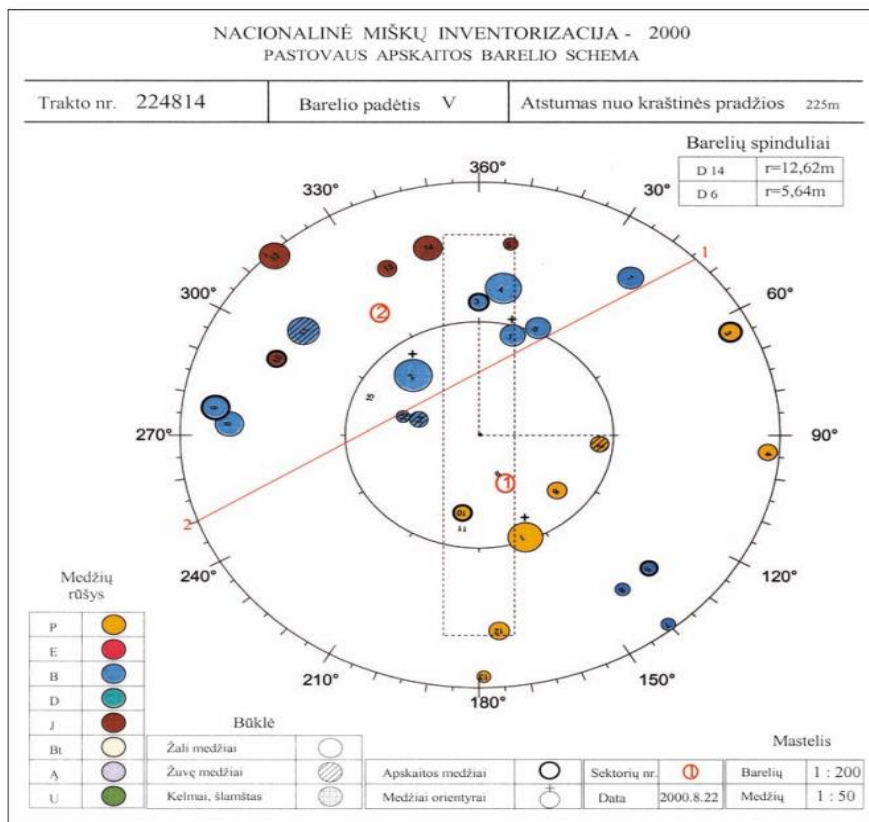
Skirtingi nuotolinių tyrimų metodai pasižymi savitais privalumais. Palydoviniai duomenys, tokie kaip *Sentinel-2*, *Landsat* ar *MODIS*, leidžia vykdyti ilgalaikę retrospektyvinę analizę, identifikuoti antropogeninius veiksnius bei klimato kaitos poveikį (Brodrick et al., 2023; Wang et al., 2021). *LIDAR* technologija suteikia galimybę atkurti trimačius miško struktūros modelius, įvertinti

medžių aukštį, biomasės kiekį bei tankumą (Liu et al., 2022). Dronų taikymas su optiniais, multispektriniais ar hiperspektriniais jutikliais užtikrina didelio tikslumo duomenų rinkimą mažo masto plotuose, leidžiant greitai reaguoti į pokyčius (Lang et al., 2023). Šių technologijų integracija laikoma viena efektyviausių miškingų teritorijų stebėsenos strategijų, tačiau išlieka iššūkių, susijusių su skirtingų duomenų šaltinių suderinamumu, analizės metodikų standartizavimu bei rezultatų interpretavimo patikimumu (Cheng et al., 2023).

Lietuvoje miškai dengia apie 33 % šalies teritorijos ir pasižymi didele ekologine bei biologine įvairove. Vis dėlto ir čia vis dažniau pasitaiko stichinių reiškinių, tokių kaip sausros, kenkėjų protrūkiai ar intensyvūs kirtimai, įskaitant nelegalius. Dėl to vis svarbesnis tampa operatyvus stebėjimas, kurį tradicinės inventorizacijos metodikos (pvz., pastovieji stebėsenos bareliai) ne visada pajėgia užtikrinti (Valstybinė miškų tarnyba, 2023; Kasperavičius et al., 2022). Nacionalinė miškų inventorizacija vykdoma nuolat, remiantis pastovių stebėsenos taškų tinklu, kuriame fiksuojami duomenys apie medžių rūšinę sudėtį, skersmenį, aukštį, būklę ir kitus parametrus (žr.1.2 ir 1.3 pav.).



1.2 pav. Pastovūs bareliai miško inventorizacijai (šaltinis: Kuliešis & Kasperavičius, 2022)



1.3 pav. Medžių išsidėstymo pastoviam barelyje planas (šaltinis: Nacionalinė miškų tarnyba, 2022)

Apibendrinant galima teigti, kad nuotolinių tyrimų technologijų taikymas miškų būklės stebėsenai tampa vis reikšmingesnis, o jų integracija su tradiciniais metodais leidžia sukurti tikslesnę, dinamiškesnę ir mokslu grįstą stebėsenos sistemą.

1.1 MIŠKŲ POKYČIŲ LIGYNAMOJI ANALIZĖ

Miškų pokyčių tendencijos globaliu, Europos ir Lietuvos mastu skiriasi dėl klimato, ekologinių ir socialinių sąlygų įvairovės. Pasauliniu mastu per pastaruosius tris dešimtmečius miškų plotas sumažėjo apie 178 mln. hektarų, daugiausia dėl tropinių miškų naikinimo, žemės ūkio plėtos, gaisrų ir nelegalių kirtimų (FAO, 2023). Europoje, priešingai, nuo 1990 m. miškų plotas padidėjo apie 9 %, daugiausia dėl ES miškų atkūrimo programų ir tvaraus valdymo politikos. Tačiau kyla nauji iššūkiai, susiję su biologinės įvairovės nykimu, klimato kaita ir socialiniu spaudimu dėl žaliavų poreikio (Forest Europe, 2023).

Lietuvoje nuo 1990 m. miškų plotas padidėjo nuo 30,9 % iki 33,7 % visos šalies teritorijos (Valstybinė miškų tarnyba, 2023). Nepaisant to, šalies miškai išlieka pažeidžiami dėl didėjančių klimato ekstremumų, invazinių kenkėjų ir didelio miškų eksploatavimo intensyvumo. Dėl šių veiksnių reikalinga nuosekli, tiksliais duomenimis pagrįsta stebėseną.

Lentelėje žemiau pateikiama glausta pasaulio, Europos ir Lietuvos miškų pokyčių palyginamoji analizė, apžvelgiant jų dinamiką, pagrindinius iššūkius ir naudojamus tyrimų metodus (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Pasaulio, Europos ir Lietuvos miškų pokyčių lyginamoji analizė. Šaltiniai: FAO, 2020; Forest Europe, 2020; Valstybinė miškų tarnyba, 2020.

Regionas	Miškų plotas (pokytis)	Pagrindiniai iššūkiai	Pagrindiniai tyrimų metodai
Pasaulis	Mažėjantis (~ 178 mln. ha nuo 1990 m.)	Nykimas dėl žemės ūkio plėtros, gaisrai, nelegalūs kirtimai	<i>MODIS, Landsat, Sentinel–2</i>
Europa	Didėjantis (~ 9 % nuo 1990 m.)	Biologinės įvairovės mažėjimas, klimato kaita, intensyvūs kirtimai	<i>Sentinel–2, GEDI, LIDAR</i>
Lietuva	Didėjantis (nuo 30,9 % iki 33,7 %)	Sausros, kenkėjai, intensyvūs kirtimai	<i>NDVI, NBR, Sentinel–2, Landsat</i>

Lentelėje 1.1 pateikti duomenys atspindi miškų plotų pokyčių tendencijas skirtinguose mastuose – pasauliniu, Europos ir Lietuvos lygmenimis. Pasauliniu mastu miškų plotai mažėja dėl žemės ūkio plėtros, gaisrų ir nelegalių kirtimų, o pagrindiniai stebėsenos metodai apima *MODIS*, *Landsat* ir *Sentinel–2* palydovus. Europoje ir Lietuvoje, priešingai, miškų plotai didėja, tačiau šiuose regionuose iššūkių kelia biologinės įvairovės mažėjimas, klimato kaita, sausros ir intensyvūs kirtimai, kurių stebėsenai taikomi *Sentinel-2*, globalios ekosistemų dinamikos tyrimas (*GEDI*, angl. *Global Ecosystem Dynamics Investigation*), *LIDAR* bei *NDVI* ir *NBR* spektriniai indeksai.

Lietuvos miškų dinamika atspindi bendrą Europos tendenciją, tačiau dėl vietinių iššūkių reikalingas didesnis stebėjimų tikslumas, pagrįstas aukštos raiškos duomenimis ir kompleksiniu nuotolinių tyrimų metodų taikymu. Atsižvelgiant į tai, tolesniame darbe detalai nagrinėjami *MODIS*, *Landsat* ir *Sentinel–2* duomenys, jų integracija bei praktinis taikymas Švenčionių rajono miškų kaitos stebėsenai.

2 NUOTOLINIŲ TYRIMŲ TAIKYMAS MIŠKŲ KITIMUI STEBĖTI

Nuotoliniai tyrimai yra viena pažangiausių šiuolaikinių technologijų krypčių, leidžiančių stebėti miškų pokyčius nevykstant į vietą – duomenys gaunami nuotoliniu būdu iš palydovų, orlaivių ar bepiločių jutiklių platformų. Šie metodai leidžia per trumpą laiką apdoroti ir analizuoti informaciją iš didelių teritorijų, užtikrinant nuoseklų stebėjimą ilguoju laikotarpiu. Miškų kaitos stebėsenos kontekste nuotoliniai tyrimai tampa nepakeičiamu įrankiu, padedančiu įvertinti tiek staigius, tiek ilgalaikius procesus, įskaitant augmenijos nykimą, degradaciją, regeneraciją, gaisrų padarinius, ligų plitimą ar neteisėtus kirtimus (Li et al., 2021).

Vienas iš pagrindinių nuotolinių tyrimų privalumų – galimybė sistemingai rinkti duomenis nepriklausomai nuo geografinės vietos, ypač aktualu sunkiai pasiekiamoms ar saugomoms teritorijoms. Technologiškai šie tyrimai remiasi elektromagnetinės spinduliuotės atspindžio arba sklaidos matavimu nuo Žemės paviršiaus, kuris fiksuojamas iš įvairių platformų. Tokie duomenys naudojami spektriniams indeksams skaičiuoti, leidžiantiems įvertinti miškų būklę, produktyvumą bei pokyčių pobūdį.

2.1 PALYDOVINĖS SISTEMOS

Palydoviniai duomenys yra vienas iš pagrindinių informacijos šaltinių nuotolinėje miškų stebėsenoje, leidžiančių tiksliai ir periodiškai stebėti miškų pokyčius tiek globaliu, tiek regioniniu bei lokaliu mastu. Šie duomenys suteikia galimybę įvertinti miškų sveikatos būklę, biomasės pasiskirstymą, kirtimų poveikį, gaisrų padarinius bei kitus antropogeninius ir gamtinius veiksnius (Pham et al., 2023; Huang et al., 2022).

Optiniai palydoviniai duomenys yra pagrįsti Saulės spinduliuotės atspindžio nuo Žemės paviršiaus matavimu įvairiose elektromagnetinio spektro juostose. Dėl savo jautrumo matavimų, artimųjų ir trumpųjų bangų infraraudonųjų sričių spinduliuotei, šie duomenys yra itin naudingi augmenijos tyrimams, ypač miško dangos klasifikacijai, vegetacijos indeksų skaičiavimui ir pokyčių aptikimui.

Sentinel-2 misija, kurią vykdo Europos kosmoso agentūra (ESA, angl. *European Space Agency*), pradėta 2015 metais ir teikia aukštos raiškos multispektrinius duomenis su 10–60 metrų erdvine raiška bei 5 dienų pasikartojimo periodu. Šie duomenys ypač vertingi miškų stebėsenai, nes leidžia stebėti vegetacijos pokyčius, sausros poveikį, gaisrų sukeltus padarinius ir kitas ekologines transformacijas. *Sentinel-2* duomenys taip pat plačiai taikomi žemės dangos klasifikacijoje, automatizuotoje pokyčių detekcijoje bei dirbtinio intelekto modeliuose (Drusch et al., 2023).

Landsat palydovų programa, kurią vykdo nacionalinė aeronautikos ir kosmoso administracija (NASA, angl. *National Aeronautics and Space Administration*) kartu su Jungtinių

Valstijų geologijos tarnyba (USGS, angl. *United States Geological Survey*), yra viena iš seniausių ir ilgiausiai veikiančių nuotolinių tyrimų platformų. Naujausias *Landsat 9* palydovas buvo paleistas 2021 metais, užtikrinant duomenų tęstinumą ir technologinį atnaujinimą. *Landsat* teikia vidutinės skiriamosios gebos duomenis su 16 dienų pasikartojimo ciklu ir 30 metrų erdvine raiška, leidžiančia analizuoti ilgalaikius miškų pokyčius per kelis dešimtmečius (Roy et al., 2022).

MODIS jutikliai, integruoti į *Terra* ir *Aqua* palydovus, teikia žemos ir vidutinės raiškos duomenis su itin dažnu atnaujinimu – kas 1–2 dienas. *MODIS* jutikliai registruoja duomenis 36 spektrinėse juostose, apimančiose nuo matomos iki termiškai infraraudonos spinduliuotės, o jų raiška svyruoja nuo 250 iki 1000 metrų. Nors šių duomenų erdvinė raiška yra mažesnė, jų dažnas pasikartojimas leidžia stebėti globalius sezoninius svyravimus, tokius kaip fenologiniai pokyčiai, didelio masto gaisrai ar klimato poveikis miškų ekosistemoms (Zhang et al., 2023).

Svarbu atkreipti dėmesį, kad nuo 2025 metų NASA ir ESA pradėjo teikti naujus harmonizuotus *Landsat* ir *Sentinel-2* duomenų rinkinius (*HLS*, angl. *Harmonized Landsat Sentinel-2*) produktus, kurie sujungia *Landsat* ir *Sentinel-2* duomenis į vieningą sistemą, leidžiančią taikyti devynis augmenijos indeksus, įskaitant *NDVI*, normalizuota vandens skirtumo indeksą (*NDWI*, angl. *Normalized Difference Water Index*), *NBR* ir augmenijos pokyčių stebėseną. Šie duomenys teikiami 30 metrų erdvine raiška su 2–3 dienų pasikartojimo ciklu, todėl yra ypač tinkami regioniniam ir lokaliai miškų stebėjimui, operatyviam reagavimui į ekstremalius įvykius bei ilgalaikėms ekologinėms analizėms (Claverie et al., 2023).

Išsami *Sentinel*, *Landsat* ir *MODIS* palydovinių duomenų charakteristikų lyginamoji apžvalga pateikiama - 2.1 lentelėje (žr. 2.1 lentelę).

2.1 lentelė. *Landsat*, *MODIS* ir *Sentinel* palydovinių duomenų charakteristikos. Šaltiniai: U.S. Geological Survey (USGS), 2023; NASA, 2023; European Space Agency (ESA), 2023.

Programa	Misija	Palydovas	Jutiklis	Juostų skaičius	Atsinaujinimo laikas (dienos)	Skiriamoji geba (m)	Formatas
Landsat	<i>Landsat – 7 / – 8</i>	<i>Landsat – 7 / Landsat – 8</i>	<i>ET + / TIRS / OLI</i>	8 / 8	16 / 16	30–60 / 15 – 30	<i>GeoTIFF</i>
MODIS	–	<i>Terra / Aqua</i>	<i>MODIS</i>	36 / 36	1 / 1	250	<i>HDF – EOS</i>
Sentinel	<i>Sentinel – 2</i>	<i>Sentinel – 2A / Sentinel – 2B</i>	<i>MSI</i>	12 / 12	10 / 10	10–60	<i>JP2</i>

Optiniai palydoviniai duomenys sudaro pagrindą įvairios augmenijos vegetacijos indeksų skaičiavimui, kurie leidžia objektyviai vertinti augalijos gyvybingumą, fotosintezės intensyvumą, augmenijos reakciją į stresą bei regeneracijos procesus po sutrikimų. Tarp plačiausiai taikomų indeksų miškų tyrimuose išsiskiria *NDVI*, *EVI* ir *NBR*, kurie naudojami tiek moksliniuose, tiek taikomuosiuose aplinkosaugos darbuose (Zhou et al., 2023).

2.2 RADARINIAI PALYDOVYNIAI TYRIMAI (SAR)

Skirtingai nuo optinių jutiklių, radariniai palydovai veikia naudodami aktyviąją nuotolinio stebėjimo technologiją – SAR, kuris siunčia mikrobangų signalus į Žemės paviršių ir registruoja atgal atspindėtą bangą. Didžiausias SAR technologijos privalumas yra jos nepriklausomumas nuo apšvietimo ir atmosferinių sąlygų: palydovai gali fiksuoti duomenis tiek dieną, tiek naktį, net ir esant tankiam debesuotumui, dūmams ar lietui (Torres et al., 2023). Tai leidžia gauti patikimą informaciją ištisus metus ir ypač svarbu miškų stebėjimo kontekste tropiniuose regionuose ar dažnai debesuotose vietovėse.

SAR duomenys suteikia galimybę vertinti ne tik miško dangos pokyčius, bet ir sudėtingesnius parametrus, tokius kaip medynų aukštis, struktūra, biomasė, vertikalusis sluoksniavimas bei dirvožemio drėgmė. Be to, jie leidžia stebėti žmogaus veiklos padarinius, tokius kaip kirtimai ar degradacija, taip pat natūralių reiškinių poveikį – pavyzdžiui, gaisrų, potvynių ar audrų sukeltas transformacijas (Reiche et al., 2021).

Tarp svarbiausių radarinių sistemų išskirtinos dvi dažniausiai miškų stebėsenai taikomos misijos – *Sentinel-1* ir pažangusis žemės stebėjimo palydovas su fazinės sintetinės apertūros radaru (*ALOS PALSAR*, angl. *Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*). *Sentinel-1*, kurį valdo *ESA*, naudoja C-bangos SAR technologiją ir pasižymi 6 – 12 dienų atsinaujinimo ciklu bei 5 – 20 metrų skiriamąja geba. Dėl šių savybių sistema yra itin tinkama miško kirtimų, biomasės pokyčių ir potvynių zonų kartografavimui. *Sentinel-1* taip pat taikomas automatizuotuose pokyčių aptikimo algoritmuose, remiantis laiko eilučių analize (Wegmüller et al., 2023).

Tuo tarpu Japonijos aerokosminių tyrimų agentūra (*JAXA*, angl. *Japan Aerospace Exploration Agency*) vykdomas *ALOS PALSAR* projektas naudoja L – bangos SAR, kuris dėl ilgesnių bangų efektyviau prasiskverbia per tankią augmeniją ir suteikia vertingą informaciją apie miškų vertikalią struktūrą, medžių aukštį, brandą ir dirvožemio savybes. *ALOS PALSAR* ypač tinkamas biomasės vertinimui, o jo duomenys plačiai naudojami tarptautiniuose miškų anglies apskaitos projektuose (Le Toan et al., 2021). Lyginamosios šių sistemų charakteristikos pateikiamos – 2.2 lentelėje (žr. 2.2 lentelę).

2.2 lentelė. *Sentinel – 1* ir *ALOS PALSAR* palydovinių duomenų charakteristikos. Šaltiniai: European Space Agency (ESA), 2023; Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2023.

Programa	Misija	Palydovas	Jutiklis	Juostų skaičius / Poliarizacija	Atsinaujinimo laikas (dienos)	Skiriamoji geba (m)	Formatas
<i>Sentinel</i>	<i>Sentinel–1</i>	<i>Sentinel – 1A / Sentinel – 1B</i>	C – bangos SAR	Vienguba / Dviguba poliarizacija	6 / 12	5–20	<i>GRD / SLC</i>
<i>ALOS PALSAR</i>	<i>ALOS PALSAR</i>	<i>ALOS / ALOS-2</i>	L – bangos SAR	Pilna / Keturių krypčių poliarizacija	1 / 14	10–100	<i>CEOS</i>

Radarinių tyrimų stiprybė slypi jų gebėjime generuoti erdvinius ir struktūriškai išsamius duomenis bet kokiomis oro sąlygomis. Tai itin aktualu miškinguose regionuose, kur tradiciniai optiniai jutikliai dėl debesuotumo ar dūmų patiria apribojimus. SAR duomenys leidžia ne tik nustatyti miško dangos ribas, bet ir įvertinti vertikalią medynų struktūrą – tai ypač svarbu planuojant miškų naudojimą, apskaitant anglies sandaugas ar stebint ekosistemų sveikatą. L – bangos radarai, tokie kaip *PALSAR*, pasižymi padidintu jautrumu medžių aukščiui ir struktūriniam tankiui, todėl dažnai integruojami į biomasės vertinimo modelius, o jų duomenys naudojami tiek moksliniuose tyrimuose, tiek miškų valdymo strategijų rengime (Shimada et al., 2022).

Be to, pastaraisiais metais vis aktyviau taikomas optinių ir radarinių duomenų integravimas, siekiant sukurti daugiasluoksnius, išsamius miškų būklės vertinimo modelius. Derinant *Sentinel–1*, SAR ir *Sentinel–2* optinius duomenis galima gauti tikslesnę informaciją apie vegetacijos tipą, struktūrą ir jos pokyčius laike. Toks metodinis derinys ne tik padidina stebėjimo tikslumą, bet ir užtikrina patikimą informaciją net sudėtingomis stebėjimo sąlygomis, prisidedant prie tvaraus, mokslu pagrįsto miškų valdymo (Carrasco et al., 2023).

2.3 LIDAR (ŠVIESOS RADARO) TECHNOLOGIJA

LIDAR – tai aktyvaus nuotolinio stebėjimo technologija, pagrįsta lazerinių impulsų sklaidimo laiko matavimu, leidžianti itin tiksliai nustatyti atstumą iki objektų, jų aukštį, formą bei erdvinę struktūrą. Veikimo principas grindžiamas lazerio impulso siuntimu link Žemės paviršiaus ir grįžusio signalo registravimu, fiksuojant laiko tarpą tarp išsiuntimo ir atspindžio. Tokiu būdu generuojami aukštos tikslumo trimačiai paviršiaus modeliai, leidžiantys detaliai analizuoti tiek reljefo struktūrą, tiek viršutinės miško dangos sandarą (Dubayah et al., 2022).

LIDAR technologija tampa vis plačiau taikoma miškų tyrimuose dėl gebėjimo tiksliai nustatyti svarbius miško struktūros parametrus: medžių aukštį, lajų tankumą, vainikų skersmenį, pavienių medžių pasiskirstymą bei viršžeminę biomasę. Šie duomenys yra ypač svarbūs vertinant ekologinius rodiklius, rengiant miškotvarkos planus, atliekant biomasės ir anglies sandaravimų modeliavimą, taip pat stebint regeneracijos procesus po natūralių ar antropogeninių sutrikimų (Wulder et al., 2023).

LIDAR duomenys miškų stebėsenai gali būti renkami iš dviejų pagrindinių platformų – oro (aviacinio ar bepiločio) ir palydovinio. Oro *LIDAR* paprastai diegiamas orlaiviuose ar dronuose, todėl užtikrina labai aukštą erdvinę raišką (iki 0,5 m), leidžiančią analizuoti net pavienius medžius, vertinti jų aukštį, formą ir lajos struktūrą. Tokie duomenys plačiai naudojami tikslinei miškų inventorizacijai, tūrinių rodiklių apskaičiavimui, miško paklotės analizėms bei atkūrimo stebėsenos planavimui (White et al., 2021).

Palydovinis *LIDAR* leidžia atlikti plataus masto miškų struktūros analizę globaliu mastu. Viena reikšmingiausių misijų yra *NASA* vykdoma *GEDI* programa, kurios *LIDAR* jutiklis nuo 2019 metų įrengtas tarptautinėje kosminėje stotyje (*ISS*, angl. *International Space Station*). *GEDI* naudoja pilnos bangos formos impulsus, leidžiančius tiksliai užfiksuoti visą vertikalią miško struktūrą – nuo viršūnės iki žemės paviršiaus. Tai suteikia galimybę tiksliai apskaičiuoti miško biomasę, medynų aukštį bei anglies sandaravimą, kas yra ypač svarbu klimato kaitos stebėsenai ir tarptautinėms anglies apskaitos iniciatyvoms (Hancock et al., 2023). Lyginamosios šių dviejų *LIDAR* technologijų charakteristikos pateikiamos – 2.3 lentelėje (žr. 2.3 lentelę).

2.3 lentelė. Oro ir palydovinio *LIDAR* duomenų charakteristikos. Šaltiniai: National Aeronautics and Space Administration (*NASA*), 2023; Japan Aerospace Exploration Agency (*JAXA*), 2023.

Programa	Misija	Platforma	Jutiklis	Juostų skaičius	Atsinaujinimo laikas (dienos)	Skiriamoji geba (m)	Formatas
Oro <i>LIDAR</i>	Orlaiviai / Dronai	Pilotiniai ir nepilotuojami orlaiviai	Lazerinis impulsų skeneris	Viengubi / daugkartiniai impulsai	Kinta	0.5–5	<i>LAS</i> / <i>LAZ</i>
Palydovinis <i>LIDAR</i>	<i>NASA GEDI</i>	Tarptautinė kosminė stotis (<i>TKS</i>)	<i>GEDI LIDAR</i>	Pilnos bangos <i>LIDAR</i>	Priklauso nuo <i>TKS</i> orbitos	25–100	<i>HDF5</i>

LIDAR duomenys miškininkystėje taikomi itin plačiai – jie naudojami ne tik medžių aukščiui ar lajų parametrams nustatyti, bet ir skaitmeninių paviršiaus (*DSM*, angl. *Digital Surface Model*) bei skaiteminio reljefo modelių (*DTM*, angl. *Digital Terrain Model*) kūrimui. Tokie modeliai leidžia įvertinti dirvožemio erozijos riziką, drėgmės pasiskirstymą, nusidėvėjimo zonas, taip pat analizuoti

sudėtingus topografinius miško reljefo bruožus net ir tankiai apaugusiuose regionuose, kur optiniai metodai dažnai praranda tikslumą (Chen et al., 2022).

Dėl savo tikslumo *LIDAR* plačiai naudojamas miškų biomasės ir anglies sandėjų modeliavimui, leidžiant įvertinti miškų indėlį į anglies sekvestracijos procesus. *LIDAR* duomenys leidžia identifikuoti pokyčius po kirtimų, vėjavartų, gaisrų ar kitų stichinių reiškinių, taip pat stebėti regeneracijos eigą ir efektyvumą. Be to, *LIDAR* skenavimas leidžia fiksuoti miško struktūros pokyčius, susijusius su klimato sąlygomis, ligomis ar kenkėjų plitimu. Lajų aukščio ar tankumo mažėjimas gali būti ankstyvas indikatorius apie miško sveikatos pablogėjimą, todėl ši technologija tampa vis reikšmingesnė ekosistemų būklės vertinime ir apsaugoje (Silva et al., 2023).

Dar vienas svarbus aspektas – *LIDAR* integracija su kitais nuotolinio stebėjimo metodais, ypač su optiniais (pvz., *Sentinel-2*) ir radariniais (pvz., *Sentinel-1*) duomenimis. Tokia integracija leidžia sudaryti daugiasluoksnes analizės sistemas, kurios reikšmingai padidina miškų stebėsenos tikslumą, padeda nustatyti sudėtingus struktūrinius bei funkcinius pokyčius, o taip pat prisideda prie efektyvesnio nacionalinio ir tarptautinio miškų valdymo sprendimų priėmimo (Zolkos et al., 2023).

2.4 DRONŲ (UAV) TECHNOLOGIJOS

Dronai, dar vadinami bepiločiais orlaiviais, pastaraisiais metais tapo viena reikšmingiausių pažangių technologijų miškų stebėjimo srityje. Ši technologija išsiskiria galimybe greitai, lankščiai ir labai tiksliai rinkti duomenis apie miško dangos struktūrą, augmenijos būklę bei dinamiškai besikeičiančius aplinkos procesus. Šiuolaikiniai UAV sprendimai suteikia galimybę įmontuoti įvairius jutiklius, todėl viena platforma gali būti pritaikyta tiek miškotvarkos planavimui, tiek ekstremalių reiškinių – gaisrų, ligų ar vėtrų poveikio vertinimui (Paneque-Gálvez et al., 2022; Ribeiro et al., 2023).

Dronai ypač vertingi dėl savo nepriklausomumo nuo debesuotumo ar palydovinių sistemų aprėpties – jie užtikrina centimetrinę erdvinę raišką ir gali būti naudojami net tankiai apaugusiose ar sunkiai prieinamose vietovėse. UAV leidžia surinkti labai aukštos skiriamosios gebos duomenis, kurie ypač svarbūs lokalizuotai analizei, pavienių medžių tyrimams ir operatyviam reagavimui į miškų pokyčius (Puliti et al., 2020).

Dronuose naudojami įvairūs jutikliai, priklausomai nuo tyrimo tikslo: raudona, žalia, mėlyna (*RGB*, angl. *Red, Green, Blue*) kameros, multispektriniai, hiperspektriniai bei *LIDAR* jutikliai. *RGB* kameros leidžia fiksuoti vizualius miško pokyčius, o multispektriniai jutikliai – analizuoti artimąjį infraraudonąjį spektrą, kuris itin jautrus augalijos sveikatos pokyčiams. Šių jutiklių duomenys naudojami vegetacijos indeksams, tokiems kaip *NDVI* ar *EVI*, skaičiuoti, leidžiant įvertinti fotosintezės intensyvumą, stresą ar sausros poveikį (Samiappan et al., 2021). Hiperspektriniai jutikliai

fiksuoja šimtus siaurų spektrinių juostų ir leidžia identifikuoti medžių rūšis, lapijos cheminę sudėtį, sausros požymius bei ligų ar kenkėjų plitimą ankstyvose stadijose (Deng et al., 2021).

Dar didesnio detalumo analizė pasiekama naudojant *UAV* integruotus *LIDAR* jutiklius, kurie leidžia generuoti labai tikslius trimates struktūros modelius. Tokie duomenys svarbūs miško biomasės, medžių aukščio, lajų tankumo ir reljefo analizėms. *UAV–LIDAR* integracija leidžia atlikti tikslų miško tūrio, regeneracijos ar kirtimų poveikio įvertinimą net ir labai sudėtingose topografinėse sąlygose (González-Ferreiro et al., 2023).

Lyginamąją šių *UAV* naudojamų jutiklių charakteristikų apžvalgą pateikia 2.4 lentelė, kurioje palyginami *RGB*, multispektriniai, hiperspektriniai ir *LIDAR* jutikliai pagal spektrines savybes, taikymo sritis, skiriamąją gebą ir duomenų formatus (žr. 2.4 lentelę).

2.4 lentelė. Optinių, multispektrinių, hiperspektrinių ir *LIDAR* jutiklių charakteristikos miškų stebėjimui. Šaltiniai: Wulder et al., 2023; Liu et al., 2023; National Aeronautics and Space Administration (*NASA*), 2022.

Programa	Misija	Platforma	Jutiklis	Juostų skaičius	Atsinaujinimo laikas (dienos)	Skiriamoji geba (m)	Formatas
RGB kamera	Miško lajos analizė	Dronai / Lėktuvai / Palydovai	Optinė kamera	3 (<i>RGB</i>)	Kinta	Aukšta (0.1–1)	<i>JPEG / TIFF</i>
Multispektrinis jutiklis	Augalijos sveikatos stebėjimas	Dronai / Lėktuvai / Palydovai	Multispektrinė vaizdavimo sistema	5 / 12	Kinta	Vidutinė (1–10)	<i>GeoTIFF / HDF5</i>
Hiperspektrinis jutiklis	Detali spektrinė analizė	Dronai / Lėktuvai / Palydovai	Hiperspektrinė vaizdavimo sistema	Šimtai	Kinta	Aukšta spektrinė, vidutinė erdvinė (1–30)	<i>HDF5 / ENVI</i>
LIDAR jutiklis	3D miško struktūros kartografavimas	Dronai / Lėktuvai / Palydovai	Lazerinis impulsų skeneris	Viengubi / daugkartiniai impulsai	Kinta	Labai aukšta (0.5–5)	<i>LAS / LAZ</i>

Dronai ypač naudingi analizuojant ekstremalių įvykių padarinius, tokius kaip gaisrai, vėtros ar potvyniai. *UAV* gali greitai užfiksuoti pažeistas teritorijas, įvertinti žalos mastą ir sudaryti planus

atkūrimo priemonėms. Ilgalaikiai UAV duomenų rinkiniai leidžia sekti regeneracijos eigą, vertinti ekosistemų atsparumą bei miško gebėjimą prisitaikyti prie klimato kaitos keliamų iššūkių (Rodríguez-Galiano et al., 2020).

Apibendrinant galima teigti, kad UAV technologijos tampa nepakeičiama tvarios miškininkystės sudėtine dalimi. Dėl aukšto erdvinio detalumo, lankstumo ir galimybės integruoti įvairius jutiklius, dronai vis dažniau taikomi moksliniuose tyrimuose, miškų apskaitoje, ekologiniuose monitoringuose bei valstybiniuose miškų valdymo procesuose. UAV integracija su *LIDAR*, optiniais ir radariniais duomenimis sudaro sąlygas kurti daugiasluoksnes stebėsenos sistemas, kurios žymiai padidina analizės tikslumą ir laiku leidžia priimti sprendimus miškų apsaugai ir atkūrimui.

2.5 MIŠKŲ STEBĖJIMO METODAI

Nuotolinė miškų stebėseną yra viena svarbiausių šiuolaikinės miškininkystės sričių, leidžianti sistemingai, objektyviai ir operatyviai vertinti miško dangos pokyčius, augmenijos produktyvumą bei antropogeninių ir gamtinių veiksnių poveikį. Tarp dažniausiai taikomų nuotolinio stebėjimo priemonių išsiskiria vegetacijos indeksai, kurie leidžia kiekybiškai įvertinti augmenijos būklę remiantis elektromagnetinio spektro ruožų atspindžiais (Zhu et al., 2020; Chen et al., 2022). Dažniausiai skaičiuojami indeksai remiasi matomosios raudonosios (angl. Red), artimojo infraraudonojo spektro (*NIR*, angl. *Near-Infrared*) ir trumpųjų bangų infraraudonojo spektro (*SWIR*, angl. *Short-Wave Infrared*) ruožų duomenimis. Vegetacijos indeksai yra plačiai taikomi globaliu, regioniniu ir vietiniu mastu, siekiant įvertinti miškų produktyvumą, sveikatos pokyčius, augmenijos tankumą, reakciją į stresą bei stichinių reiškinių padarinius. Remiantis ilgalaikiais palydoviniais duomenimis galima nustatyti augmenijos būklės tendencijas, stebėti miško sveikatos dinamiką, analizuoti skirtingų rūšių reakcijas į klimato sąlygas bei modeliuoti galimus pokyčius ateityje (Xie et al., 2021; Li et al., 2020).

Tarp svarbiausių indeksų išskirtini šie: *NDVI*, *EVI*, *NBR* ir *NVI*. Kiekvienas jų turi skirtingą jautrumą, specifiką ir taikymo sritis, todėl miškininkystėje dažnai naudojami kartu.

NDVI yra vienas seniausių ir plačiausiai taikomų rodiklių, kuris leidžia įvertinti bendrą augalijos tankumą ir fotosintezės aktyvumą:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

kur *NIR* – artimojo infraraudonojo spektro atspindys (700 – 1100 nm), *RED* – matomojo raudonojo spektro atspindys (620–700 nm). *NDVI* reikšmės svyruoja nuo –1 iki +1, o vertės artimos +1 rodo

tankią, sveiką augmeniją, tuo tarpu žemos arba neigiamos vertės rodo negyvą dangą ar vandens telkinius (Li et al., 2020).

EVI išsprendžia **NDVI** prisotinimo problemą tankiose augmenijose ir mažina atmosferos bei dirvožemio poveikį:

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)}$$

čia $G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$, o **BLUE** – mėlynojo spektro atspindys. **EVI** dažnai taikomas subrendusių miškų struktūros, lajos ir produktyvumo analizei (Gao et al., 2023).

NBR naudojamas miško gaisrų poveikio vertinimui, remiasi artimojo ir trumpojo bangų infraraudonojo spektro skirtumais:

$$NRB = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Šis indeksas padeda nustatyti sudegusių plotų ribas, įvertinti gaisro intensyvumą bei sekti regeneracijos eigą (Park et al., 2021).

NVI normalizuotas indeksas, skirtas vegetacijos būklei ir pokyčiams vertinti, nepriklausomai nuo absoliučių **NDVI** reikšmių, kas leidžia efektyviau lyginti skirtingų laikotarpių duomenis:

$$NVI = \frac{VI_i - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}}$$

kur VI_i – **NDVI** (ar kito indekso) reikšmė tam tikru momentu, $VI_{\min}$, $VI_{\max}$ – to laikotarpio minimali ir maksimali reikšmės. **NVI** reikšmės nuo 0 iki 1 padeda įvertinti vegetacijos būklės santykį lyginant su maksimaliomis galimomis sąlygomis, todėl indeksas tinkamas daugiametėms analizėms ir regioninių skirtumų vertinimui (Karim et al., 2023).

Visų keturių indeksų charakteristikos pateiktos 2.5 lentelėje (žr. 2.5 lentelę).

2.5 lentelė. Vegetacijos indeksų charakteristikos ir taikymas miškų stebėjimui. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Wang et al., 2023; European Space Agency (ESA), 2024.

Indeksas	Pilnas pavadinimas	Paskirtis	Skaiciavimo formulė	Taikymas	Duomenų šaltiniai
<i>NDVI</i>	Normalizuotas vegetacijos indeksas	Augmenijos sveikatos įvertinimas	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	Globali augmenijos stebėsena	<i>Landsat, Sentinel-2, MODIS</i>
<i>EVI</i>	Patobulintas vegetacijos indeksas	Miško struktūros ir lajos analizė	$G \times (NIR - RED) / (NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)$	Tankios augmenijos analizė	<i>Landsat, Sentinel-2, MODIS</i>
<i>NBR</i>	Normalizuotas degimo santykis	Gaisrų poveikio vertinimas	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Sudegusių teritorijų analizė	<i>Landsat, Sentinel-2, MODIS</i>
<i>NVI</i>	Normalizuotas vegetacijos indeksas	Vegetacijos būklės pokyčių analizė	$(VI_i - V_{Imin}) / (V_{Imax} - V_{Imin})$	Laiko eilučių lyginimas, normavimas	<i>Sentinel-2, MODIS, Landsat</i>

Gaisrų stebėsenai papildomai taikomi šiluminio spinduliavimo duomenys, surenkami matomojo ir infraraudonųjų spindulių radiometro (*VIIRS*, angl. *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) ir *MODIS* palydovais. Jie fiksuoja aktyvius gaisrų židinius, šiluminės anomalijas ir leidžia operatyviai vertinti gaisrų mastą bei dinamiką (Jin et al., 2020). Šių jutiklių charakteristikos pateiktos 2.6 lentelėje (žr. 2.6 lentelę).

2.6 lentelė. *VIIRS* ir *MODIS* palydovinių duomenų charakteristikos gaisrų stebėjimui. Šaltinis: National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2023.

Programa	Misija	Paskirtis	Jutiklis	Skiriamoji geba (m)	Atsinaujinimo laikas (val.)	Duomenų formatas	Taikymas
<i>VIIRS</i>	<i>Suomi NPP (NASA)</i>	Globalus gaisrų aptikimas ir stebėjimas	Matomo ir infraraudonųjų spindulių radiometras (<i>VIIRS</i>)	375	Du kartus per dieną	<i>HDF5</i>	Miškų gaisrų aptikimas, šiluminės anomalijos
<i>MODIS</i>	<i>Terra & Aqua (NASA)</i>	Gaisrų ploto ir intensyvumo analizė	Vidutinės skiriamosios gebos radiometras (<i>MODIS</i>)	1000	Du kartus per dieną	<i>HDF – EOS</i>	Gaisrų plotų kartografavimas, gaisrų stiprumo vertinimas

Vegetacijos indeksų ir šiluminės analizės integracija leidžia sukurti daugiasluoksnius, tikslius gaisrų poveikio modelius, kurie yra itin svarbūs tiek ekstremalių įvykių prevencijai, tiek ilgalaikiam ekosistemų atkūrimo planavimui. Tokie metodai tampa neatsiejama duomenimis grįsto miškų valdymo dalimi, ypač reaguojant į augantį klimato kaitos poveikį (Chuvieco et al., 2022).

2.6 DIRBTINIS INTELEKTAS IR MAŠININIS MOKYMASIS NUOTOLINIUOSE TYRIMUOSE

Pastaraisiais metais dirbtinio intelekto (*DI*, angl. *Artificial Intelligence*) ir mašininio mokymosi (*ML*, angl. *Machine Learning*) metodai tapo neatsiejama aplinkos mokslų ir miškininkystės dalimi. Nuotoliniai tyrimai, pagrįsti palydoviniais, *LIDAR* ar *UAV* duomenimis, generuoja itin didelius informacijos srautus, kuriuos reikia greitai, tiksliai ir patikimai apdoroti. Tradiciniai duomenų analizės būdai dažnai yra per lėti, riboti savo gebėjimais ar per daug priklausomi nuo subjektyvių interpretacijų. Tuo tarpu *DI* metodai leidžia automatizuoti duomenų apdorojimo procesus, aptikti kompleksinius dėsningumus, iš anksto nenumatytas struktūras bei generuoti tikslias prognozes. Šios galimybės ženkliai prisideda prie miškų pokyčių stebėsenos, degradacijos analizės, gaisrų padarinių vertinimo ir tvarios miškotvarkos planavimo (Balling et al., 2023; Zhang et al., 2023).

2.6.1 Dirbtinio intelekto metodų taikymas miškų stebėsenai

Giluminis mokymasis (*DL*, angl. *Deep Learning*) – tai viena pažangiausių *DI* sričių, kuri remiasi daugiasluoksnių neuroninių tinklų veikimu. Vienas iš dažniausiai taikomų metodų miškininkystėje – konvoliuciniai neuroniniai tinklai (*CNN*, angl. *Convolutional Neural Networks*), kurie pasižymi gebėjimu apdoroti erdvinius, spektrinius bei tekstūrinius duomenis. *CNN* tinklai plačiai taikomi žemės dangos klasifikavimui, degradacijos lygio nustatymui, miško gaisrų pažeistų teritorijų kartografavimui, regeneracijos monitoringui, augalijos sveikatos vertinimui bei nelegalių kirtimų aptikimui (Zhao et al., 2022; Zhong et al., 2023).

CNN algoritmų privalumas – tai jų gebėjimas automatiškai identifikuoti svarbius požymius iš multispektrinių ar hiperspektrinių vaizdų be būtinybės nurodyti konkrečius klasifikavimo kriterijus. Naujausi tyrimai rodo, kad *CNN* tinklai, pritaikyti *Sentinel-2*, *Landsat* ar *UAV* duomenims, dažnai pasiekia daugiau nei 90 % tikslumo klasifikuodami skirtingus miško dangos tipus ar aptikdami pažeidimus (Ghorbanzadeh et al., 2022; Xie et al., 2021).

Taip pat efektyviai taikomi rekursiniai neuroniniai tinklai (*RNN*, angl. *Recurrent Neural Networks*) ir jų išplėstinė versija – ilgalaikės trumposios atminties tinklai (*LSTM*, angl. *Long Short – Term Memory*). Šie modeliai naudingi, kai analizuojami laiko eilučių duomenys – pavyzdžiui,

siekiant prognozuoti miškų ploto mažėjimą, regeneracijos dinamiką ar vegetacijos atsaką į klimato veiksnius (Zhou et al., 2021).

2.6.2 Objektų atpažinimo ir klasifikavimo modeliai

Be giluminio mokymosi, plačiai naudojami ir klasikiniai ML metodai, tokie kaip atsitiktinių miškų (angl. *Random Forest*), palaikomojo vektoriaus mašinos (*SVM*, angl. *Support Vector Machines*), artimiausių kaimynų (*KNN–K*, angl. *K–Nearest Neighbors*). Šie algoritmai pasižymi patikimumu ir gebėjimu veikti net su riboto dydžio duomenų rinkiniais. Jie taikomi miškų klasifikacijai, rūšių atpažinimui, biomasės skaičiavimui, kenkėjų židinių nustatymui ir vegetacijos indeksų analizės automatizavimui (Ma et al., 2022; Wang et al., 2021).

Random Forest algoritmas itin atsparus duomenų triukšmui, leidžia apdoroti didelį kiekį spektrinių kintamųjų ir dažnai naudojamas medžių rūšių klasifikavimui. *SVM* metodas efektyvus tada, kai skirtingų klasių ribos yra sudėtingos ir artimos viena kitai, o *KNN* tinkamas greitam, nesudėtingam klasifikavimui lokaliuose srityse.

2.7 lentelė pateikia *DI* metodų taikymo miškų stebėsenai lyginimą (žr. 2.7 lentelę).

2.7 lentelė. Dirbtinio intelekto metodai miškų stebėjimui. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Sabat-Tomala et al., 2020.

Metodas	Paskirtis	Naudojami algoritmai	Duomenų šaltiniai	Taikymas
Giluminis mokymasis	Automatizuotas miško pažeidimų, kirtimų aptikimas	Neuroniniai tinklai, konvoliuciniai tinklai (<i>CNN</i>)	Palydoviniai vaizdai, dronų vaizdai, <i>LIDAR</i> duomenys	Miškų degradacijos stebėjimas, nelegalių kirtimų aptikimas
Objektų atpažinimo modeliai	Miškų rūšių ir ligų pažeistų vietų atpažinimas	Mašininio mokymosi modeliai (<i>Random Forest</i> , <i>SVM</i>)	Multispektriniai ir hiperspektriniai vaizdai	Medžių rūšių klasifikacija, ligų ir kenkėjų židinių nustatymas

2.6.3 Algoritmų palyginimas

Kiekvienas *DI* algoritmas turi savo privalumų ir ribojimų. Norint pasirinkti tinkamą metodą, svarbu atsižvelgti į duomenų kiekį, klasifikavimo sudėtingumą, analizės tikslumą ir apdorojimo trukmę. 2.8 lentelė pateikia pagrindinių algoritmų lyginimą (žr. 2.8 lentelę).

2.8 lentelė. Algoritmų palyginimas miškų stebėsenos uždaviniuose. Šaltiniai: Zhu et al., 2022; Sabat-Tomala et al., 2020.

Algoritmas	Tikslumas (%)	Reikia daug duomenų	Naudojimo sudėtingumas	Tinka laiko eilutėms	Reikia žymėtų duomenų
<i>CNN</i>	> 90	Taip	Aukštas	Ne	Taip
<i>LSTM</i>	~ 85–90	Taip	Labai aukštas	Taip	Taip
<i>Random Forest</i>	~ 80–90	Ne	Vidutinis	Ne	Taip
<i>SVM</i>	~ 80	Ne	Vidutinis	Ne	Taip

2.6.4 Integracija su GIS ir debesų platformomis

Efektyvi *DI* metodų taikymo praktika vis dažniau apima jų integraciją su geografinėmis informacinėmis sistemomis (*GIS*, angl. *Geographic Information System*) bei debesijos kompiuterinėmis platformomis, tokiomis kaip Google Žemės Variklis (*GEE*, angl. *Google Earth Engine*), Amazon žiniatinklio paslaugos (*AWS*, angl. *Amazon Web Services*) ar Google debesų platforma (*GCP*, angl. *Google Cloud Platform*). *GIS* leidžia vizualizuoti modelių rezultatus erdviniuose kontekstuose, tuo tarpu debesų kompiuterija suteikia galimybę apdoroti didžiulius duomenų kiekius realiu laiku (Zhu et al., 2022).

Naudojant *GEE* galima integruoti palydovinius duomenis (pvz. *MODIS*, *Sentinel-2*), vykdyti analizę *Python* arba *JavaScript* aplinkose, o rezultatus pateikti interaktyviuose žemėlapiuose. Tai leidžia ne tik sumažinti duomenų laikymo ir apdorojimo kaštus, bet ir greitai pritaikyti *DI* modelius įvairioms geografinių zonų analizėms. *LIDAR* duomenys, *UAV* vaizdai ar multispektriniai indeksai taip pat gali būti integruojami per debesų programavimo sąsajas.

3 NUOTOLINIŲ TYRIMŲ PRITAIKYMAS ŠVENČIONIŲ RAJONO MIŠKŲ POKYČIŲ ANALIZEI

Miškų būklės vertinimas ir pokyčių stebėseną yra vieni svarbiausių uždavinių siekiant užtikrinti tvarų gamtinių išteklių valdymą, efektyvią aplinkosaugos politiką bei klimato kaitos švelninimo priemones. Atsižvelgiant į tai, kad miškai atlieka itin svarbų vaidmenį reguliuojant anglies ciklą, palaikant biologinę įvairovę ir stabdant dirvožemio eroziją, jų stebėsenos tikslumas tampa gyvybiškai svarbus. Pastaraisiais metais nuotoliniai tyrimai iš esmės pakeitė miškų monitoringo paradigmą – tradicinius antžeminius matavimus papildė ar net pakeitė palydoviniai, aerofotografiniai ir lazerinio skenavimo metodai, leidžiantys didelio masto, reguliarią, objektyvią ir ekonomiškai pagrįstą analizę.

Spektrinė analizė, grindžiama daugiajuosčių jutiklių duomenimis, suteikia galimybę ne tik nustatyti bendrą miško dangos būklę, bet ir identifikuoti sutrikimus, atsinaujinimo procesus, degradacijos židinius ar net įvertinti ligų, kenkėjų, gaisrų ar kitų streso veiksnių poveikį. Ši analizė tampa dar svarbesnė atsižvelgiant į šiuolaikinius iššūkius – spartėjančius klimato pokyčius, intensyvėjančią ūkinę veiklą, urbanizaciją bei gamtos reiškinių ekstremumą.

Švenčionių rajonas, pasižymintis vienu didžiausių miškingumo lygių Lietuvoje, yra ypač tinkamas tokiai analizei. Šioje teritorijoje ryškiai išreikštos abi pagrindinės miškų pokyčių priežastys – gamtinės (klimato svyravimai, kenkėjai, stichinės nelaimės) ir antropogeninės (kirtimai, urbanizacija, neteisėta veikla). Tyrime taikoma nuotolinių tyrimų metodų sintezė, apimanti *Sentinel-2*, *MODIS*, *Landsat* duomenų analizę, kartu taikant pagrindinius vegetacijos indeksus – *NDVI*, *EVI*, *NBR* ir *NVI*. Šis daugiapakopis požiūris leidžia gauti išsamų ir patikimą vertinimą apie miškų būklės tendencijas ir erdvinę jų kaitą.

3.1 TYRIMO OBJEKTAS IR VIETA

3.1.1 Tyrimo vieta

Švenčionių rajonas yra rytinėje Lietuvos dalyje, netoli valstybės sienos su Baltarusija. Rajonas pasižymi aukštu miškingumu – daugiau nei 52 % jo teritorijos dengia miškai, o tai reikšmingai viršija šalies vidurkį (Valstybinė miškų tarnyba, 2023). Miškai čia atlieka ne tik ekologinę, bet ir socialinę bei ūkinę funkciją – jie naudojami rekreacijai, gamtinių išteklių gavybai ir biologinės įvairovės išsaugojimui.

Reljefas sudėtingas ir įvairus, suformuotas paskutiniojo ledynmečio, būdingas banguotas kraštovaizdis, išraiškingi kalvagūbriai, ežerų ir upių tinklas. Hidrologiniu požiūriu rajonas yra svarbus dėl Žeimenos upės baseino, kuris daro esminę įtaką vietinių miškų struktūrai – čia dažnesni

drėgni eglynai ir mišrūs medynai (Gudynienė et al., 2021). Tokia reljefo ir klimato įvairovė formuoja palankias sąlygas kompleksinei ekologiškai analizei. Tyrimo teritorijos išsidėstymas pavaizduotas – 3.1 paveiksle (žr.3.1 pav.).



3.1 pav. Švenčionių rajono žemėlapis (šaltinis: sudaryta autoriaus remiantis regioninės geoinformacinės aplinkos duomenimis, www.regia.lt).

3.1.2 Tyrimo objektas, ribos ir pagrindimas

Tyrimo objektą sudaro visas Švenčionių rajono miškų fondas, įskaitant tiek valstybinius, tiek privačius miškus. Miškų tipologinė įvairovė yra plati – dominuoja pušynai (lot. *Pinus sylvestris*), užimantys apie 45 % miško ploto, dažniausiai augantys sausuose, smėlinguose dirvožemiuose; eglės (lot. *Picea abies*) sudaro apie 25 % ir yra labiau paplitusios derlingesniuose, drėgnesniuose dirvožemiuose. Beržai (lot. *Betula pendula*) ir mišrūs medynai užima atitinkamai apie 15 % ir 10 %, o jų buvimas siejamas su antriniu miško atsikūrimu po kirtimų ar stichinių veiksnių poveikio (Beniusis et al., 2020).

Miškų pokyčiai Švenčionių rajone pastaraisiais dešimtmečiais yra stipriai veikiami antropogeninių veiksnių, tokių kaip intensyvūs plynieji ir atrankiniai kirtimai, urbanizacijos plėtra, neteisėti miško naudojimo atvejai, taip pat gamtinių stresorių – klimato kaita, ilgalaikės sausras, kenkėjų ir ligų protrūkiai. Klimato kaitos poveikį ypač jaučia spygliuočių medynai – sausras silpnina medžių atsparumą, skatina žievėgraužių (lot. *Ips typographus*) plitimą ir židinių formavimąsi (Seidl et al., 2017). Gamtiniai sutrikimai, tokie kaip gaisrai, stiprūs vėjai, išvirstantys medžiai, sudaro sąlygas antrinei miško struktūros kaitai.

Analizuojama ir Labanoro giria – viena didžiausių miško masių Švenčionių regione ir visoje Lietuvoje. Tai saugoma teritorija, įtraukta į *Natura 2000* tinklą, turinti išskirtinę ekologinę vertę dėl aukštos biologinės įvairovės bei retų buveinių ir rūšių gausos (Europos aplinkos agentūra, 2021). Labanoro giria leidžia palyginti žmogaus veiklos poveikį skirtingo apsaugos statuso teritorijose.

Šio tyrimo tikslas – atlikti išsamią miškų būklės ir kaitos analizę Švenčionių rajone, pasitelkiant nuotolinius tyrimus bei pažangius geoinformacinius ir analizės metodus. Tyrimo objektas apima šias pagrindines kryptis: pirmiausia, miškų struktūriniai pokyčiai ir regeneracijos tendencijos po kirtimų ar gaisrų; antra, augalijos sveikatos įvertinimas remiantis vegetacijos indeksais, nustatant ligų ar sausros poveikį; trečia, gamtiniai sutrikimai ir jų sukelta erdvinė bei funkcinė miško struktūros dinamika.

Pasirinkimas analizuoti visą Švenčionių rajono teritoriją grindžiamas siekiu užtikrinti kompleksinį ir reprezentatyvų vaizdą apie miškingiausių Lietuvos vietovių ekosisteminius pokyčius, kas ypač svarbu nacionalinio lygmens miškotvarkos sprendimų pagrindimui.

3.2 DUOMENŲ RINKIMAS IR ANALIZĖ

Siekiant įvertinti Švenčionių rajono miškų būklę, kaitos pobūdį bei aptikti galimus ekologinius sutrikimus, tyrime taikomi kelių šaltinių nuotoliniai duomenys ir kompleksiniai analizės metodai, derinant multispektrinius ir hiperspektrinius duomenis. Nuotolinių tyrimų duomenų integracija leidžia ne tik vizualizuoti esamą situaciją, bet ir stebėti laikui bėgant vykstančius pokyčius, atlikti kiekybinę analizę bei prognozuoti ateities tendencijas, pasitelkiant vegetacijos indeksų ir palydovinių vaizdų klasifikacijos metodikas (Zhao et al., 2021; Singh et al., 2022).

3.2.1 Palydoviniai vaizdai

Analizės pagrindą sudaro trijų skirtingos raiškos palydovinių misijų duomenys – *Sentinel-2*, *Landsat* bei *MODIS*. Šių sistemų multispektriniai jutikliai leido apskaičiuoti keturis pagrindinius vegetacijos indeksus – *NDVI*, *EVI*, *NBR* ir *NVI*, kurie naudoti kiekybiniam Švenčionių rajono miškų būklės vertinimui, remiantis vieno laikotarpio – 2024 m. gegužės mėnesio – duomenimis. Kiekvienas palydovas pasižymi skirtingais erdviniais ir spektriniais parametrais, todėl jų lyginimas leidžia įvertinti skirtingų duomenų šaltinių tinkamumą regioniniam miškų monitoringui.

Sentinel-2 duomenys buvo naudojami tikslinei ir detaliai miškų struktūros bei sveikatos būklės analizei. Šio palydovo multispektrinis jutiklis apima 13 spektrinių juostų, tarp jų – artimąjį ir trumpabangį infraraudonąjį spektrus, kurie ypač svarbūs vegetacijos indeksų skaičiavimui (Li et al., 2021). *Sentinel-2* vaizdų erdvinė raiška siekia iki 10 metrų, o atsinaujinimo dažnis – kas 5 dienas, todėl šie duomenys ypač tinkami trumpalaikių ir sezoninių pokyčių vertinimui.

Landsat duomenys buvo naudojami kaip vidutinės raiškos šaltinis, leidžiantis gauti stabilias, daugelį metų kauptas laiko eilutes. Nors šiame tyrime buvo analizuojamas tik vienas laikotarpis, *Landsat* spektrinės charakteristikos taip pat sudarė sąlygas apskaičiuoti visus keturis vegetacijos indeksus. Šio palydovo vaizdų skiriamoji geba siekia 30 metrų, o atsinaujinimo ciklas – 16 dienų (Zhu et al., 2022).

MODIS duomenys, nors pasižymi žemesne – nuo 250 iki 1000 metrų – erdvine raiška, pasiūlė didelį laikinių duomenų dažnumą – du kartus per dieną. *MODIS* indeksai buvo naudoti siekiant užtikrinti didesnę erdvinę aprėptį, ypač naudingą miškų stebėsenai stambesniu mastu. *MODIS* platforma ypač naudinga gaisrų ir sezoninių pokyčių analizėje, o jos duomenys taip pat buvo pritaikyti *NDVI*, *NBR* ir *NVI* skaičiavimui (Boschetti et al., 2021).

NVI buvo skaičiuojamas papildomai prie klasikinio *NDVI*, *EVI* ir *NBR*, siekiant supaprastinti skirtingų duomenų šaltinių palyginimą. Šis indeksas transformuoja originalių indeksų reikšmes į bendrą skalę nuo 0 iki 1, pasitelkiant kiekvieno rodiklio maksimalias ir minimalias reikšmes visoje teritorijoje. Tokiu būdu *NVI* leidžia lyginti skirtingų šaltinių duomenis nepriklausomai nuo jų skalių, suteikdamas galimybę objektyviai įvertinti vegetacijos intensyvumą vienu laikotarpiu.

Visi palydoviniai vaizdai buvo atsisiųsti iš atvirų šaltinių: *Copernicus Open Access Hub*, *USGS EarthExplorer*, *NASA FIRMS* platformų. Duomenys buvo apdorojami Atvirojo Kodo Geografinės Informacijos Sistema (*QGIS*, angl. *Quantum Geographic Information System*) aplinkoje, taikant atmosferinę korekciją, debesuotumo filtravimą, mozaikavimą ir regioninį išskyrimą pagal Švenčionių rajono ribas. Vienodas apdorojimo metodas užtikrino rezultatų palyginamumą ir analizės nuoseklumą.

3.2.2 Vegetacijos indeksų analizė

Vegetacijos indeksai yra vienas iš pagrindinių įrankių kiekybiniam augmenijos būklės įvertinimui, leidžiantis analizuoti augalijos sveikatos būklę, tankumą, reakciją į stresą bei ekologinius pokyčius. Šiame tyrime buvo taikomi keturi pagrindiniai indeksai: *NDVI*, *EVI*, *NBR* ir *NVI*, apskaičiuoti pagal standartines formules, pritaikytas skirtingų palydovų spektrinėms juostoms.

NDVI – vienas plačiausiai taikomų vegetacijos indeksų, leidžiantis nustatyti bendrą augmenijos būklę ir fotosintezės aktyvumą. Kur *NIR* – artimojo infraraudonojo, o *RED* – raudonojo spektro atspindys. *NDVI* reikšmės svyruoja nuo -1 iki $+1$, o reikšmės nuo 0.2 iki 0.5 rodo vidutinę vegetaciją, virš 0.5 – tankią ir sveiką augmeniją, o neigiamos reikšmės dažniausiai atitinka vandenį, plikas dirvas ar urbanizuotas teritorijas.

EVI buvo taikomas siekiant įveikti *NDVI* prisotinimo efektą tankioje augmenijoje ir sumažinti atmosferinių trikdžių bei dirvožemio poveikį. Kur $G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$, o *BLUE* – mėlynojo

spektro atspindys. *EVI* yra ypač tinkamas tankių miško masyvų analizei, nes pasižymi didesniu jautrumu lajos struktūros pokyčiams (Huete et al., 2002).

NBR buvo naudojamas įvertinti galimus miško nudegimo požymius ar degradacijos židinius. Kur *SWIR* – trumpabangio infraraudonojo spektro atspindys. *NBR* yra jautrus nudegusiems ar sutrikusiems plotams, o pokyčiai įvertinami skaičiuojant diferencialinį normalizuotą degimo santykio indeksą (*dNBR*, angl. *Differenced Normalized Burn Ratio*), kuris apskaičiuojamas kaip *NBR* reikšmių skirtumas tarp skirtingų laikotarpių. Nors šiame tyrime buvo analizuojamas tik vienas laikotarpis, *NBR* reikšmės vis tiek suteikia informacijos apie galimai sutrikusias zonas.

NVI buvo taikytas siekiant papildomai kiekybiškai įvertinti augmenijos būklę nepriklausomai nuo absoliučių *NDVI*, *EVI* ar *NBR* reikšmių. Šis indeksas normalizuoja reikšmes į skalę nuo 0 iki 1, leidžiant efektyviau palyginti skirtingų teritorijų vegetacijos stiprumą. Kur *V_i* – analizės laikotarpio vegetacijos indekso reikšmė, o *V_{imin}* ir *V_{imax}* – to laikotarpio minimalios ir maksimalios reikšmės. Šis indeksas ypač naudingas atliekant regioninius lyginimus arba vertinant santykinę vegetacijos būklę vienu metu keliose skirtingose teritorijose (Karim et al., 2023).

Visos skaičiavimų formulės „2.5 Miškų stebėjimo metodai“ poskyryje.

Visi vegetacijos indeksai buvo skaičiuojami *QGIS* aplinkoje, naudojant rastrinį skaičiuotuvą (angl. *Raster Calculator*) funkcionalumą. Be to, analizės procese buvo pasitelktas pusiau automatinė klasifikavimo įskiepis (*SCP*, angl. *Semi-Automatic Classification Plugin*), kuris leido tiksliai ir greitai skaičiuoti indeksus, atlikti jų klasifikaciją bei parengti vizualinius žemėlapius. Šių įrankių taikymas užtikrina efektyvų duomenų apdorojimą ir analizę skirtingų palydovinių sistemų mastu.

3.2.3 Tyrimo eiga

Švenčionių rajono miškų būklės vertinimas buvo vykdomas taikant nuoseklų ir vieningą tyrimo planą, kurio pagrindinis tikslas buvo palyginti skirtingų palydovinių sistemų – *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* – gebėjimą identifikuoti vegetacijos būklę vienu laikotarpiu. Tyrimo metu buvo analizuojami 2024 metų gegužės mėnesio palydoviniai vaizdai, atspindintys aktyvų vegetacijos sezoną, kai augmenijos būklė yra labiausiai išreikšta spektriniais rodikliais. Vaizdai buvo atsisiųsti iš oficialių atvirų duomenų platformų: *Sentinel-2* duomenys – iš *Copernicus Open Access Hub*, *Landsat* – iš *USGS EarthExplorer*, o *MODIS* duomenys – iš *NASA LAADS DAAC* archyvo. Visi vaizdai aprėpė Švenčionių rajono teritoriją ir buvo parinkti atsižvelgiant į debesuotumo lygį bei duomenų kokybę.

Gauti palydoviniai vaizdai buvo apdorojami naudojant atviro kodo *QGIS* programinę įrangą. Atliekant analizę, kiekvienas duomenų rinkinys buvo georeferencuotas, atlikta radiometrinė ir atmosferinė korekcija bei pašalintas debesuotumas ir šešėliai. Duomenys buvo vienodinti pagal tyrimo teritoriją – išskirtas Švenčionių rajono administracinis ribas atitinkantis regionas, kuriame

atlikta tolesnė analizė. Papildomai buvo naudojami *QGIS* papildiniai, tokie kaip *SCP* kurie leido greitai ir tiksliai atlikti spektrinių indeksų skaičiavimus ir vaizdų valdymą.

Kiekvienam palydovui buvo atskirai apskaičiuoti pagrindiniai vegetacijos indeksai – *NDVI*, *EVI*, *NBR* ir *NVI*. Skaičiavimai atlikti naudojant standartines formules, pritaikytas kiekvieno palydovo spektrinėms juostoms. Šie indeksai leido kiekybiškai įvertinti vegetacijos gyvybingumą ir struktūrą bei atlikti jų tarpusavio palyginimą pagal vizualinius, statistinius ir erdvinius parametrus. Skaičiavimų rezultatai buvo pateikti kaip rastriniai žemėlapiai, kurie vėliau naudoti tolimesnei analizei.

Kadangi tyrimo tikslas nebuvo laiko eilučių analizė ar pokyčių aptikimas, šiame darbe nebuvo taikomi spektrinių indeksų skirtumų metodai ar mašininio mokymosi algoritmai. Pagrindinis dėmesys buvo skiriamas skirtingų palydovinių duomenų palyginimui – vertinta jų erdvinė raiška, indeksų reikšmių pasiskirstymo tendencijos, spalvinių žemėlapių interpretacijos.

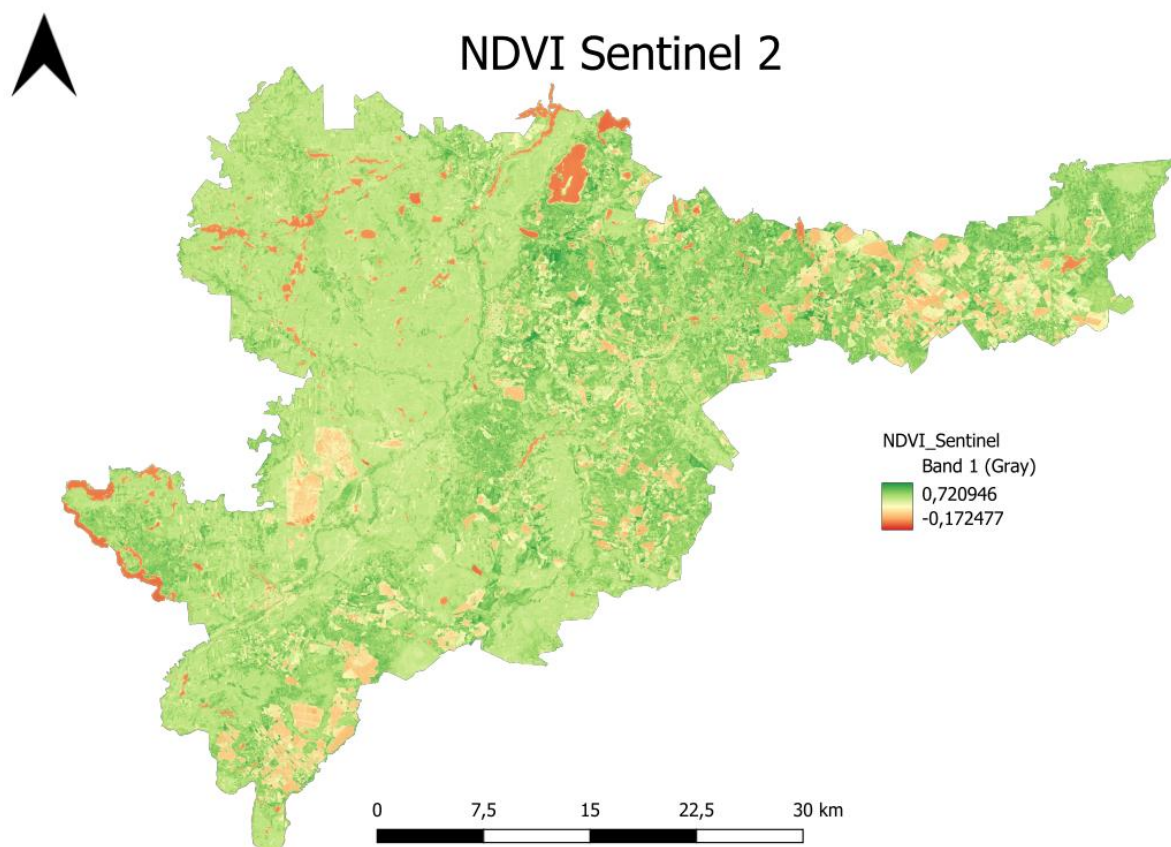
Galiausiai tyrimo rezultatai buvo vizualizuoti *QGIS* aplinkoje, sudarant teminius žemėlapius kiekvienam vegetacijos indeksui ir kiekvienam palydovui. Šie kartografiniai produktai papildyti lentelėmis, atspindinčiomis duomenų kiekybinius skirtumus. Analizės rezultatai buvo interpretuoti remiantis kiekvieno palydovo techninėmis charakteristikomis ir duomenų kokybe, siekiant nustatyti, kuris duomenų šaltinis geriausiai tinka regioninio masto miškų būklės analizei Lietuvoje.

4 TYRIMAS

4.1 NDVI RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ

Tiriant miškų būklę Švenčionių rajono teritorijoje 2024 m., buvo taikytas normalizuotas diferencialinis vegetacijos indeksas (NDVI), kuris laikomas vienu iš pagrindinių ir plačiausiai naudojamų vegetacijos analizės rodiklių. Šis indeksas skaičiuojamas remiantis artimojo infraraudonojo (NIR) ir raudonojo (Red) spindulių spektrinių juostų atspindėjimu ir leidžia objektyviai įvertinti augalijos gyvybingumą, fotosintezės intensyvumą bei bendrą ekosistemos produktyvumą. Aukštesnės NDVI reikšmės rodo tankesnę ir sveikesnę augmeniją, tuo tarpu žemesnės reikšmės dažniausiai susijusios su degradavusiomis ar nevegetacinėmis teritorijomis.

Siekiant įvertinti skirtingų palydovinių duomenų tinkamumą miškų stebėsenai ir pokyčių fiksavimui, buvo atlikta palyginamoji analizė, pasitelkiant *Sentinel-2*, *MODIS* ir *Landsat* duomenis. Analizės rezultatai iliustruojami 4.1 paveiksle, kuriame pateikiamas NDVI reikšmių pasiskirstymas pagal *Sentinel-2* duomenis Švenčionių rajone (žr. 4.1 pav.).



4.1 pav. NDVI reikšmės pagal *Sentinel-2* duomenis Švenčionių rajone.

Sentinel–2 palydovo *NDVI* žemėlapis išsiskiria itin aukšta – 10 metrų – erdvine raiška, leidžiančia labai detaliai ir tiksliai atvaizduoti tiek didelius miško masyvus, tiek smulkias struktūrines detales. Dėl šios raiškos galima aiškiai matyti ne tik bendrą miško dangos būklę, bet ir pakraščių fragmentaciją, gaisravietes, plynių kirtimų zonas bei net atskiras natūralios regeneracijos vietas. Toks detalumas yra ypač svarbus, kai siekiama vertinti miškų sveikatos būklę, nustatyti degradacijos židinius ar planuoti tvaraus naudojimo priemones savivaldybės arba regioniniu lygmeniu.

NDVI vertės žemėlapyje svyruoja nuo – 0,17 iki 0,72. Šis platus reikšmių diapazonas leidžia aiškiai diferencijuoti įvairaus tankumo vegetacijos zonas. Teigiamos reikšmės (nuo 0,2 iki 0,7) atitinka aktyvią ir sveiką augmeniją, o žemėlapiu legenda dažniausiai išreiškia šias zonas ryškiomis žaliomis spalvomis. Didžiausios *NDVI* reikšmės (virš 0,6) fiksuojamos centrinėje ir rytinėje Švenčionių rajono dalyse. Šios teritorijos dominuoja tankūs spygliuočių miškai (pušynai ir eglynai) bei mišrūs miškai, kurių struktūra yra natūrali arba minimaliai paveikta žmogaus veiklos. Tokių miškų plotai žemėlapyje išsiskiria sodriai žalia spalva, rodydami aukštą fotosintezės aktyvumą bei optimalias ekosistemines sąlygas.

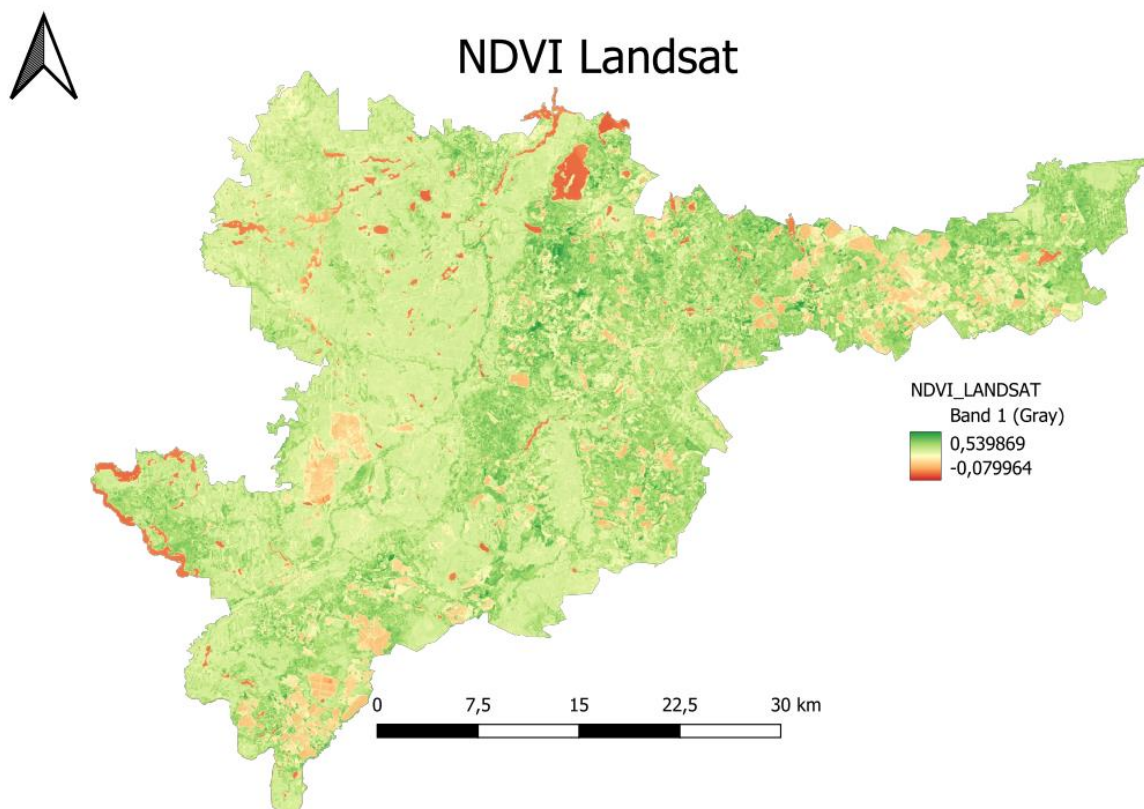
Tarpinės *NDVI* reikšmės (apie 0,3–0,5) būdingos miškingiems kraštovaizdžiams, kurie yra veikiami žmogaus veiklos arba kuriuose dominuoja jaunuolynai ir mišri augmenija. Tokios teritorijos žemėlapyje pasireiškia gelsvai žalsvais atspalviais. Šios zonos apima miškų pakraščius, buferines zonas prie laukų ar kaimų, kur vyrauja ne vienalytė augmenija arba kur miško danga susimaišiusi su atviromis pievomis, pamiškėmis ar krūmynais.

Mažiausios *NDVI* reikšmės (nuo 0,1 iki 0,2) žymimos gelsvomis, rudomis ar net pilkomis spalvomis. Tokie rodmenys būdingi nevegetacinėms teritorijoms, atviroms žemės naudmenoms, laukymėms, plyniams kirtimams bei sutrikdytoms vietovėms. Švenčionių rajone tokios teritorijos ryškiai matomos pietvakarinėje ir šiaurės rytinėje dalyse, kur pastebimos intensyvaus miško naudojimo zonos – plynieji kirtimai ar pažeisti miškai. Taip pat žemėlapyje matomos atviros pelkėtos vietovės, kurios, dėl specifinės augalijos struktūros ir vandens pertekliaus, pasižymi žemomis *NDVI* reikšmėmis.

Svarbu pažymėti, kad *Sentinel*–2 žemėlapis ne tik parodo augmenijos būklę tam tikru laikotarpiu, bet ir leidžia atlikti dinامينius stebėjimus – pavyzdžiui, vertinti miško atsigavimą po kirtimų ar gaisrų. Tokia analizė tampa ypač reikšminga formuojant ilgalaikes miškų stebėsenos strategijas ir priimant sprendimus dėl miškotvarkos.

Be to, *Sentinel*–2 teikiamų duomenų atsinaujinimo dažnis (kas 5 dienas) leidžia gauti beveik realaus laiko vaizdą. Tai reiškia, kad galima stebėti sezoninius pokyčius, vegetacijos dinamiką ir net greitus aplinkos sutrikimus (pvz., staigius pažeidimus, potvynius ar kenkėjų poveikį).

Apibendrinant, *Sentinel-2* palydovo *NDVI* žemėlapis Švenčionių rajono kontekste suteikia labai aukštos detalės ir tikslumo informaciją apie miškų dangą, leidžia tiksliai lokalizuoti pažeidimų židinius ir stebėti ekologinius procesus tiek natūraliuose, tiek antropogenizuotuose kraštovaizdžiuose.



4.2 pav. *NDVI* reikšmės pagal *Landsat* duomenis Švenčionių rajone.

Landsat palydovo *NDVI* žemėlapis leidžia atlikti pakankamai detalią ir patikimą miškų augmenijos analizę (žr. 4.2 pav). Nors šio palydovo erdvinė raiška yra 30 metrų, t. y. žemesnė nei *Sentinel-2*, vis dėlto ji išlieka pakankama miško ekosistemų tyrimams kraštovaizdžio ar regioniniu mastu. Dėl šio mastelio duomenys tampa ypač naudingi, kai reikia atlikti istorinę analizę, nes *Landsat* programa veikia nuo 1972 metų ir turi vieną ilgiausių palydovinių archyvų pasaulyje.

NDVI reikšmių intervalas *Landsat* žemėlapyje svyruoja nuo – 0,08 iki 0,54, o tai yra kiek siauresnis spektrinis diapazonas nei *Sentinel-2* atveju. Dėl to šis indeksas mažiau jautrus labai intensyviai vegetacijai, o skirtumai tarp labai tankių ir mažiau tankių miško struktūrų čia nėra tokie ryškūs. Nepaisant to, žemėlapyje išlieka pakankamas kontrastas tarp vegetacijos ir nežaliuojančių paviršių, leidžiantis identifikuoti pagrindines ekosistemų tendencijas ir antropogeninius pokyčius.

Aukštesnės *NDVI* reikšmės, pasiekiančios apie 0,5, yra fiksuojamos centrinėje Švenčionių rajono dalyje. Šiose zonose dominuoja mišrūs arba spygliuočių miškai, kurie žemėlapyje išreiškiami

šviesiai arba tamsiai žaliais tonais. Augmenija čia atrodo pakankamai aktyvi, kas rodo gerą fotosintezės būklę bei ekosisteminį stabilumą. Be to, šiose teritorijose dažniausiai nėra reikšmingų žmogaus veiklos trikdžių – jos nutolusios nuo intensyvaus ūkininkavimo ar urbanizuotų teritorijų.

Tarpinės *NDVI* reikšmės, apie 0,25–0,4, pasireiškia miško pakraščiuose, pamiškėse, pievose arba jaunuolynuose, kur vyrauja mažesnio tankio ar mišri augmenija. Šios teritorijos dažniausiai pažymimos gelsvai žalia spalva. Dažnai tokios vietos atspindi natūralios miško dinamikos plotus arba vietas, kurios jau patyrė žmogaus poveikį (pvz., atrankinius kirtimus, rekreacinį naudojimą).

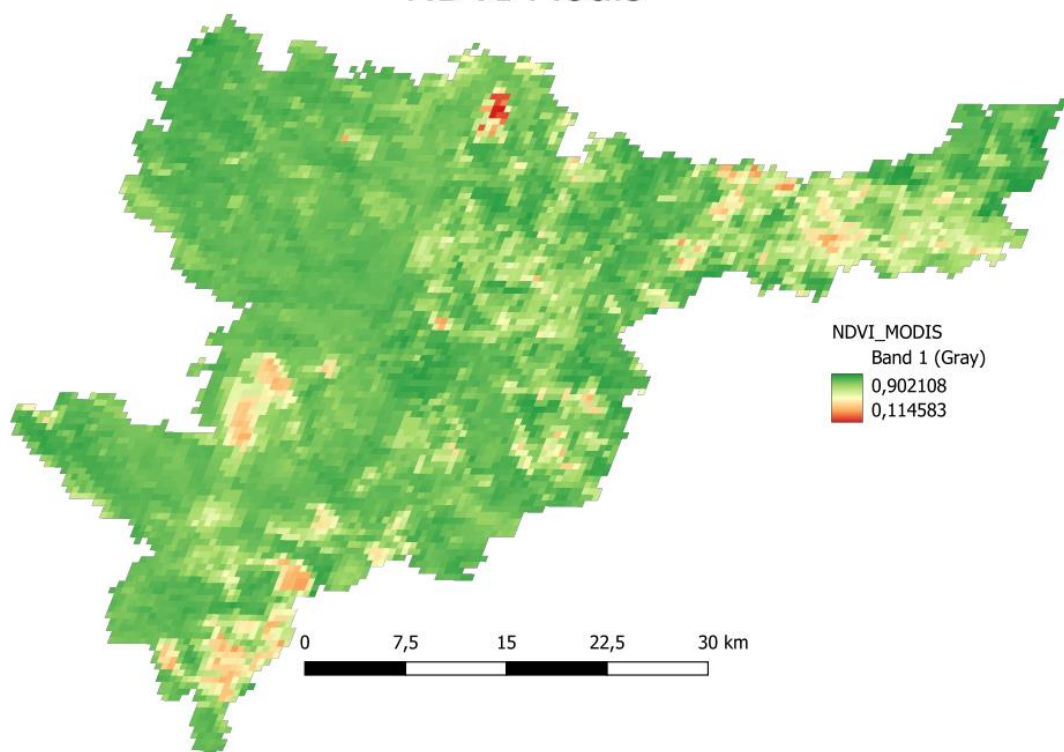
Mažiausios *NDVI* reikšmės (–0,08–0,1), vaizduojamos gelsvais, smėliniais ar oranžiniais tonais, išryškėja teritorijose, kuriose augalija yra sunykusi arba visai neauga. Tokie plotai stebimi antropogeniniu požiūriu pažeistose vietovėse – buvusiose kirtavietėse, pramoniniuose objektuose ar infrastruktūros juostose. Žemas vegetacijos indeksas taip pat užfiksuotas pelkėtose vietovėse bei dirvonuojančiose žemėse, kurios dėl natūralių arba žmogaus nulemtų veiksmų pasižymi mažesne augalijos danga.

Svarbu pažymėti, kad *Landsat NDVI* žemėlapis taip pat leidžia stebėti miškų pokyčius per ilgą laikotarpį naudojant istorinius duomenis, galima sudaryti laiko eilučių analizę, vertinti ilgalaikes miškų degradacijos arba atsikūrimo tendencijas, identifikuoti klimato ar žmogaus veiklos įtaką.

Apibendrinant, nors *Landsat* duomenys nepasižymi tokia aukšta erdvine raiška kaip *Sentinel-2*, jie išlieka itin vertingi tiek dėl savo istorinės vertės, tiek dėl galimybės atlikti teminę analizę plačiu mastu. Dėl šios priežasties *Landsat* duomenys yra labai tinkami ilgalaikėms miškų stebėsenos programoms ir ypač naudingi palyginant su naujesniais, bet trumpesnės trukmės palydoviniais duomenimis.



NDVI Modis



4.3 pav. NDVI reikšmės pagal MODIS duomenis Švenčionių rajone.

MODIS palydovo NDVI duomenys atveria galimybę stebėti augmenijos būklę globaliu ir regioniniu mastu. Šis palydovas pasižymi dideliu aprėpties dažniu – jis stebi Žemės paviršių kas vieną arba dvi dienas, todėl yra ypač tinkamas ilgo laikotarpio stebėsenai bei sezoninių pokyčių analizei. Vis dėlto pagrindinis apribojimas – žema erdvinė raiška, kuri šiuo atveju siekia 250 metrų. Tai reiškia, kad vienas pikselis apima 6,25 hektaro plotą, o tai riboja smulkios erdvės analizės galimybes.

NDVI reikšmių spektras *MODIS* duomenyse yra itin platus nuo 0,11 iki 0,90. Aukščiausios fiksuotos vertės (apie 0,90) žemėlapyje matomos tamsiai žalia spalva, kuri rodo labai sveiką ir tankią augmeniją. Tokie plotai lokalizuojasi daugiausia šiaurės vakarinėje ir pietrytinėje Švenčionių rajono dalyse – zonose, kur istoriškai dominuoja miškai arba natūrali augalija. Šie rezultatai rodo, kad net ir esant žemai raiškai, *MODIS* efektyviai atskleidžia pagrindinius vegetacijos pasiskirstymo dėsningumus ir gali būti naudojamas kaip foninis informacijos sluoksnis (žr. 4.3 pav.).

Vidutinės NDVI reikšmės – tarp 0,4 ir 0,6 – atitinka mišrios augalijos zonas, pievas ar miško pakraščius. Šios teritorijos žemėlapyje pasireiškia gelsvai žalsvais tonais ir apima centrinę rajono dalį bei aplinkines gyvenvietes. Žemiausios reikšmės (0,1 iki 0,2), pažymėtos gelsvomis, rudomis ar net pilkomis spalvomis, rodo urbanizuotus plotus, atvirus dirvožemius, žemės ūkio naudmenas arba

degraduotas teritorijas. Tačiau dėl pikselio dydžio šių zonų ribos žemėlapyje yra labai suapvalintos, neišskiriamos smulkios detalės ar konkretūs kirtimo atvejai.

Būtina atkreipti dėmesį, kad *MODIS* žemėlapyje vegetacijos klasės susilieja – tai apsunkina tikslią teritorinę analizę ar mažų pokyčių stebėseną. Pavyzdžiui, mažesnio masto plynieji kirtimai ar lokalūs ligų židiniai gali būti visai nepastebimi, nes jie patenka į bendro pikselio spektrinį atspindį, kuris dominuoja pagal didžiausią plotą.

Nepaisant to, *MODIS* išlieka vertingas įrankis ilgalaikių ir didelio masto analizėms. Dėl reguliaraus stebėjimo šis palydovas leidžia stebėti vegetacijos sezoniškumą, sausros poveikį, stichinių nelaimių padarinius ar net žaibiškus pokyčius, kaip gaisrai. Pavyzdžiui, naudojant *MODIS* galima fiksuoti miškų regeneraciją po kirtimų ar sudegimo – stebint *NDVI* reikšmių augimą laiko eilučių analizėje.

Apibendrinant, *MODIS NDVI* žemėlapis suteikia apibendrintą, bet labai naudingą vaizdą apie Švenčionių rajono vegetacijos būklę. Dėl mažos erdvinės raiškos jis nėra tinkamas detalizuotai analizei, tačiau ypač tinka didelių tendencijų ir ilgalaikės kaitos tyrimams, taip pat kaip papildomas informacinis šaltinis, integruojamas su aukštesnės raiškos palydoviniais duomenimis.

4.1.1 Apibendrinimas

NDVI analizė parodė, kad *Sentinel-2* duomenys yra itin tinkami detaliems miškų pokyčių tyrimams – jie leidžia tiksliai lokalizuoti pažeidimų židinius, identifikuoti plynuosius kirtimus bei atsinaujinančias zonas. *Landsat* duomenys, nepaisant mažesnės erdvinės raiškos, išlieka vertingi dėl savo ilgaamžio duomenų archyvo, kuris leidžia stebėti bendras vegetacijos kaitos tendencijas per kelis dešimtmečius. *MODIS* duomenys, nors ir neatspindi smulkių struktūrinių detalių, pasižymi labai dažnu atsinaujinimo intervalu ir puikiai tinka regioninių ar globalių sezoninių pokyčių analizei. *NDVI* indeksas suteikia galimybę vertinti augalijos produktyvumą bei bendrą ekosistemų būklę, o skirtingų palydovų duomenų taikymas leidžia pasirinkti tinkamiausią analizės mastelį ir tikslą. Šie skirtingi *NDVI* taikymo aspektai apibendrinti 4.1 lentelėje, kurioje įvertintas *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* palydovų tinkamumas miškų kaitos analizėje (žr. 4.1 lentelę).

4.1 lentelė. Skirtingų palydovų (*Sentinel*, *Landsat*, *MODIS*) taikymo tinkamumo įvertinimas miškų kaitos *NVDI* analizėje

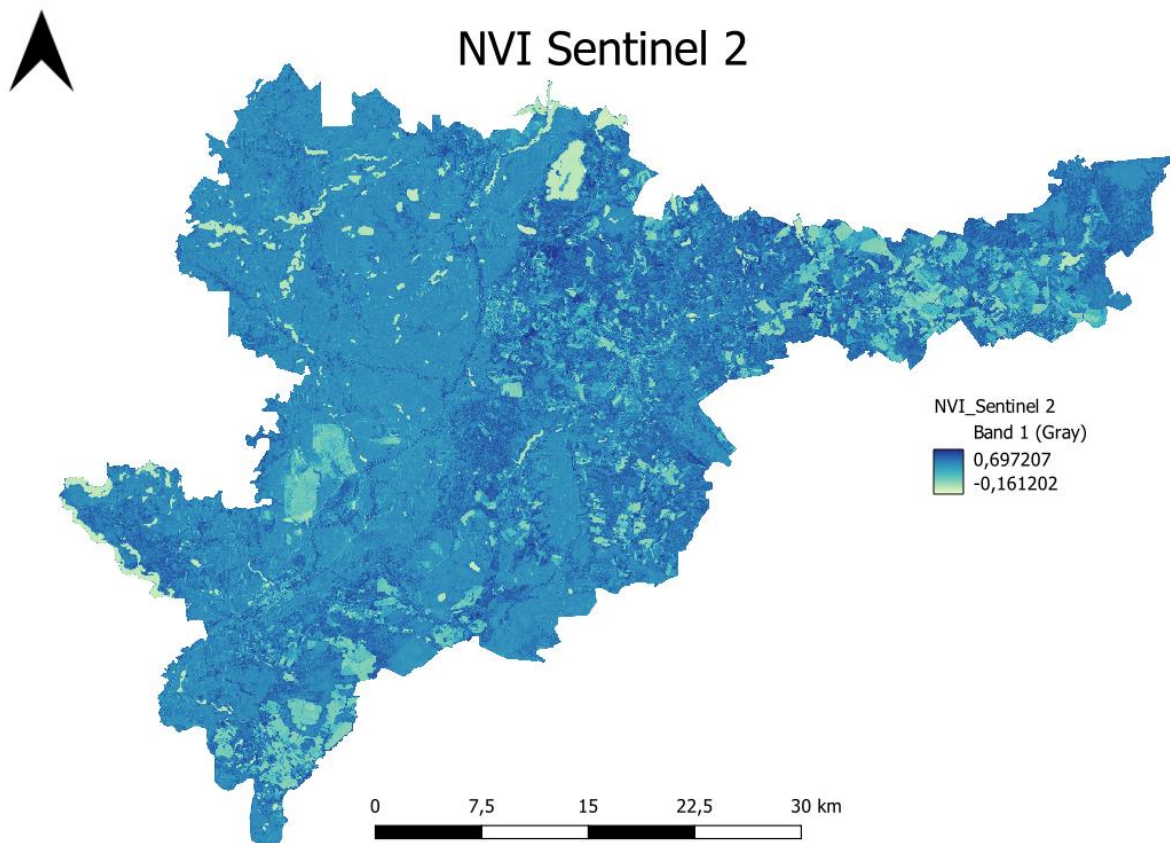
Palydovas	Erdvinė raiška (m)	<i>NDVI</i> reikšmių ribos	Tinkamumas
<i>Sentinel-2</i>	10	–0,17–0,72	Aukštos erdvinės raiškos duomenys puikiai tinka detaliai miško struktūros analizei, leidžia tiksliai identifikuoti degradacijos židinius, plynuosius kirtimus ir mažos apimties pokyčius.
<i>Landsat</i>	30	–0,08–0,54	Gera atspindi bendras vegetacijos kaitos tendencijas, turi ilgametį duomenų archyvą, todėl ypač tinkamas ilgalaikiai miškų kaitos analizei ir retrospektyviems tyrimams.
<i>MODIS</i>	250	0,11–0,90	Žemos erdvinės, bet aukštos laikinės raiškos duomenys puikiai pritaikomi stambaus masto, nacionalinio ar kontinentinio lygmens stebėsenai, ypač naudingi vertinant sezoniškumą ir plačias augalijos pokyčių tendencijas.

4.1.2 Išvada

NDVI analizės rezultatai patvirtino, kad *Sentinel-2* palydovo duomenys dėl savo didelio detalumo geriausiai tinka lokalizuoti miško struktūros pokyčius, įskaitant degradacijos židinius ir regeneracijos zonas. *Landsat* duomenys, nors ir pasižymi mažesne raiška, išlieka vertingi dėl ilgo archyvo, leidžiančio analizuoti kaitą ilgesnėje laiko skalėje. *MODIS* duomenys, nors ir mažiau tinkami detalizuotai analizei, užtikrina galimybę vykdyti plataus masto monitoringą bei identifikuoti bendras vegetacijos tendencijas. Tokiu būdu, *NDVI* efektyviai atskleidžia bendrą augmenijos būklę, o trijų palydovų integracija leidžia pasiekti optimalų balanso tašką tarp detalumo ir aprėpties.

4.2 *NVI* RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ

Sentinel-2 palydovas yra itin vertingas dėl savo spektrinio jautrumo ir plataus aprėpties dažnio, kuris leidžia reguliariai fiksuoti Žemės paviršiaus pokyčius įvairiomis klimato ir augimo sąlygomis. *NVI* analizė, atliekama naudojant *Sentinel-2* duomenis, leidžia ne tik nustatyti vegetacijos gyvybingumo lygį, bet ir aptikti subtilius sveikatos pokyčius, kurie dar nėra vizualiai matomi. Tai ypač svarbu vertinant augalijos atsaką į streso veiksnius, tokius kaip sausrą, kenkėjų poveikį ar dirvožemio nusausėjimą.



4.4 pav. *NVI* reikšmės pagal *Sentinel-2* duomenis Švenčionių rajone.

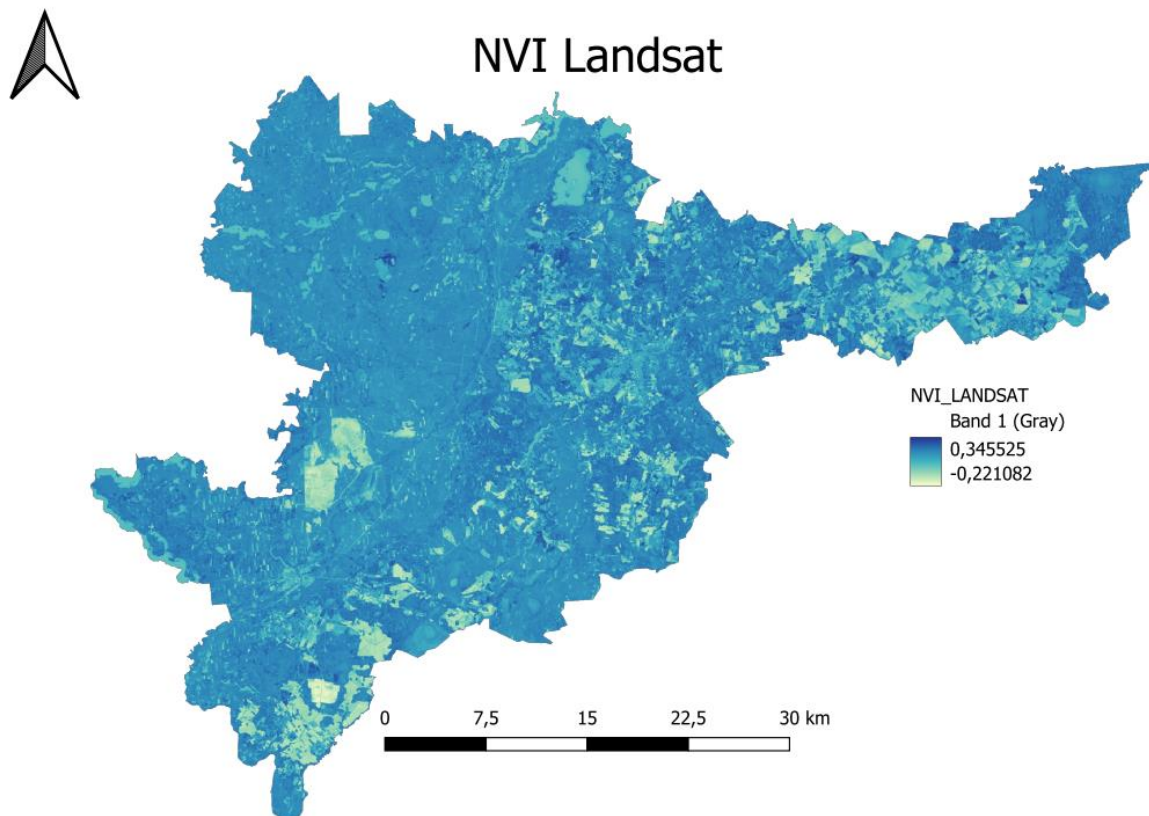
Žemėlapyje dominuoja vidutinės ir aukštos *NVI* reikšmės, kurios vizualizuojamos naudojant spektrinę gradaciją nuo šviesiai melsvai žalsvos iki sodriai mėlynos spalvos (žr. 4.4 pav.). Tai leidžia efektyviai interpretuoti vegetacijos būklę – kuo intensyvesnė mėlyna spalva, tuo gyvybingesnė ir tankesnė augmenija. Aukščiausios reikšmės, artėjančios prie 0,697, fiksuojamos teritorijose, kur dominuoja tankūs spygliuočių ir mišrūs miškai, daugiausia šiaurės, centrinėje bei šiaurės rytinėje Švenčionių rajono dalyse. Šie miškai pasižymi aukštu chlorofilo kiekiu ir geru sveikatingumu, todėl jų atspindėjimas artimojoje infraraudonojoje juostoje yra stiprus – tai lemia didesnę *NVI*.

Tuo tarpu mažesnės *NVI* vertės, kurios svyruoja iki -0,161, fiksuojamos vietovėse, kuriose vegetacija yra išretėjusi arba degraduojanti. Tokie plotai žemėlapyje vizualizuojami šviesiai žalsvomis ar gelsvomis spalvomis. Jie paplitę pietrytiniuose ir pietvakariniuose rajono kraštuose, kur istoriškai vyko intensyvesnė ūkinė veikla – plynieji miško kirtimai, žemės ūkio ekspansija ar urbanizuotų teritorijų plėtra. Be to, šioms vietoms būdingas ir didesnis antropogeninis poveikis, kuris neigiamai veikia vegetacijos struktūrą ir jos regeneracijos galimybes. Kai kuriose teritorijose išryškėja neigiamos *NVI* vertės, kurios dažnai rodo visiškai nevegetacinius paviršius, tokius kaip atviri dirvožemiai, smėlynai ar statybvietės.

Svarbu pabrėžti, kad *Sentinel-2* palydovas leidžia atlikti ne tik viena laikę momentinę analizę, bet ir stebėti laiko sekas – pavyzdžiui, fiksuoti sezoniškumo poveikį vegetacijai arba įvertinti

atkūrimo eigą po gaisrų, kenkėjų protrūkių ar kirtimų. Nuolatinis duomenų atnaujinimas (kas 5 dienas) suteikia galimybę užtikrinti tikslų ir laiku atliekamą monitoringą. Šis aspektas itin aktualus formuojant tvarius miškų valdymo sprendimus, kai būtina reaguoti į pokyčius realiuoju laiku arba planuoti atkūrimo darbus, remiantis objektyviais duomenimis.

Todėl *Sentinel-2* *NVI* analizė neabejotinai yra viena efektyviausių priemonių, leidžiančių ne tik kokybiškai įvertinti miškų būklę, bet ir detalai modeliuoti bei prognozuoti augalijos pokyčius ateityje, tuo pačiu užtikrinant moksliskai pagrįstą sprendimų priėmimą miškotvarkos ir aplinkosaugos srityse.



4.5 pav. *NVI* reikšmės pagal *Landsat* duomenis Švenčionių rajone.

Landsat duomenų pagrindu sukurtas normalizuoto vegetacijos indekso (*NVI*) žemėlapis pasižymi 30 metrų skiriamąja geba, kuri yra vidutinė, tačiau pakankama bendro pobūdžio miškų ir kitų vegetacinių struktūrų vertinimui (žr. 4.5 pav.). Nors erdvinis detalumas čia yra tris kartus mažesnis nei *Sentinel-2* duomenų, *Landsat* vis dar suteikia galimybę atlikti patikimą vegetacijos analizę, ypač vertinant didesnio masto struktūrinius pokyčius. Šis palydovas ypač vertinamas dėl ilgos duomenų archyvavimo istorijos, leidžiančios atlikti tikslias ilgalaikes retrospektyvines analizes, kurios yra ypač svarbios miškų kaitos tyrimuose.

Švenčionių rajono teritorijoje apskaičiuoto *NVI* reikšmių intervalas svyravo nuo – 0,221 iki 0,345. Šis spektras yra gerokai siauresnis nei *Sentinel–2* atveju, todėl žemėlapyje mažiau ryškiai atsiskleidžia subtilūs vegetacijos skirtumai. Nepaisant to, bendro pobūdžio vegetacijos intensyvumo zonos yra aiškiai matomos. Aukštesnės reikšmės (nuo 0,2 iki 0,345), kurios žemėlapyje žymimos tamsesnės mėlynos atspalviais, koncentruojasi centrinėje ir rytinėje rajono dalyse – tai vietovės, kuriose vyrauja tankesni, mažai antropogeninio poveikio paveikti miškai. Šie plotai pasižymi didesne fotosintezės veikla, o tai patvirtina ir jų atspindėjimo charakteristikos *NIR* bei *RED* spektrinėse juostose.

Vidutinės *NVI* reikšmės, kurios dažniausiai žymimos žalsvai mėlynomis ar pilkšvomis spalvomis, pasiskirsto visame rajone ir atspindi mišrių ar retesnių miškų teritorijas, taip pat jaunuolynus ar dalinai atsikūrusius plotus. Tokiose teritorijose vegetacijos kiekis ir struktūra yra nevienalytė, todėl indeksas fiksuoja vidutinio stiprumo augalijos atsaką.

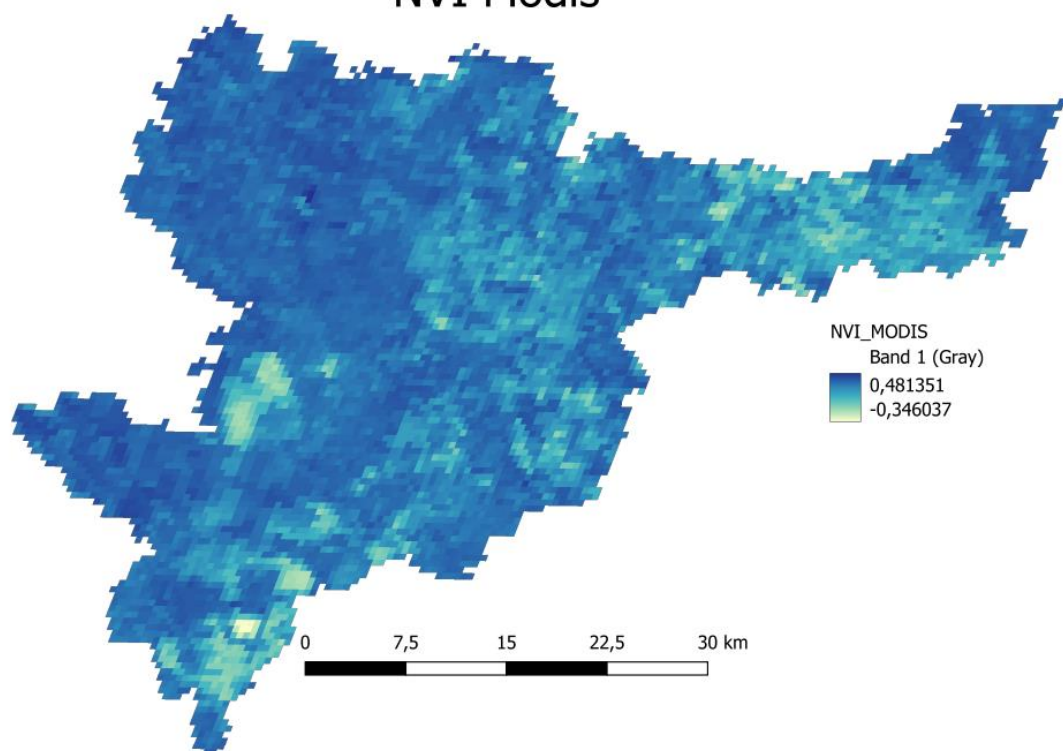
Mažiausios *NVI* reikšmės, kurios svyruoja nuo – 0,2 iki 0,0 arba šiek tiek aukščiau, yra fiksuojamos pietinėje rajono dalyje, kur vyrauja žemės ūkio paskirties naudmenos, atviros pievos, ganyklos ir buvusių kirtimų zonos. Šie plotai žemėlapyje žymimi gelsvai pilkomis, rudos spalvos ar netgi blankiai mėlynais atspalviais, o tai rodo menką arba visiškai nesančią vegetaciją. Šiose zonose *NVI* reikšmės taip pat gali būti paveiktos paviršinių dirvožemio ypatybių arba likusios organinės dangos, todėl vertinant šiuos plotus būtinas papildomas kontekstas.

Nors dėl mažesnės erdvinės raiškos *Landsat* žemėlapyje prarandama dalis detalių, ypač smulkesnėse teritorijose ar pakraščiuose, bendra vegetacijos dinamika yra aiškiai interpretuojama. Šie duomenys gali būti ypač naudingi ilgesnių laiko eilučių analizėms, nes *Landsat* programos duomenys yra prieinami nuo 1970–ųjų metų pabaigos. Tokiu būdu galima nustatyti tendencijas, stebėti miškų regeneracijos tempus, ilgalaikius degradacijos procesus arba klimato pokyčių poveikį vegetacijos raidai.

Apibendrinant, *Landsat* pagrindu atlikta *NVI* analizė yra svarbi tuo, kad leidžia stebėti vegetacijos pokyčius vidutinio masto teritorijose, suteikia patikimą informaciją apie bendrą miškų būklę bei leidžia vykdyti laikines analizes kelių dešimtmečių mastu. Nors *Sentinel–2* duomenys yra tikslesni lokaliuose tyrimuose, *Landsat* indeksai yra nepakeičiami tada, kai reikia apžvelgti istorinius pokyčius arba stebėti ilgalaikes transformacijas ekosistemose.



NVI Modis



4.6 pav. NVI reikšmės pagal *MODIS* duomenis Švenčionių rajone.

MODIS palydovo duomenimis sudarytas normalizuoto vegetacijos indekso (NVI) žemėlapis pateikia apibendrintą augalijos būklės atspindį Švenčionių rajone (žr. 4.6 pav.). *MODIS* duomenų skiriamoji geba yra 250 metrų, tai reiškia, kad vienas pikselis atspindi 6,25 hektarų plotą, todėl smulkios detalės – pavyzdžiui, siauri kirtimų ruožai, mažos pažeidimų zonos, siauros miško juostos ar jaunuolynai – vizualiai susilieja į stambesnius darinius. Šis apribojimas reiškia, kad detalių, lokalių pokyčių aptikimas tampa ribotas arba neįmanomas.

Nepaisant žemos erdvinės raiškos, *MODIS* NVI reikšmių spektras pasižymi plačiu intervalų diapazonu nuo $-0,346$ iki $0,481$. Tai teoriškai leidžia aptikti tiek labai žemą, tiek labai intensyvią vegetaciją, tačiau praktikoje šis spektrinis pranašumas išnyksta, nes mažo mastelio pokyčiai yra statistiškai išlyginami. Vis dėlto, tam tikros zonos, kuriose vyrauja ypač tanki ar aktyvi augmenija, išlieka aiškiai matomos – jos žymimos sodriai mėlynomis spalvomis ir koncentruojasi rytinėje bei pietinėje rajono dalyse, kur išsaugoti ištisiniai miško masyvai. Tokie masyvai gerai atspindi stipresnį artimųjų infraraudonųjų spindulių reflektavimą, o tai lemia aukštesnes NVI reikšmes.

Tuo tarpu teritorijos, kuriose vykdyti intensyvūs plynieji kirtimai ar kuriose vegetacija itin reta – dažniausiai šiaurės rytinėje bei vakarinėje dalyse – žemėlapyje pasireiškia šviesiai žalsvomis

ar net gelsvomis spalvomis. Šios spalvinės zonos rodo sumažėjusį chlorofilo kiekį, kuris koreliuoja su mažesniu *NIR* atspindėjimu. Tačiau, kadangi pikselio viduje gali egzistuoti keli skirtingi žemės dangos tipai (pvz., miškas ir laukas), šios reikšmės gali būti supaprastintos dėl vadinamojo mišraus pikselio efekto.

MODIS duomenų stiprybė slypi ne detalume, o atnaujinimo dažnyje ir aprėptyje. Šio palydovo duomenys gaunami kas 1–2 dienas, todėl yra itin tinkami trumpalaikių procesų stebėsenai – pavyzdžiui, sezoniškumo ciklą, fenologinių pokyčių, ilgalaikių klimato kaitos tendencijų ar net stambių gaisrų poveikio įvertinimui. Reguliarus atsinaujinimas leidžia sudaryti tankias laiko eiles, iš kurių galima išvesti vegetacijos produktyvumo rodiklius ar net numatyti būsimą vegetacijos būklę, taikant prognozinčius modelius.

MODIS duomenų žemėlapyje vizualinis informatyvumas yra mažesnis, tačiau jų nauda atsiskleidžia nacionalinio ar regioninio masto tyrimuose, kai reikalingas greitas ir periodinis vegetacijos būklės įvertinimas visoje Lietuvoje ar plačiame regione. Šis duomenų šaltinis taip pat puikiai tinka fono informacijos pateikimui, kai analizė grindžiama kelių duomenų šaltinių integracija.

Apibendrinant, *MODIS* duomenimis pagrįstas *NVI* žemėlapis nėra tinkamas lokaliai miškų būklės vertinimui Švenčionių rajone, tačiau jo privalumai išryškėja žvelgiant į didesnę mastelį ir siekiant stebėti miškų dinamiką laike. *MODIS* turėtų būti laikomas papildomu informaciniu sluoksniu, kuris geriausiai veikia kaip konteksto kūrimo priemonė kartu su aukštesnės raiškos *Sentinel-2* ar *Landsat* duomenimis.

4.2.1 Apibendrinimas

NVI analizė išryškino skirtingų palydovinių sistemų gebėjimą vertinti augalijos būklės skirtumus ir struktūrinius pokyčius. *Sentinel-2* *NVI* žemėlapis pasižymėjo aukštu vizualiniu kontrastu ir leido atskleisti net subtilius vegetacijos vandeningumo skirtumus, svarbius detalizuotam ekologiniam vertinimui. *Landsat* *NVI* duomenys suteikė apibendrintą, tačiau stabilią informaciją apie augalijos pasiskirstymą, naudotą miškų sveikatingumo zonų identifikavimui. *MODIS* duomenys leido stebėti stambaus masto vegetacijos vandeningumo pokyčius, ypač naudingus ilgalaikėse aplinkos analizėse. *NVI* indekso taikymas kartu su laiko eilučių normalizavimu sudarė galimybes atlikti veiksmingą miškų būklės vertinimą tiek lokaliu, tiek regioniniu mastu. Šie skirtingi taikymo aspektai išsamiai apibendrinti 4.2 lentelėje, kurioje pateiktas skirtingų palydovų *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS* tinkamumo įvertinimas *NVI* analizėje (žr. 4.2 lentelę).

4.2 lentelė. Skirtingų palydovų (*Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*) taikymo tinkamumo įvertinimas *NVI* analizėje

Palydovas	Erdvinė raiška (m)	NVI reikšmių intervalas	Tinkamumas
<i>Sentinel-2</i>	10	–0,161 – 0,697	Dėl aukštos raiškos puikiai tinka detaliam miško būklės vertinimui – leidžia atskleisti degradacijos židinius, išretėjimo zonas ir pavienių kvartalų būklę.
<i>Landsat</i>	30	–0,221 – 0,345	Tinka bendriems pokyčiams vertinti – fiksuoja stambesnius struktūrinius skirtumus, tačiau mažesni objektai susilieja. Ypač vertingi ilgalaikiai kaitos analizei.
<i>MODIS</i>	250	–0,346 – 0,481	Duomenys naudingi nacionaliniu ar kontinentiniu mastu, leidžia sekti augalijos būklės tendencijas ir sezoniskumą, tačiau netinkami lokaliai miško struktūrai analizuoti.

4.2.2 Išvada

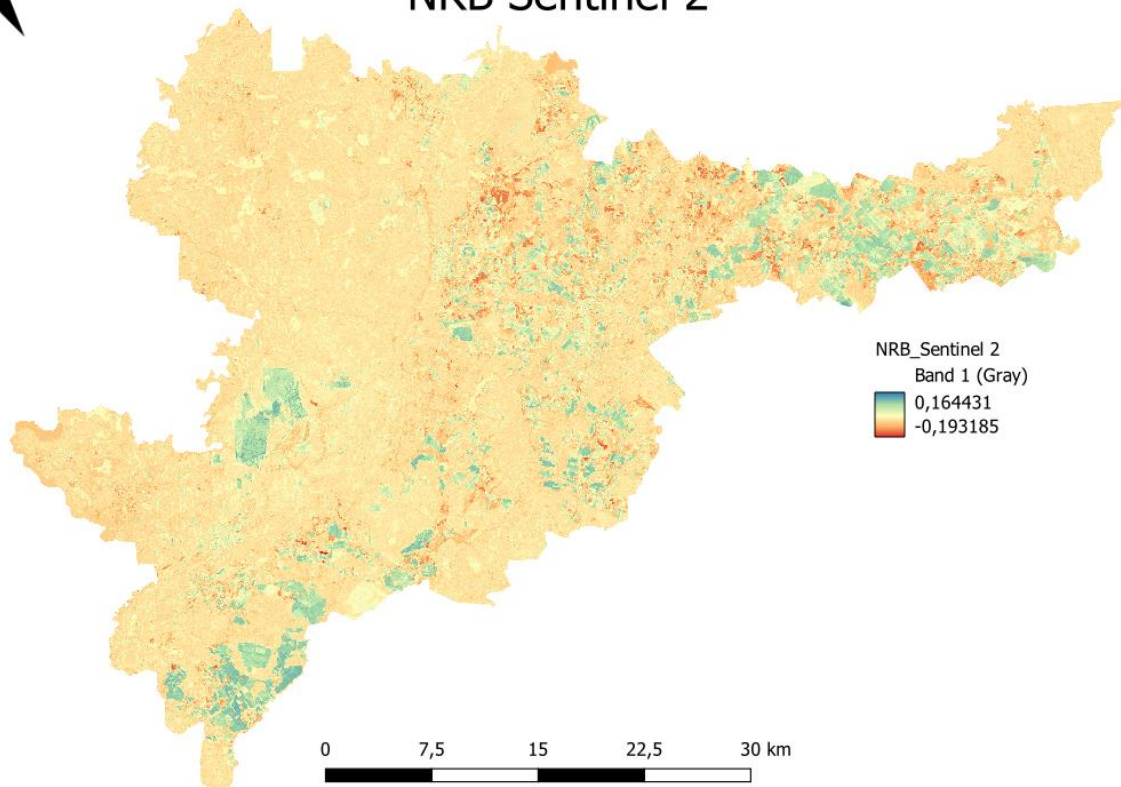
Atlikta palyginamoji *NVI* analizė parodė, kad palydovinių duomenų pasirinkimas tiesiogiai lemia galimybę vertinti augmenijos vandeningumo ir sveikatingumo pokyčius. *Sentinel-2* duomenys ypač naudingi tiriant miško pakraščius ar lokalius pažeidimų taškus. Tuo tarpu *Landsat* suteikia galimybę sekti pokyčius laiko eilučių analizėje, o *MODIS* pasižymi dideliu laikinio dažnumo privalumu, tinkančiu apžvalginei ir sezoninei stebėsenai. Tinkamiausias sprendimas pasiekiamas šiuos šaltinius derinant, ypač kai norima įvertinti pokyčius tiek trumpuoju, tiek ilguoju laikotarpiu.

4.3 NRB RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ

Sentinel-2 palydovo duomenimis sukurtas *NRB* žemėlapis išsiskiria ne tik didele raiška, bet ir aiškiu spektriniu kontrastu tarp pažeistų ir nepažeistų teritorijų. Erdvinė raiška, siekianti 10 metrų, leidžia tiksliai identifikuoti net ir nedidelius miško pokyčių plotus, kas yra ypač svarbu stebint degradacijos procesus ar natūralaus atsikūrimo eigą. Tokiu masteliu galima aptikti ne tik didesnius gaisrų ar kirtimų plotus, bet ir mažesnius židinius, kurie dažnai lieka nepastebėti naudojant žemesnės raiškos duomenis (žr. 4.7 pav.).



NRB Sentinel 2



4.7 pav. *NRB* reikšmės pagal *Sentinel–2* duomenis Švenčionių rajone.

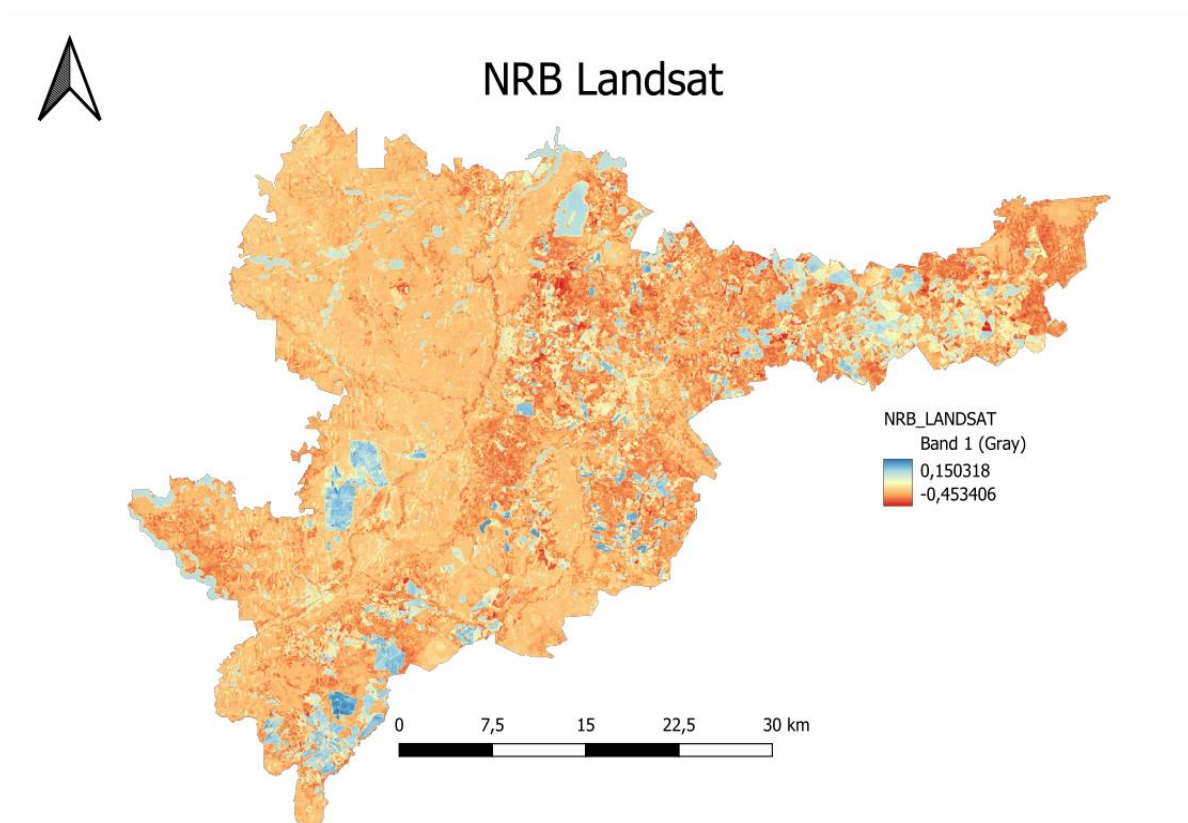
NRB indekso reikšmės *Sentinel–2* duomenyse svyruoja nuo $-0,193$ iki $0,164$, o tai leidžia išskirti tiek neigiamą pokyčių dinamiką (vegetacijos nykimą ar žuvimą), tiek teigiamus procesus, tokius kaip natūralus atsinaujinimas arba miško būklės gerėjimas. Neigiamos reikšmės žemėlapyje pavaizduotos raudonais ir oranžiniais atspalviais. Šie atspalviai vyrauja šiaurės rytinėje ir pietinėje Švenčionių rajono dalyse, kur pagal kitus vegetacijos indeksus taip pat buvo identifikuoti reikšmingi pokyčiai. Tikėtina, jog šiose teritorijose vyko intensyvūs plynieji kirtimai arba miško degradaciją paskatino gamtiniai veiksniai, tokie kaip sausra ar ligų protrūkiai.

Teigiamos reikšmės, atspindinčios mažesnių pokyčių intensyvumą arba net regeneraciją, žymimos gelsvai žaliomis bei melsvomis spalvomis. Šios zonos išsidėsto daugiausia pietrytiniuose ir centriniuose rajono plotuose, kuriose vizualiai fiksuojamas stabilus ar atsikuriantis miško dangos sluoksnis. Dėl aukštos spektrinės raiškos *Sentinel–2* leidžia įvertinti ir pereinamąsias būsenas, kai vegetacija dar nėra visiškai atsikūrusi, tačiau jau pastebimi pozityvūs atspindžio pokyčiai, rodomi šviesesnėmis gelsvomis ar žalsvomis spalvomis.

Be to, *Sentinel–2* duomenimis grįstas *NRB* žemėlapis leidžia tiksliai išskirti teritorijų pakraščius, kur vegetacijos pokyčiai dažniausiai prasideda pirmiausia. Šie „perėjimo kraštai“ yra ypač svarbūs, nes jie dažnai tampa indikacinėmis zonomis, rodančiomis gilesnius struktūrinius pokyčius miške. Detaliame *Sentinel–2* žemėlapyje galima identifikuoti net siaurus plynių ruožus ir

fragmentacijos zonas, kurios kitais palydoviniais duomenimis dažnai būna apibendrintos ir neatvaizduojamos.

Atsižvelgiant į visus šiuos aspektus, *Sentinel-2* palydovas su savo aukšta erdvine raiška ir plačia spektrinių verčių amplitude yra vienas iš efektyviausių įrankių tiksliai ir išsamiai miškų pokyčių stebėjimui naudojant *NRB* indeksą. Jo gebėjimas diferencijuoti net menkiausius spektrinius pokyčius vegetacijoje daro jį itin naudingą ne tik mokslo tyrimuose, bet ir praktiniam miškų tvarkymui, gaisrų poveikio analizei ar planuojant atkūrimo priemones.



4.8 pav. *NRB* reikšmės pagal *Landsat* duomenis Švenčionių rajone.

Landsat duomenimis pagrįstas *NRB* žemėlapis yra svarbus kompromisas tarp erdvinės raiškos, duomenų prieinamumo ir analizės tikslumo. Nors šio palydovo raiška siekia 30 metrų ir yra tris kartus mažesnė nei *Sentinel-2*, *Landsat* vis tiek leidžia atlikti pakankamai tikslią teritorinę analizę, ypač kai tiriama vidutinio ar stambesnio masto pokyčių dinamika. Vienas iš pagrindinių *Landsat* privalumų yra ilgalaikis duomenų archyvas, leidžiantis atlikti retrospektyvinius tyrimus bei identifikuoti miškų kaitos tendencijas per kelis dešimtmečius (žr. 4.8 pav.).

NRB reikšmių intervalas, kuris *Landsat* duomenyse svyruoja nuo $-0,453$ iki $0,150$, leidžia identifikuoti platų pokyčių spektrą – nuo intensyvių neigiamų pokyčių (didelio masto kirtimai, gaisrai, sausros poveikis) iki teigiamų procesų, susijusių su vegetacijos regeneracija ar natūraliu

miško atsinaujinimu. Ši plati reikšmių gama rodo, kad *Landsat* geba reaguoti į reikšmingus pokyčius vegetacijos struktūroje ir biomasėje, net jei smulkesni skirtumai kartais lieka neišryškinti.

Analizuojant žemėlapi vizualiai, matyti, jog dominuoja oranžinės, raudonos bei rusvos spalvos, kurios rodo teritorijas, kuriose fiksuojami reikšmingi augalijos pažeidimai. Šios spalvos labiausiai koncentruotos rytinėje, pietinėje ir šiek tiek centrinėje Švenčionių rajono dalyse, kur galimai vyko intensyvūs plynieji kirtimai ar natūralių miškų transformacija į kitas naudmenas. Kai kur šios zonos gali būti susijusios ir su miško gaisrų padariniais ar vėjavartomis. Šios sritys vizualiai ryškios, todėl leidžia gana lengvai lokalizuoti problemines vietas, net jei detalai išskirti smulkesnius pakitimus šiek tiek sunkiau nei *Sentinel-2* atveju.

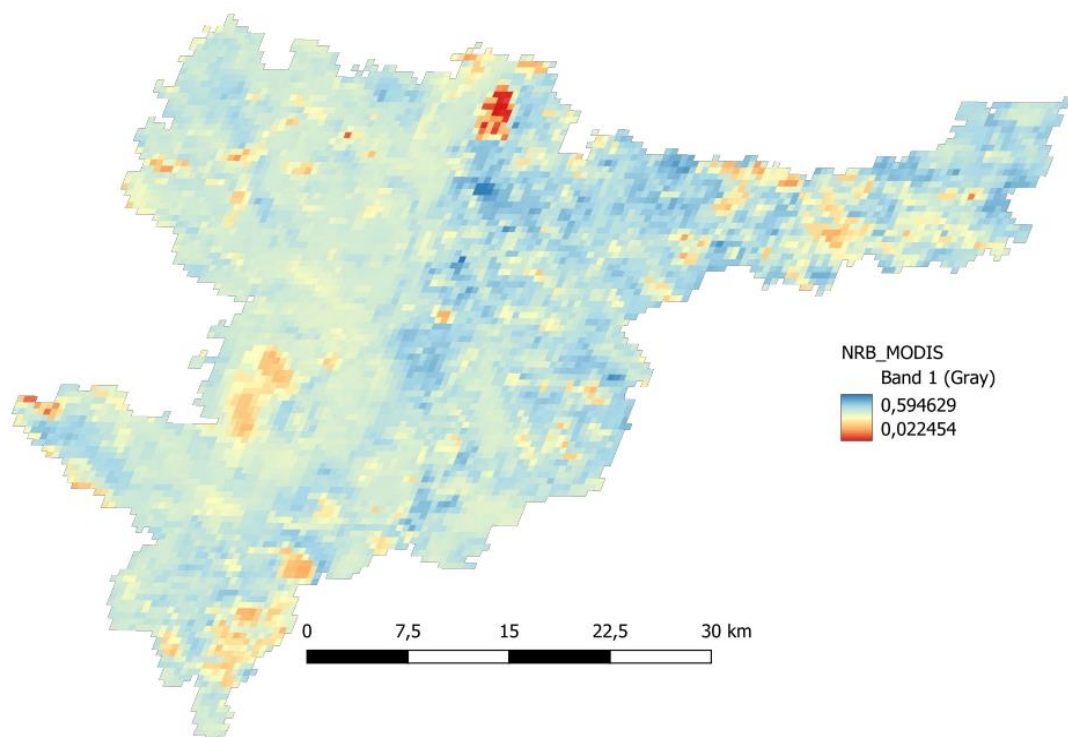
Mėlynos bei žalsvos zonos, kurios rodo teigiamas *NRB* reikšmes, *Landsat* žemėlapyje išsidėsto netolygiai ir yra pastebimos daugiausia mažų, izoliuotų plotų pavidalu. Tokios sritys dažnai atitinka teritorijas, kuriose vegetacija sugrįžta arba atsikuria po anksčiau įvykusių sutrikimų. Tai gali būti tiek savaiminio atsinaujinimo zonos, tiek aktyviai atkurtos teritorijos, kur buvo vykdomi atsodinimo darbai. Nors šios vietos yra mažesnės apimties, jų fiksavimas leidžia įvertinti teigiamas tendencijas miškų pokyčiuose, o tai yra ne mažiau svarbu nei degradacijos židinių identifikavimas.

Nepaisant to, kad *Landsat* vizualizacijos detalumas yra mažesnis nei *Sentinel-2*, šis palydovas dėl savo patikimo kartojimosi, ilgo archyvo ir stabilių spektrinių savybių puikiai tinka pokyčių stebėsenai per ilgą laiką. Tai ypač aktualu stebint miškų kismą sezoniniu ir metiniu mastu arba analizuojant miško būklės pokyčius per dešimtmečius. Be to, dėl santykinai nedidelio duomenų apimties *Landsat* analizė yra greitesnė ir mažiau reikalaujanti skaičiavimo resursų, lyginant su *Sentinel-2*.

Apibendrinant galima teigti, kad *Landsat NRB* analizė yra tvirtas pasirinkimas regioninio masto stebėsenai, leidžiantis efektyviai identifikuoti pagrindinius pokyčių židinius ir vegetacijos dinamikos tendencijas. Nors jis nėra toks detalus kaip *Sentinel-2*, *Landsat* siūlo labai gerą pusiausvyrą tarp detalumo ir stebėjimo trukmės, o tai itin svarbu ilgalaikėse aplinkos kaitos studijose.



NRB Modis



4.9 pav. *NRB* reikšmės pagal *MODIS* duomenis Švenčionių rajone.

MODIS palydovo duomenimis pagrįstas *NRB* žemėlapis pasižymi žemiausia erdvine raiška tarp visų trijų tiriamų palydovinių sistemų – tik 250 metrų, todėl kiekvienas pikselis apima didelę plotą teritorijos. Tai reiškia, kad viename taške gali būti talpinama visa eilė skirtingos paskirties paviršių – nuo miško iki laukų ar vandens telkinių, o tai sumažina galimybę tiksliai nustatyti lokalius pokyčius. Nepaisant šio apribojimo, *MODIS* duomenų privalumas slypi jų dažname atsinaujinime – duomenys fiksuojami kas 1–2 dienas, o tai leidžia nuosekliai stebėti pokyčius laike, ypač kai svarbu fiksuoti greitus augmenijos ar paviršiaus pokyčius po gaisrų ar kitų staigių sutrikimų (žr. 4.9 pav.).

NRB reikšmės šiuo atveju svyruoja nuo 0,022 iki 0,594, o tai yra ganėtinai aukštos vertės, palyginus su kitais palydovais. Taip gali būti todėl, kad dėl mažesnio detalumo intensyvesnėse vegetacijos zonose arba po sutrikimų (pvz., gaisrų) atspindėta spinduliuotė tampa suvidurkinta per didelį plotą, dėl ko reikšmės pasiekia didesnes amplitudes. Šiame žemėlapyje stebimos kelios išskirtinės zonos – pavyzdžiui, šiaurės rytinėje teritorijos dalyje aiškiai matomas raudonas plotas, kuris gali būti susijęs su paviršiaus nudegimu, augalijos sunaikinimu ar smarkia sausra. Vis dėlto dėl riboto detalumo negalima tiksliai lokalizuoti šių židinių ar išskirti, ar jie susiję su natūraliais procesais, ar su antropogeniniu poveikiu, tokiu kaip kirtimai ar rekreacinis naudojimas.

Daug didesnę teritorijos plotą dengia žalsvai melsvos zonos, kurios, kaip galima interpretuoti, rodo vidutinio intensyvumo pokyčius arba atspindi natūralų, bet nekritinį vegetacijos būklės

sumažėjimą. Šios spalvos plačiai paplitusios visame Švenčionių rajone, ypač pietvakariuose ir centrinėje dalyje. Tačiau vertėtų atkreipti dėmesį, kad dėl tokio mastelio žemėlapis neatspindi nei miško pakraščio degradacijos, nei mažesnių plynių kirtimų, todėl vietose, kur vyksta smulkūs, bet svarbūs ekologiniai procesai, *MODIS NRB* indeksas gali būti neinformatyvus arba net klaidinantis.

MODIS žemėlapio vizualizacija taip pat leidžia pamatyti makrolygio dėsninumus – pavyzdžiui, ar tam tikros klimato juostos ar topografiniai elementai veikia miškų pokyčius regione. Tokia analizė gali būti naudinga aplinkosaugos politikos formuotojams, siekiant planuoti regionines ar nacionalines prevencines priemones prieš didelio masto sutrikimus, ypač susijusius su klimato kaita, gaisrų pavojumi ar miškų fragmentacija.

Taigi, nors *MODIS* duomenų naudojimas detaliems miškų tyrimams yra ribotas, jų privalumai išryškėja atliekant periodinę stebėseną, apimančią visą šalį ar net žemynus. Dėl jų aukštos laikinės raiškos ir nuolatinio atsinaujinimo jie puikiai tinka apžvelgti ilgalaikes tendencijas, įvertinti sezoniškumo poveikį vegetacijai ar lyginti skirtingų metų ekstremalių reiškinių poveikį. Vis dėlto, siekiant tikslumo lokaliuose tyrimuose ar formuojant miškų atkūrimo ir apsaugos strategijas rajono ar seniūnijos lygmeniu, šie duomenys turėtų būti naudojami tik kaip papildoma foninė informacija, integruojama kartu su *Sentinel–2* ar *Landsat* duomenimis.

4.3.1 Apibendrinimas

NRB analizė pabrėžė kiekvieno palydovo pritaikomumą degradacijos procesų tyrimui. *Sentinel–2* duomenys ypač efektyviai išskyrė nedidelius gaisrų ir kirtimų židinius, leidžiant identifikuoti konkrečias pažeistas zonas. *Landsat* indeksai, nors ir ne tokie detalūs, parodė aiškias ilgalaikes gaisrų ir žmogaus veiklos poveikio tendencijas. *MODIS* duomenys, dėl savo didelės aprėpties ir nuolatinio atsinaujinimo, pasižymėjo gebėjimu atspindėti didelių gaisrų regioninį mastą bei jų poveikį laike. Šie rezultatai išsamiai pateikiami 4.3 lentelėje, kurioje įvertintas skirtingų palydovų *Sentinel–2*, *Landsat*, *MODIS* taikymo tinkamumas *NRB* analizėje (žr. 4.3 lentelę). *NRB* indeksas pasirodė itin tinkamas kompleksinei degradacijos analizei, kai svarbu įvertinti tiek staigius, tiek ilgalaikius augmenijos pokyčius.

4.3 lentelė. Skirtingų palydovų (*Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*) taikymo tinkamumo įvertinimas *NRB* analizėje

Palydovas	Erdvinė raiška (m)	<i>NRB</i> reikšmių intervalas	Tinkamumas
<i>Sentinel-2</i>	10	–0,193–0,164	Itin detalus, tinkamas lokaliai analizei, tiksliai degradacijos židinių identifikavimui.
<i>Landsat</i>	30	–0,453–0,150	Vidutinio detalumo, gerai atspindi degradacijos mastą ir gali būti naudojamas ilgalaikiams vertinimams.
<i>MODIS</i>	250	0,022–0,594	Mažos raiškos, tinkamas stambaus masto pokyčių ir sezoniškumo tendencijų analizėms.

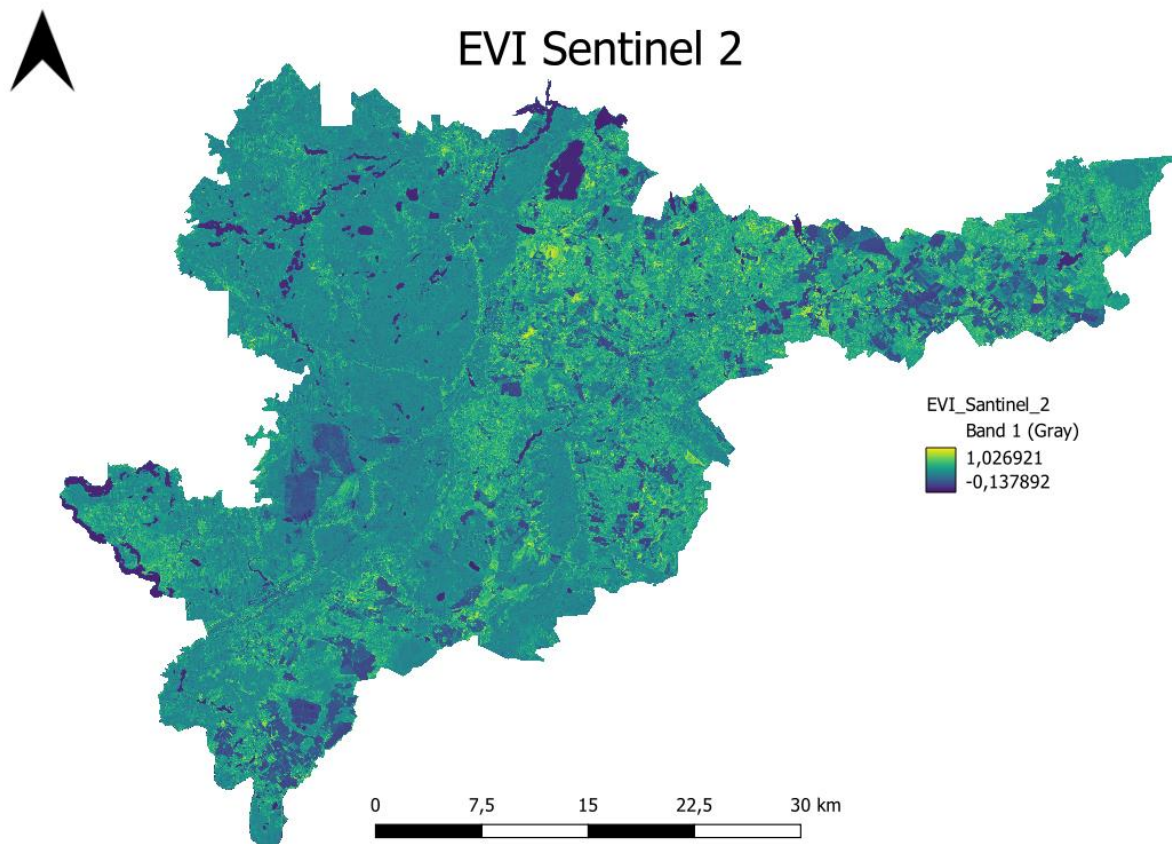
4.3.2 Išvada

NRB indeksas leido efektyviai identifikuoti tiek gaisrų, tiek kitų degradacijos veiksnių paveiktas teritorijas. *Sentinel-2* pasirodė esąs itin tikslus nustatant lokalizuotus pažeidimų taškus, tuo tarpu *Landsat* duomenys gerai tiko platesnių degradacijos zonų identifikavimui ir retrospektyviai analizei. *MODIS*, dėl plataus aprėpimo ir dažnų duomenų atnaujinimų, pasižymėjo dideliu efektyvumu stebint stambius įvykius, pavyzdžiui, regioninius gaisrus. Ši analizė patvirtino, kad *NRB* indeksas geriausiai funkcionuoja, kai taikomi skirtingų palydovų duomenys, atsižvelgiant į teritorijos mastelį ir tyrimo tikslus.

4.4 *EVI* RODIKLIO LYGINAMOJI ANALIZĖ

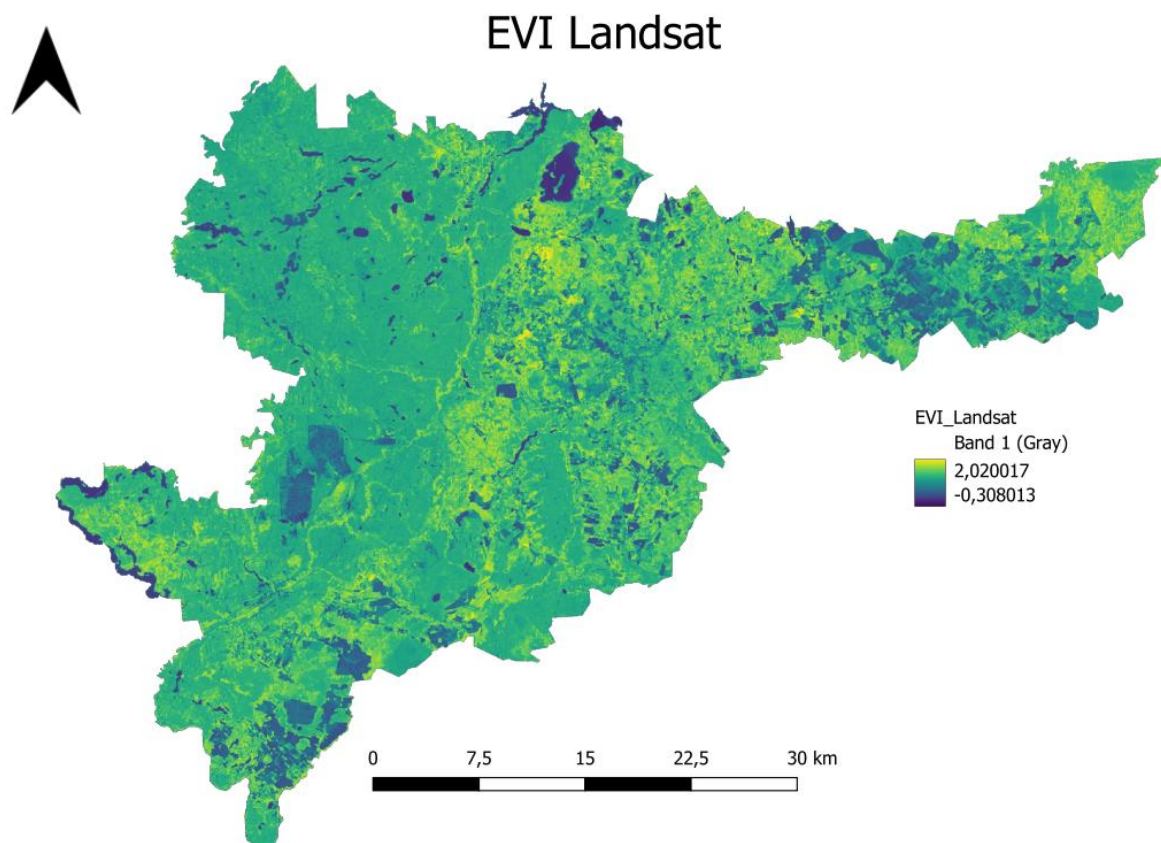
Sentinel-2 palydovo duomenimis apskaičiuotas *EVI* žemėlapis pasižymi didele raiška (10 metrų), leidžiančia ypač tiksliai vertinti miško dangos pokyčius net ir mažo mastelio teritorijose. Vizualiai žemėlapyje išryškėja tankesnė ir sveikesnė augmenija, pažymėta žalsvais bei geltonais tonais, kurie koncentruojasi centrinėje ir pietrytinėje Švenčionių rajono dalyse. Šios zonos rodo aukštą vegetacijos aktyvumą ir gerą augalijos būklę. Tuo tarpu purpuriniai ir tamsiai mėlyni atspalviai žymi mažesnes *EVI* reikšmes, kurios dažniausiai sutampa su žemės ūkio naudmenomis, keliais, apleistomis teritorijomis ar kitais antropogeninio poveikio plotais. Šie plotai ryškiai matomi rytinėje ir šiaurinėje rajono dalyse. *Sentinel-2* *EVI* reikšmių intervalas svyruoja nuo –0,137 iki 1,027, kas leidžia tiksliai identifikuoti visą augmenijos būklės spektrą – nuo vegetacijos stokos iki maksimalios augimo fazės. Dėl savo spektrinės raiškos ir jautrumo raudonosios šviesos bei *NIR* (artimojo

infraraudonojo) bangų sąveikai su augmenija, šis indeksas ypač tiksliai atskleidžia augalijos struktūrinius skirtumus, mažina foninį triukšmą bei pagerina augalijos intensyvumo įvertinimą tankiai apželdintose teritorijose (žr. 4.10 pav.).



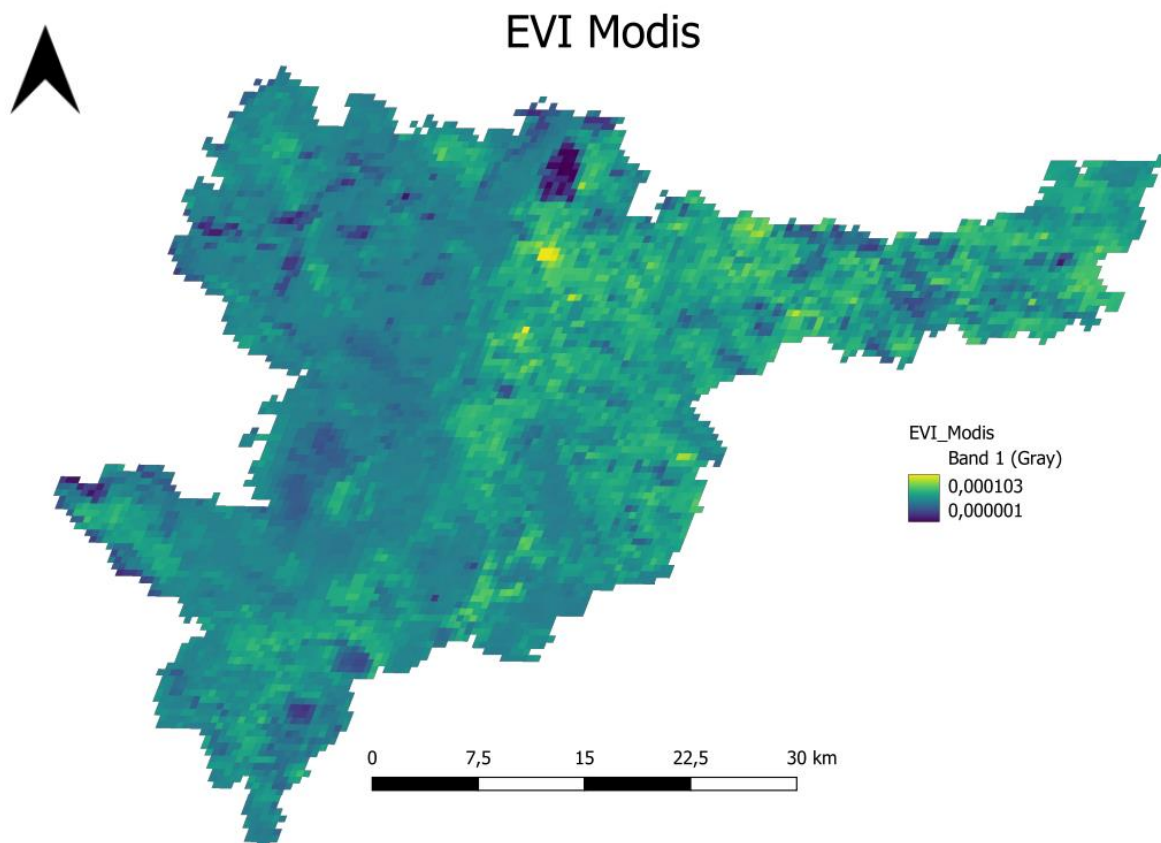
4.10 pav. EVI reikšmės pagal *Sentinel*–2 duomenis Švenčionių rajone.

Landsat palydovo EVI žemėlapis, kurio erdvinė raiška siekia 30 metrų, pateikia šiek tiek apibendrintą, bet vis dar gana išsamų vegetacijos būklės vaizdą. Žemėlapyje matyti aiškiai išskiriamos miškingos teritorijos – jos vizualizuojamos žalsvai geltonomis spalvomis, kurios rodo aukštas EVI reikšmes. Šios sritys išsidėsto daugiausia vakarinėje ir pietinėje rajono dalyse (žr. 4.11 pav.). Tamsesnės zonos, žymimos mėlynais ir violetiniais atspalviais, rodo mažesnę augalijos tankį ar aktyvumą, kuris dažniausiai sutampa su miestų, kelių ar žemės ūkio plotais. EVI reikšmės pagal *Landsat* duomenis varijuoja nuo $-0,308$ iki $2,020$, o tai rodo labai platų spektrą nuo intensyvios vegetacijos stokos iki labai aukšto vegetacijos intensyvumo. Nors kai kurios reikšmės atrodo labai aukštos, jos gali būti nulemtos pikselių, kuriuose fiksuojama tanki, drėgna augmenija (pvz., pelkėti miškai ar šlapžemės), tačiau dalį šių anomalijų reikėtų vertinti kritiškai – galimos ir spektrinės paklaidos dėl atmosferinių reiškinių ar šešėlių. Nepaisant to, *Landsat* leidžia pakankamai gerai išskirti pagrindines augalijos struktūros zonas ir identifikuoti bendras būklės tendencijas.



4.11 pav. *EVI* reikšmės pagal *Landsat* duomenis Švenčionių rajone.

MODIS EVI žemėlapis, sukurtas naudojant duomenis su 250 metrų erdvine raiška, vizualiai yra labiau apibendrintas ir stokoja detalaus teritorinio skaidrumo. Nepaisant to, šis palydovas leidžia įžvelgti didelio masto vegetacijos pasiskirstymo tendencijas (žr. 4.12 pav.). Šviesesni žalsvai geltoni tonai atspindi aukštesnes *EVI* reikšmes ir išsidėsto centrinėje bei rytinėje Švenčionių rajono dalyse, kur vyrauja miškingos teritorijos. Tuo tarpu tamsesni mėlyni ir violetiniai atspalviai nurodo mažesnio vegetacijos intensyvumo zonas, daugiausia pietinėje ir šiaurės vakarinėje dalyse. *MODIS EVI* reikšmių intervalas svyruoja tarp 0,000001 ir 0,000103 – reikšmės yra mažesnės nei kitų palydovų, nes šie duomenys dažnai pateikiami normalizuoti ir reikia atlikti papildomą perskaičiavimą, taikant mastelio koeficientą. Nepaisant šių apribojimų, *MODIS EVI* duomenys vertingi vertinant sezoninius vegetacijos svyravimus, ypač dėl jų labai dažno atsinaujinimo (kas 1–2 dienas). Tai leidžia stebėti augmenijos reakciją į staigius aplinkos pokyčius (pvz., sausras, gaisrus ar audras) beveik realiu laiku.



4.12 pav. *EVI* reikšmės pagal *MODIS* duomenis Švenčionių rajone.

4.4.1 Apibendrinimas

EVI analizė atskleidė, kad *Sentinel-2* duomenys geriausiai tinka tankios ir sveikos augmenijos diferencijavimui, leidžiant išryškinti skirtingus struktūrinius lygmenis net mišriuose miškuose. *Landsat* duomenys padėjo vizualizuoti pagrindinius miško struktūros pokyčius didesniu masteliu, nors kai kurios detalės išliko supaprastintos. *MODIS* duomenys, turintys plačią aprėptį, tačiau žemą detalumą, puikiai pasitarnavo kaip foninis sluoksnis analizuojant sezoninius vegetacijos pokyčius. *EVI* indeksas pasižymi didesniu jautrumu tankiai augmenijai ir mažesniu foninio triukšmo poveikiu, todėl jis yra vertingas vertinant miškų sveikatingumą tiek lokaliu, tiek regioniniu lygmeniu. Šie aspektai aiškiai išskleisti 4.4 lentelėje, kur pateikiamas skirtingų palydovų *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS* taikymo tinkamumo įvertinimas *EVI* analizėje (žr. 4.4 lentelę).

4.4 lentelė. Skirtingų palydovų (*Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*) taikymo tinkamumo įvertinimas EVI analizėje.

Palydovas	Erdvinė raiška (m)	EVI reikšmių intervalas	Tinkamumas
<i>Sentinel-2</i>	10	–0,137–1,027	Itin detalus, tikslus augmenijos pokyčių vertinimas mažo mastelio teritorijose.
<i>Landsat</i>	30	–0,308–2,020	Geras kompromisas tarp detalumo ir retrospektyvumo, tinkamas regioninei analizei.
<i>MODIS</i>	250	0,000001–0,000103	Puikiai tinka sezoniškumo ir plačios apimties pokyčių stebėsenai nacionaliniu mastu.

4.4.2 Išvada

EVI analizė atskleidė skirtingų palydovų gebėjimus fiksuoti augalijos būklės skirtumus. *Sentinel-2* duomenys išsiskyrė jautrumu intensyviai vegetacijai, todėl buvo idealūs vertinant sveikos augmenijos pasiskirstymą. *Landsat* duomenys leido įvertinti vidutinio mastelio augmenijos struktūrą ir pokyčius per laiką, ypač naudingus miškų tvarkymo retrospektyvai. *MODIS* duomenys, nors ir mažos raiškos, išsiskyrė galimybe fiksuoti sezoninius pokyčius ir šiluminius svyravimus, taip papildydami analizę makrolygiu. Tokia trijų duomenų integracija leidžia užtikrinti visapusišką miško būklės stebėseną – nuo smulkių detalių iki plataus masto ekosisteminių tendencijų.

5 Vegetacijos būklės klasifikavimo rezultatų palyginimas pagal *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI* indeksus (*Sentinel-2* duomenys)

Atlikus keturių vegetacijos indeksų analizę pagal *Sentinel-2* palydovinius duomenis, buvo nustatytas miškų būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone 2024 metų gegužės mėnesį.

Vegetacijos būklės klasifikavimas atliktas tik naudojant *Sentinel-2* duomenis, nes šis palydovas pasižymi aukščiausia erdvine raiška (10 m) tarp naudojamų sistemų, todėl leidžia tiksliausiai identifikuoti smulkius pokyčius miško struktūroje, plynuosius kirtimus, pakraščius, regeneracijos židinius ir kitas detales. Būtent dėl šios priežasties, būklės klasifikavimo palyginimui pasirinktas tik *Sentinel-2*, nes tai užtikrina aukštą rezultatų tikslumą ir detalumą.

Analizuojama teritorija – Švenčionių rajonas, kurio bendras plotas siekia 1690,30 km². Lentelėse pateiktas kiekvienos vegetacijos būklės klasės pikselių skaičius, atitinkamas plotas kvadratiniais kilometrais bei procentinė išraiška nuo viso rajono ploto. Šie duomenys leidžia lyginti, kaip skirtingi indeksai – *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI* – vertina tą pačią teritoriją, ir kaip jų jautrumas veikia rezultatų interpretavimą.

NDVI analizės rezultatai parodė, kad sveikos vegetacijos plotas sudarė 433,55 km² (25,67 % viso Švenčionių rajono ploto), vidutinės – 1 107,72 km² (65,58 %), o silpnos arba pažeistos vegetacijos – 149,03 km² (8,82 %). Šis indeksas, pagrįstas raudonos ir artimosios infraraudonosios šviesos palyginimu, puikiai atskleidė fotosintezės aktyvumą bei augmenijos tankumą.

5.1 lentelė. Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal *NDVI* indeksą.

Kategorija	Pikselių skaičius	Plotas (km ²)	% nuo Švenčionių r. ploto
Sveika vegetacija	4 335 473	433.55	25.67 %
Vidutinė vegetacija	11 077 150	1 107.72	65.58 %
Silpna vegetacija	1 490 308	149.03	8.82 %
Iš viso	16 902 931	1 690.30	100.00 %

NVI indeksas, kuris normalizuoja vegetacijos reikšmes į bendrą skalę ir leidžia geriau suprasti augmenijos sveikatingumą bei drėgmės pokyčius, pateikė labai panašius rezultatus: sveika vegetacija užėmė 433,24 km² (24,90 %), vidutinė – 1 107,94 km² (63,67 %), o silpna – 148,79 km² (8,55 %). Šis rodiklis ypač naudingas palyginant skirtingų metų arba regionų vegetacijos pokyčius, nes eliminuoja vertinimo subjektyvumą.

5.2 lentelė. Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal *NVI* indeksą.

Kategorija	Pikselių skaičius	Plotas (km ²)	% nuo Švenčionių r. ploto
Sveika vegetacija	4 332 393	433.24	24.90 %
Vidutinė vegetacija	11 079 375	1 107.94	63.67 %
Silpna vegetacija	1 487 907	148.79	8.55 %
Iš viso	16 899 675	1 689.97	100.00 %

NRB analizė – jautriausia gaisrų ir degradacijos pokyčiams, atskleidė žymiai kitokį rezultatų pasiskirstymą. Sveika vegetacija sudarė tik 114,91 km² (6,80 %), vidutinio pažeidimo teritorijos – 1 042,82 km² (61,71 %), o stipriai pažeista – net 532,25 km² (31,49 %). Tokie rezultatai leidžia teigti, kad *NRB* indeksas labiau orientuotas į rizikos zonų, buvusio gaisro ar miško kirtimo padarinių išryškinimą, o ne į bendrą augmenijos būklės įvertinimą.

5.3 lentelė. Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal *NRB* indeksą.

Kategorija	Pikselių skaičius	Plotas (km ²)	% nuo Švenčionių r. ploto
Sveika vegetacija	127 675	114.91	6.80 %
Vidutinė vegetacija	1 158 683	1 042.82	61.71 %
Silpna vegetacija	591 384	532.25	31.49 %
Iš viso	1 877 742	1 689.97	100 %

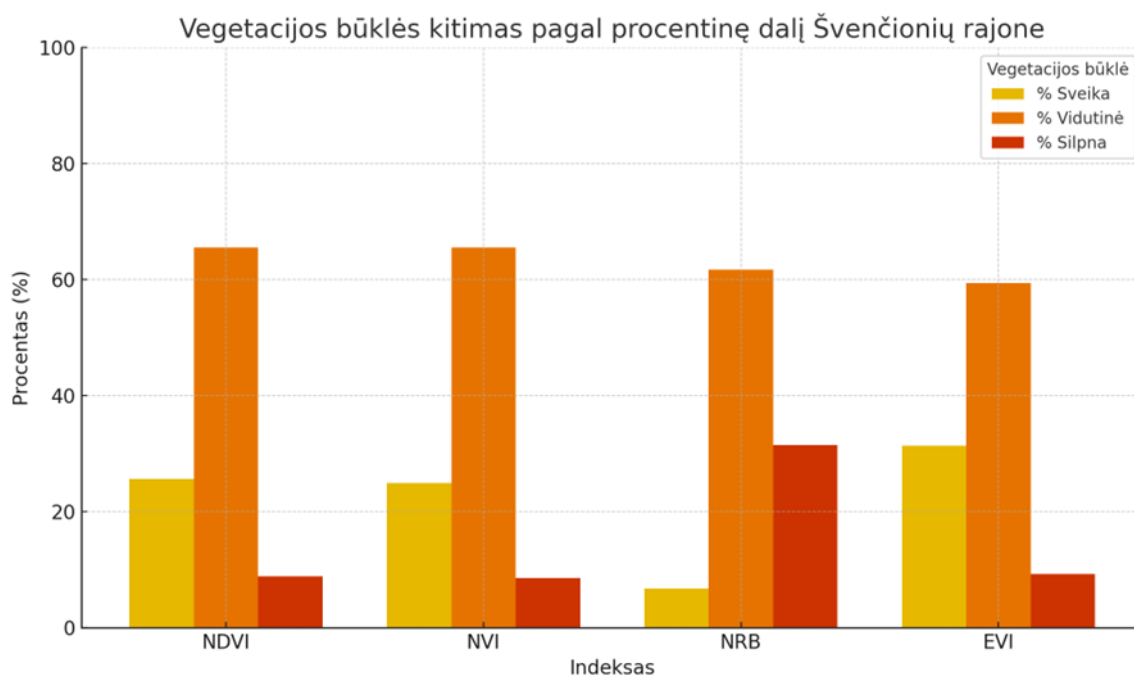
EVI analizės rezultatai pateikė kiek kitokį pasiskirstymą. Šis indeksas yra jautresnis tankiai augmenijai bei atmosferiniams trikdžiams (debesims, dulkėms), todėl sveika vegetacija sudarė 530,54 km² (31,34 %), vidutinė – 1 006,39 km² (59,44 %), o silpna – 156,13 km² (9,22 %). *EVI*, priešingai nei *NDVI*, labiau akcentuoja tankios ir produktyvios augmenijos išryškinimą, todėl tinka naudoti intensyvių miško plotų sveikatos vertinimui.

5.4 lentelė. Vegetacijos būklės pasiskirstymas Švenčionių rajone pagal *EVI* indeksą.

Kategorija	Pikselių skaičius	Plotas (km ²)	% nuo Švenčionių r. ploto
Sveika vegetacija	589 484	530.54	31.34 %
Vidutinė vegetacija	1 118 213	1006.39	59.44 %
Silpna vegetacija	173 477	156.13	9.22 %
Iš viso	1 881 174	1693.06	100 %

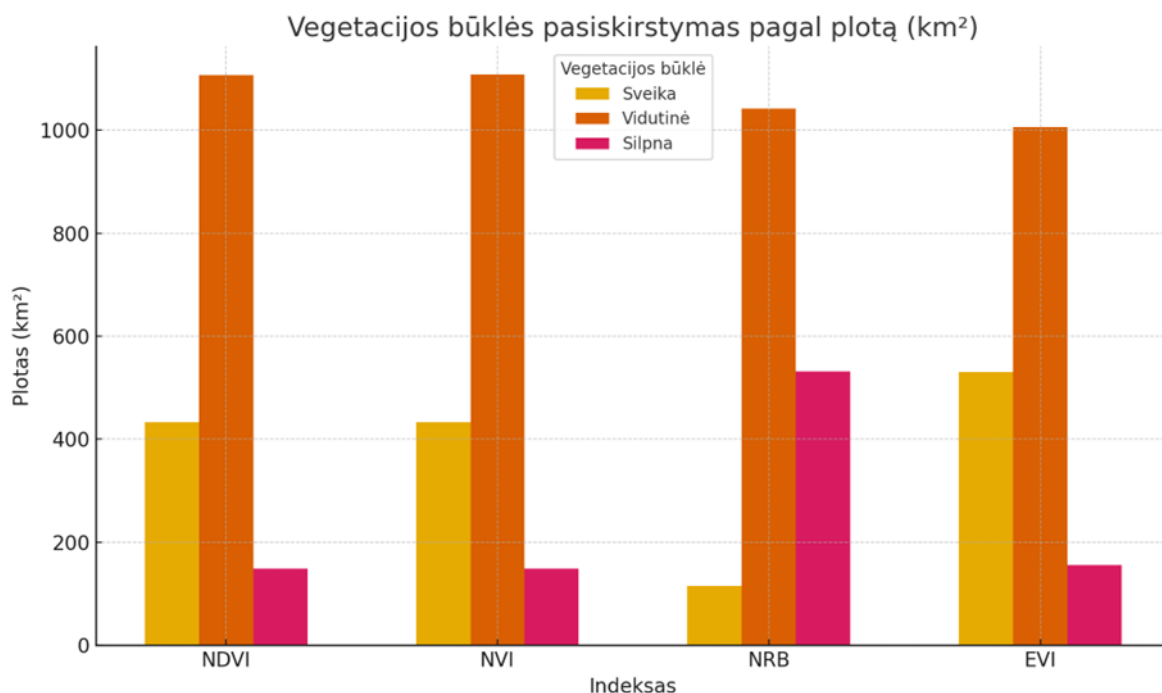
Papildomai atlikta agreguota statistinė analizė, lyginant vegetacijos būklės pasiskirstymą pagal plotą kvadratiniais kilometrais ir kitimą pagal procentinę išraišką. Žemiau pateikti du stulpeliniai grafikai leidžia aiškiai palyginti, kaip *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI* indeksai pasiskirsto sveikos, vidutinės ir silpnos vegetacijos klasėse. Šie duomenys padeda vizualiai įvertinti skirtingų indeksų jautrumą vegetacijos pokyčiams bei gebėjimą išskirti skirtingas būklės zonas.

Pirmasis grafikas iliustruoja vegetacijos būklės procentinį kitimą, kuris aiškiai rodo, kad *NDVI* ir *NVI* indeksai pateikia beveik identišką rezultatą, o *NRB* pasižymi stipriu jautrumu pažeistoms teritorijoms. Tuo tarpu *EVI* rodo didžiausią sveikos vegetacijos procentinę dalį, atskleidžiamas šio indekso jautrumą produktyvioms, tankioms vegetacijos struktūroms.



5.1 pav. Vegetacijos būklės pasiskirstymas pagal procentinę dalį Švenčionių rajone.

Antrasis grafikas vaizduoja faktinį pasiskirstymą pagal plotą km². Kaip matyti, *EVI* indeksas identifikavo didžiausią sveikos vegetacijos plotą (530,54 km²), tuo tarpu *NRB* – mažiausią (114,91 km²). Vidutinės būklės teritorijų pasiskirstymas išlieka aukščiausias visuose indeksuose, tačiau didžiausias išsiskyrimas stebimas *NRB* indekse, kuriame pažeista vegetacija sudaro daugiau kaip 500 km².



5.2 pav. Vegetacijos būklės pasiskirstymas pagal plotą Švenčionių rajone.

Šie vizualiniai duomenys patvirtina, kad vegetacijos indeksai gali pasižymėti skirtingu jautrumu ir turėtų būti pasirenkami priklausomai nuo tyrimo tikslo – *NDVI* ir *NVI* tinkami bendram vertinimui, *NRB* – gaisrų ar pažeidimų stebėsenai, o *EVI* – tankios augmenijos analizei.

5.1.1 Apibendrinimas

Galima teigti, kad *NDVI* ir *NVI* indeksai pateikia labai artimus rezultatus ir yra tinkami bendros miškų būklės vertinimui, *EVI* išryškina tankią ir produktyvią vegetaciją, o *NRB* indeksas aiškiai identifikuoja pažeistas ir degradavusias zonas. Didžiausias skirtumas tarp indeksų pasireiškė sveikos vegetacijos plotų vertinime – *NRB* identifikavo tik 6,8 % sveikos dangos, kai tuo tarpu *EVI* rodė net 31,34 %. Tokie skirtumai parodo, kad skirtingi indeksai gali papildyti vienas kitą ir, naudojami kartu, sudaro išsamų ir kompleksinį miško dangos vertinimo modelį.

5.1.2 Išvada

Atlikta analizė parodė, kad vegetacijos būklės vertinimui *Sentinel-2* palydovo duomenys yra ypač tinkami dėl savo aukštos 10 m erdvinės raiškos, leidžiančios tiksliai fiksuoti net smulkius struktūrinius pokyčius miško dangoje. Palyginus keturių skirtingų indeksų (*NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI*) rezultatus, paaiškėjo, kad kiekvienas iš jų skirtingai atspindi miškų būklę:

- *NDVI* ir *NVI* indeksai pateikia artimus rezultatus, patikimai įvertindami bendrą augalijos gyvybingumą, su aiškiai išreikštomis sveikos ir vidutinės būklės zonomis.

- *NRB* indeksas išryškino didesnę pažeistų teritorijų kiekį, ypač tinkamas gaisrų ar degradacijos poveikio nustatymui.
- *EVI* indeksas dėl savo jautrumo sveikai ir tankiai vegetacijai leido tiksliau identifikuoti tankios augalijos plotus, tačiau vidutinės būklės zonos jo atveju užima didžiausią dalį, kas rodo jo polinkį į didesnę bendrą padengimo įvertinimą.

6 TYRIMO APIBENDRINIMAS

Šiame tyrime buvo siekiama įvertinti, kaip trijų skirtingų palydovinių misijų – *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* – duomenys gali būti taikomi miškų būklės analizėje remiantis 2024 m. gegužės mėnesio vaizdais. Tyrimo metu kiekvienam palydovui buvo apskaičiuoti keturi vegetacijos indeksai: *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI*. Šių indeksų analizė leido kiekybiškai įvertinti vegetacijos būklę bei vizualizuoti skirtingų palydovinių duomenų galimybes fiksuoti struktūrinius miško dangos pokyčius.

Sentinel-2 palydovo duomenys išsiskyrė detalio aprėptimi ir aukštu spektriniu jautrumu, kas leido tiksliai identifikuoti smulkias teritorijas su galimais degradacijos požymiais, regeneracijos plotais ar aktyvios augmenijos zonomis. Duomenų raiška leido suformuoti ypač išsamius ir kontrastingus teminius žemėlapius, atskleidžiančius net subtilius vegetacijos būklės niuansus.

Landsat duomenys, nors ir mažesnės raiškos, pasižymėjo patikimu vegetacijos indeksų pasiskirstymu ir suteikė galimybę įvertinti bendrus miško dangos būklės bruožus. Analizuojant tuo pačiu laikotarpiu gautus duomenis, išryškėjo jų tinkamumas apžvalginiam vertinimui regioniniu mastu, kai detali informacija nėra pirminis analizės tikslas, bet svarbu įvertinti bendras kraštovaizdžio tendencijas.

MODIS duomenys pasižymėjo žemiausia erdvine raiška, todėl mažiau tiko smulkių pokyčių analizei, tačiau jų pateiktas vaizdas buvo naudingas plačios teritorijos apžvalgai. Nors šio tyrimo rėmuose buvo nagrinėjami tik vieno laikotarpio duomenys, *MODIS* duomenų potencialas slypi jų dažname atsinaujinime, kuris leidžia identifikuoti sezonines tendencijas ar ekstremalius įvykius, jei būtų taikoma laiko eilučių analizė.

Vegetacijos indeksų taikymas leido įvertinti skirtingų spektrinių savybių indėlį į miškų sveikatos ir būklės analizę. *NVI* išryškino augmenijos vandeningumo skirtumus, *NRB* parodė galimus degradacijos židinius, *NDVI* atspindėjo bendrą vegetacijos aktyvumą, o *EVI* pasižymėjo didesniu jautrumu tankiai augmenijai.

Bendras analizės rezultatas rodo, kad kiekvienas palydovinis duomenų šaltinis turi savo specifinius pranašumus, priklausančius nuo tyrimo mastelio, tikslumo poreikių ir analizės pobūdžio. Taikant tik vieno laikotarpio duomenis galima ne tik palyginti skirtingų sistemų galimybes, bet ir parengti rekomendacijas tolimesniems miškų stebėsenos darbams, kuriais būtų siekiama integruoti šiuos duomenis į bendrą vertinimo sistemą.

IŠVADOS

1. *Sentinel*–2 palydovo duomenys, pasižymintys 10 metrų erdvine raiška ir plačiu spektrinių juostų diapazonu, užtikrina itin išsamią miškų kaitos analizę. Dėl aukštos erdvinės raiškos šie duomenys leidžia tiksliai identifikuoti smulkius pokyčius miškų struktūroje, tokius kaip miško pakraščiai, plynieji kirtimai, regeneracijos zonos ir net smulkūs antropogeniniai pažeidimai. Šie duomenys ypač tinkami regioniniu mastu, kai būtina stebėti detalias miškų kaitos dinamikas ir vertinti ekologinius procesus.
2. *Landsat* duomenys, turintys 30 metrų erdvinę raišką ir ilgametį (nuo 1972 m.) duomenų archyvą, suteikia galimybę patikimai vertinti ilgalaikes miškų kaitos tendencijas. Dėl savo istorinės duomenų sekos *Landsat* leidžia analizuoti miškų pokyčius per kelis dešimtmečius, identifikuoti klimato ar žmogaus veiklos įtaką bei vertinti bendrus miškų būklės pokyčius regioniniu mastu. Nors jų raiška yra mažesnė nei *Sentinel*–2, jie puikiai tinka ilgalaikiai stebėsenai.
3. *MODIS* duomenys, pasižymintys maža 250 metrų erdvine raiška, tačiau labai dažnu atsinaujinimo intervalu (kas 1–2 dienas), yra nepakeičiami stebint sezoninius ir stambaus masto augmenijos pokyčius. Dėl aukšto laiko dažnio *MODIS* leidžia fiksuoti greitus ir stambius įvykius, tokius kaip gaisrai, sausros ar stichiniai pokyčiai. Šie duomenys ypač naudingi vertinant plačias teritorijas nacionaliniu ar kontinentiniu mastu, kur smulkūs pokyčiai tampa mažiau svarbūs.
4. Naudoti keturi skirtingi vegetacijos indeksai – *NDVI*, *NVI*, *NRB* ir *EVI* – užtikrino išsamų miškų būklės ir pokyčių vertinimą. *NDVI* leidžia objektyviai vertinti bendrą augmenijos gyvybingumą ir tankumą, o *NVI* suteikia papildomos informacijos apie augmenijos vandeningumą ir sveikatingumą. *NRB* yra itin tinkamas gaisrų ir kitų degradacijos veiksnių vertinimui, tuo tarpu *EVI* išsiskiria aukštu jautrumu tankiai ir sveikai augmenijai, todėl yra tinkamas miškų sveikatos vertinimui.
5. Tyrimo rezultatai aiškiai parodė, kad efektyviausia miškų kaitos stebėseną ir būklės vertinimas pasiekiamas derinant skirtingų palydovų *Sentinel*–2, *Landsat*, *MODIS* duomenis, priklausomai nuo analizės masto ir tyrimo tikslų. Šis metodinis požiūris užtikrina, kad būtų atsižvelgiama į skirtingų palydovų technines charakteristikas: *Sentinel*–2 tinka detaliam lokalių pokyčių vertinimui, *Landsat* – ilgalaikiai kaitos analizei, o *MODIS* – plačios apimties ir sezoninei stebėsenai. Taigi, trijų palydovų duomenų integracija leidžia sukurti išsamų ir patikimą miškų būklės vertinimo modelį.

REKOMENDACIJOS

Remiantis atlikta *Sentinel-2*, *Landsat* ir *MODIS* palydovinių duomenų analize, rekomenduojama taikyti integruotą kelių šaltinių metodologiją, kuri užtikrintų tiek erdvinį detalumą, tiek stebėsenos tęstinumą laiko perspektyvoje. Kiekvienas palydovas išsiskiria specifinėmis stiprybėmis, todėl jų derinimas leidžia išsamiau ir objektyviau įvertinti miškų būklę bei identifikuoti problemines zonas.

1. Siūlomas analizės eiliškumas:

1. Pirmiausia naudoti *MODIS* duomenis, siekiant įvertinti bendrą regioninę situaciją, nustatyti galimus pokyčių židinius ir sezonines tendencijas. Dėl aukšto laikinio dažnio *MODIS* leidžia stebėti bendrą vegetacijos dinamiką ir išskirti svarbiausias teritorijas detalesnei analizei.
2. Toliau analizuoti *Landsat* duomenis, kurie leidžia įvertinti pokyčių eigą retrospektyviai (nuo 1972 m.), išskirti ilgalaikes degradacijos ar regeneracijos zonas. *Landsat* ypač tinkamas nustatyti bendrą kaitos foną ir apžvelgti, kaip teritorijos keitėsi per dešimtmečius.
3. Galiausiai taikyti *Sentinel-2* duomenis, kurie dėl savo aukštos erdvinės raiškos leidžia tiksliai lokalizuoti pokyčius ir detalizuoti identifikuotas problemines vietas – tai gali būti plyni kirtimai, gaisravietės ar natūralaus atsinaujinimo plotai.

2. Indeksų taikymas:

1. Kiekvienam palydovui skaičiuoti pagrindinius vegetacijos indeksus – *NDVI*, *EVI*, *NBR*, *NVI*. Tai užtikrina visapusišką augalijos gyvybingumo, sveikatingumo ir degradacijos rizikos įvertinimą.
2. Rekomenduojama pradėti nuo *NDVI*, kuris suteikia bendrą vaizdą apie vegetacijos būklę, tuomet taikyti *NVI*, siekiant atskleisti normalizuotus pokyčius, *NBR* – gaisrų ar pažeidimų įvertinimui ir *EVI* – tankios augmenijos struktūros vertinimui.

3. Integracija į esamą miškų stebėsenos sistemą:

1. Siūloma šią trijų palydovų metodiką integruoti į nacionalines miškų stebėsenos programas, kaip papildomą sprendimų priėmimo įrankį. *MODIS* duomenys galėtų būti naudojami kaip pirminis indikatorius, padedantis operatyviai nustatyti potencialias grėsmes.
2. *Sentinel-2* indeksai gali būti integruojami į regioninius *GIS* sprendimus, skirtus miškų planavimui, kirtimų kontrolei ar rekreacinių teritorijų apsaugai.
3. *Landsat* retrospektyvinė analizė naudotina vertinant ilgalaikes tendencijas – tai leistų pagrįsti miškų tvarkymo strategijas ir klimato kaitos prisitaikymo priemones.

4. Praktinis taikymas:

- Duomenų apdorojimas rekomenduojamas *QGIS* aplinkoje, naudojant *Raster Calculator* ir *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*, kurie leidžia greitai apskaičiuoti indeksus, atlikti klasifikaciją bei vizualizacijas.
- Rekomenduojama sukurti automatizuotą analizės seką, kuri leistų kasmet atnaujinti duomenis ir gauti lyginamus rezultatus.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Brodrick, P. G., Davies, A. B., & Asner, G. P. (2023). Remote sensing in forestry: current challenges, considerations, and opportunities. *Forestry*, 96(1), 11–26.
2. Chen, X., Li, W., Zhang, C., & Liu, B. (2022). Advances in remote sensing of forest ecosystems: a review of methods and applications. *Journal of Forestry Research*, 33(4), 961–977.
3. Cheng, X., Sun, Y., Zong, J., Wang, Y., Cao, X., Wang, Y., ... Zhang, W. (2023). Advances in forest monitoring with remote sensing: integration of multi-source data and standardization challenges. *Remote Sensing*, 15(8), 1876.
4. Claverie, M., Roy, D. P., Vermote, E. F., & Justice, C. O. (2023). Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS) products for global land monitoring: Five years of insights. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113234.
5. Dubayah, R., Armston, J., Tang, H., Hancock, S., & Hofton, M. (2022). The Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) mission: Data products, validation, and progress. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112717.
6. Deng, L., Mao, Z., Li, X., & Huang, M. (2021). Early detection of forest stress using UAV-based hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 13(5), 913.
7. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2023). The ESA Sentinel-2 mission: Ten years of monitoring Earth's land surface. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113234.
8. European Space Agency (ESA). (2023). *Sentinel-1 Mission Overview*. ESA. (Data retrieved from ESA website on Sentinel-1 characteristics.)
9. European Space Agency (ESA). (2024). *Copernicus Sentinel-2: MSI Instrument and Mission Description*. ESA. (Technical report on Sentinel-2, retrieved 2024.)
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*. Rome: FAO.
11. Forest Europe. (2020). *State of Europe's Forests 2020*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Forest Europe Liaison Unit Bratislava.
12. Forest Europe. (2023). *Sustainable Forest Management*. Forest Europe. *(Available at Forest Europe website: <https://foresteurope.org/workstreams/sustainable-forest-management/>)*​;contentReference[oaicite:2]{index=2}.

13. Gao, B., Huang, C., Ji, L., & Wu, S. (2023). EVI-based analysis of dense forest canopies: addressing saturation and atmospheric effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103178.
14. González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., & Miranda, D. (2023). Forest structure assessment using UAV-borne LiDAR data: current status and perspectives. *Forests*, 14(2), 281.
15. Hancock, S., Sun, M., Armston, J., & Dubayah, R. (2023). Calibration and performance of GEDI spaceborne LiDAR after four years on orbit. *Remote Sensing*, 15(3), 622.
16. Huang, W., Sun, G., Ni, W., & Zhang, Z. (2022). Integrating multi-sensor remote sensing for global forest biomass estimation: recent progress and remaining challenges. *Surveys in Geophysics*, 43(1), 85–109.
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC (A. Pirani, R. Moufouma-Okia, & P. Matthews, Eds.). IPCC, Geneva.
18. Karim, H., Chen, X., & Devi, S. (2023). A Normalized Vegetation Index (NVI) for long-term vegetation health monitoring. *Ecological Indicators*, 144, 109501.
19. Kasperavičius, A., Kuliešis, A., & Kulbokas, G. (2022). Valstybinės miškų inventorizacijos sistemos tobulinimas intensyvios miškininkystės sąlygomis. *Miškininkystė*, 1(78), 19–30. (In Lithuanian.)
20. Kuliešis, A., & Kasperavičius, A. (2022). Pastoviajai Lietuvos miškotvarkai – 100. *Mišakai*, 2023(1), 8–11. (In Lithuanian.)
21. Lang, M., Pflugmacher, D., Hostert, P., & Senf, C. (2023). Nationwide canopy height mapping for Germany using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 288, 113374.
22. Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in remote sensing to forest ecology and management. *One Earth*, 2(5), 405–412.
23. Le Toan, T., Quegan, S., Chave, J., Dall, J., Papathanassiou, K., Shenkin, A., ... Scipal, K. (2021). The ESA BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 255, 112290.
24. Li, X., Ramos Aguila, L. C., Wu, D., Liu, Z., Xu, W., Tang, X., & Liu, J. (2023). Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages. *Science of The Total Environment*, 904, 166962.
25. Li, F., Zhang, H., Wang, Q., & Chen, G. (2020). NDVI-based assessment of vegetation dynamics and its climatic drivers in arid regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 724.

26. Liu, J., Herold, M., & De Sy, V. (2022). Progress and obstacles in forest reference emission level implementation for REDD+: What does remote sensing tell us? *Forestry*, 95(2), 253–266.
27. Liu, J., Zheng, Y., Li, S., & Skidmore, A. K. (2023). Global mapping of forest aboveground biomass at 30 m resolution using synergistic LiDAR and radar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 196, 49–63.
28. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022). *Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) LIDAR – Mission and Data Overview*. NASA, Greenbelt, MD. (Retrieved from NASA GEDI Mission website.)
29. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). *Landsat 9 Data User Handbook*. NASA, Washington, DC. (Report version 3.0, retrieved from NASA Landsat Science website.)
30. Nacionalinė miškų tarnyba. (2022). *Nacionalinės miškų inventorizacijos 2022 m. ataskaita*. Vilnius: Aplinkos ministerija. (In Lithuanian.)
31. Paneque-Gálvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S., & Koh, L. P. (2022). Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential. *Forest Policy and Economics*, 125, 102426.
32. Park, S., Kim, S., & Choi, Y. (2021). Evaluating post-fire burn severity and recovery using the Normalized Burn Ratio (NBR) and time-series satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(9), 1765.
33. Pham, T. T., Le, N. D., Saintilan, N., & Rodriguez, C. (2023). Remote sensing approaches for tropical forest restoration monitoring. *Journal of Applied Ecology*, 60(5), 1154–1166.
34. Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T., & Næsset, E. (2020). Combining airborne laser scanning and UAV photogrammetry for tree-level forest inventory. *Remote Sensing*, 12(6), 838.
35. Reiche, J., Hamunyela, E., Verbesselt, J., Hoekman, D., & Herold, M. (2021). Near-real-time deforestation monitoring in tropical forests using *Sentinel-1* and geospatial data fusion. *Science Advances*, 7(2), eabc8347.
36. Ribeiro, N. S., Syampungani, S., & Matose, F. (2023). Miombo woodlands in a changing environment: monitoring degradation and deforestation using remote sensing. *Environmental Research Letters*, 18(4), 045002.
37. Rodríguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sánchez, J. P. (2020). An assessment of the effectiveness of a Random Forest classifier for land-cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111723.

38. Roy, D. P., Wulder, M. A., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., ... Hansen, M. C. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195.
39. Samiappan, S., Turnage, G., & Hathcock, L. (2021). Applications of unmanned aerial systems in forest health monitoring: A review. *Journal of Forestry*, 119(6), 552–563.
40. Shimada, M., Itoh, T., & Watanabe, M. (2022). JAXA's ALOS/PALSAR global forest mapping and carbon stock estimation: achievements and next steps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 4203–4219.
41. Silva, C. A., Hudak, A. T., Vierling, L., & Klauberg, C. (2023). Perspectives on the use of LiDAR and radar for large-scale forest carbon monitoring. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 8.
42. Torres, A. B., Marsh, S., & Schmidt, I. (2023). Forest conservation in the Amazon: integrating satellite monitoring with community-based management. *Land*, 12(5), 1094.
43. U.S. Geological Survey (USGS). (2023). *Landsat Missions: Data Continuity and Evolution*. Sioux Falls, SD: USGS EROS Center. (Available online: USGS Landsat Program website.)
44. Valstybinė miškų tarnyba. (2020). *Lietuvos miškų ūkio statistika 2020*. Kaunas: Valstybinė miškų tarnyba. (In Lithuanian.)
45. Valstybinė miškų tarnyba. (2023). *Lietuvos miškų ūkio statistika 2023*. Kaunas: Valstybinė miškų tarnyba. (In Lithuanian.)
46. Wang, J., Qin, W., & Zhan, W. (2021). Evaluating forest disturbance and recovery using multi-temporal Sentinel-2 imagery and machine learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 10947–10959.
47. Wang, J., Qin, W., & Zhan, W. (2023). Advances in vegetation index development for forest change detection. *Remote Sensing*, 15(2), 320.
48. Wegmüller, U., Lommers, S., Santoro, M., & Werner, C. (2023). Continuous monitoring of forest cover with Sentinel-1 backscatter data. *Remote Sensing*, 15(3), 757.
49. White, J. C., Wulder, M. A., Hermosilla, T., Coops, N. C., & Hobart, G. W. (2021). Pixel-based image compositing for large-area forest monitoring in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47(5), 583–596.
50. Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Hobart, G. (2023). Forest monitoring at a country scale: two decades of Canada's National Forest Inventory integrated with satellite data. *Environmental Research Letters*, 18(5), 055004.
51. Zhang, J., Southworth, J., Harper, K., & Gibson, L. (2023). Remote sensing for biodiversity: monitoring forest fragmentation and wildlife corridors. *Ecological Indicators*, 145, 109646.

52. Zhao, J., Liu, D., Cao, Y., Zhang, L., Peng, H., Wang, K., Xie, H., & Wang, C. (2022). An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China. *Science of The Total Environment*, 811, 152480.
53. Zhou, Y., Keller, M., Morton, D. C., & Cook, B. (2023). A machine learning approach to assess climate-driven forest biomass changes in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 18(7), 074033.
54. Zhu, Z., Fu, Y., & Chen, G. (2020). Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat data: algorithm and assessment. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111872.
55. Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C. E., & Rogers, B. (2022). Intra-annual monitoring of forest disturbances using Harmonized Landsat-Sentinel data. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112855.

SUTIKIMAS DĖL ASMENS DUOMENŲ NAUDOJIMO

2025 06 05

(Data)

Šiuo sutikimu aš, [Paulius Mušauskas] (toliau – Duomenų subjektas) sutinku, kad Vilniaus Gedimino technikos universitetas, juridinio asmens kodas 111950243, adresas Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius (toliau – Duomenų valdytojas), tvarkytų mano asmens duomenis kitų studentų mokymosi tikslu. T. y. tvarkytų (*pažymėkite tinkamą*):

- ☐ vardą, pavardę, bakalauro baigiamąjį darbą;
- ☐ bakalauro baigiamąjį darbą, nenurodant vardo, pavardės;
- ☒ vardą, pavardę, magistro baigiamąjį darbą;
- ☐ magistro baigiamąjį darbą nenurodant vardo, pavardės.

Šiuo tikslu tvarkomų asmens duomenų Duomenų valdytojas neperduos jokiems tretiesiems asmenims, studentams su baigiamaisiais darbais bus leidžiama susipažinti vidinėje informacinėje sistemoje. Duomenų subjekto asmens duomenys šiuo tikslu bus naudojami ne ilgiau nei 5 metai.

Šiuo sutikimu Duomenų subjektas patvirtina, kad yra supažindintas su šiomis teisėmis:

- Susipažinti su savo duomenimis ir kaip jie yra tvarkomi (teisė susipažinti);
- Reikalauti ištaisyti arba, atsižvelgiant į asmens duomenų tvarkymo tikslus papildyti asmens neišsamius asmens duomenis (teisė ištaisyti);
- Savo duomenis sunaikinti arba sustabdyti savo duomenų tvarkymo veiksmus (išskyrus saugojimą) (teisė sunaikinti ir teisė „būti pamirštam“);
- Reikalauti, kad asmens duomenų valdytojas apribotų asmens duomenų tvarkymą (teisė apriboti);
- Teisė į duomenų perkėlimą (teisė perkelti);
- Nesutikti, kad būtų tvarkomi asmens duomenys, kai šie duomenys tvarkomi ar ketinami tvarkyti kitais tikslais;
- Pateikti skundą Valstybinei duomenų apsaugos inspekcijai;

Duomenų subjektas turi teisę bet kuriuo metu atšaukti savo sutikimą.

_____*Paulius Mušauskas*_____

[Duomenų subjekto vardas, pavardė, parašas]