

A Study on the Methodological Approaches for Estimating Pasture Biomass Using Multi-Source Remote Sensing Data: A Case Study of Bayandelger soum, Tuv province

Boldbaatar Natsagdorj^{1,2}, Sainbayar Dalantai^{2,*}, Bayartungalag Batsaikhan³,
Altantuya Dorjsuren⁴, Amarsaikhan Damdinsuren²

¹Department of Environment and Forest Engineering, School of Engineering and Technology, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

²Division of Aerospace Remote Sensing, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

³Environmental Geochemistry Laboratory, Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, Republic of Korea

⁴Division of Aerospace Remote Sensing, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

*Corresponding author email and ORCID: sainbayard@mas.ac.mn, <https://orcid.org/0000-0001-8806-6167>

Received: 09 Jul 2025 / Accepted: 03 Nov 2025 / Published online: 19 December 2025

ABSTRACT

In recent years, remote sensing technologies particularly the use of multi-source datasets with high spectral and spatial resolution have become increasingly important for estimating in above ground biomass (AGB). The integration of artificial intelligence and machine learning methods enables more accurate and efficient biomass modeling. This study aims to estimate and map grassland biomass in Bayandelger soum using field-measured biomass data and high-resolution Sentinel-2 satellite imagery through five machine learning algorithms: Random Forest Regression (RF), Support Vector Regression (SVR), Extra Trees Regression (ETR), Gradient Boosted Regression Trees (GBRT), and Extreme Gradient Boosting (XGB). Field measurements were conducted at 65 sampling sites in June 2020. The results showed that the average above-ground biomass was 37.9 g/m² in *Carex pp*-dominated pastures (22 points), 30.1 g/m² in *Stipa sp* -dominated pastures (24 points), 64.9 g/m² in *Artemisia sp*-dominated pastures (8 points), 22.4 g/m² in *Cleistogenes squarrosa*-dominated pastures (5 points), and 34.4 g/m² in *Agropyron repens* (L.) P. B -dominated pastures (3 points). Among the five models, the comparison between estimated and field-measured biomass indicated that SVR achieved the highest performance (RMSE = 67.1 kg/ha, R² = 0.70), followed by GBRT (RMSE = 72.1 kg/ha, R² = 0.65), RF (RMSE = 72.3 kg/ha, R² = 0.65), ETR (RMSE = 72.5 kg/ha, R² = 0.65), and XGB (RMSE = 83.9 kg/ha, R² = 0.53). Our findings demonstrate that machine learning models, combined with Sentinel-2 imagery, can effectively estimate and map grassland biomass at the regional scale. This research provides valuable insights for assessing grassland degradation, desertification, and improving sustainable rangeland management in Mongolia.

Keyword: Machine learning, Sentinel, Biomass

Зайнаас тандан судлалын олон эх сурвалжийн өгөгдлийг ашиглан бэлчээрийн биомассыг тооцоолох арга зүйн асуудалд (Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын жишээн дээр)

Болдбаатар Нацагдорж^{1,2}, Сайнбаяр Далантай^{2,*}, Баяртунгалаг Батсайхан³,
Алтантуяа Доржсүрэн⁴, Амарсайхан Дамдинсүрэн²

¹Хүрээлэн буй орчин, ойн инженерчлэлийн тэнхим, Инженер Технологийн Сургууль, Монгол Улсын Их
Сургууль, Улаанбаатар, Монгол

²Агаар сансрын зайнаас тандан судлалын салбар, Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны
Академи, Улаанбаатар, Монгол

³Корио их сургууль, Судлаач профессор Хүрээлэн буй орчны геохимийн лаборатори, Дэлхий ба хүрээлэн
буй орчны шинжлэх ухааны тэнхим, Корио Их Сургууль, Сөүл, Өмнөд Солонгос

⁴Цөлжилтийн судалгааны салбар, Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи,
Улаанбаатар, Монгол

*Холбоо барих зохиогчийн цахим хаяг, ORCID: sainbayard@mas.ac.mn, <https://orcid.org/0000-0001-8806-6167>

Хүлээн авсан: 2025 оны 07 сарын 09 өдөр / Зөвшөөрөгдсөн: 2025 оны 11 сарын 03 өдөр / Нийтлэгдсэн:
2025 оны 12 сарын 19 өдөр

ХУРААНГУЙ

Орчин үед бэлчээрийн биомассын судалгаанд зайнаас тандан судлал тэр дундаа спектрийн өндөр нарийвчлал бүхий олон эх сурвалжийн өгөгдөл, ялангуяа хиймэл оюун ухааны арга зүйг ашиглах нь нэн чухал юм. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь хээрийн хэмжилтээр бэлчээрийн ургамлын биомассыг тодорхойлж, өндөр нарийвчлал бүхий Sentinel-2 хиймэл дагуулын өгөгдөл ашиглан хиймэл оюуны машин сургалтын 5 загвар (санамсаргүй ойн регрессийн алгоритм /Random forest regression algorithm/, тулах векторын регрессийн алгоритм/Support Vector Regression algorithm, сайжруулсан модны регрессийн алгоритм/Extra tree regression algorithm/, градиентаар хөгжих/Gradient Boosted Regression tree, хүчтэй градиентаар хөгжих/Extreme Gradient Boosting)-аар Баяндэлгэр сумын хэмжээнд бэлчээрийн биомассыг зураглахыг зорилоо. Судалгааны талбайн хэмжээнд 2020 оны 6 – р сард бэлчээрийн ургамлын биомассыг нийт 65 цэгт хэмжилт хийлээ. Бэлчээрийн биомассын боловсруулсан үр дүнгээс үзвэл улалж зонхилсон бэлчээрийн биомассын дундаж хэмжээ 37.9 гр/м² (22 цэгт), хялгана зонхилсон бэлчээрт 30.1 гр/м² (24 цэгт), шарилж зонхилсон бэлчээрт 64.9 гр/м² (8 цэгт), хазаар өвс зонхилсон бэлчээрт 22.4 гр/м² (5 цэгт), хиаг зонхилсон бэлчээрт 34.4 гр/м² (3 цэгт) тус тус байлаа. Баяндэлгэр сумын хэмжээнд бэлчээрийн биомассын машин сургалтын 5 загвараар тооцоолсон үр дүн болон хээрийн хэмжилтийн хооронд өндөр хамааралтай RF дундаж квадрат алдаа (RMSE)=72.3 кг/га, детерминацийн коэффициент (R²)=0.65, XGB (RMSE=83.9 кг/га, R²=0.53), GBRT (RMSE=72.1 кг/га, R²=0.65), ETR (RMSE=72.5 кг/га, R²=0.65) байсан бол хамгийн өндөр гүйцэтгэлтэй загвар нь SVR (RMSE=67.1 кг/га, R²=0.7) байлаа. Бидний судалгааны ажил нь бэлчээрийн доройтол, талхагдал, менежментэд онолын болон практик ач холбогдолтой юм.

Түлхүүр үг: Машин сургалт, Sentinel, Биомасс

1. ОРШИЛ

Бэлчээр нь хуурай газрын экосистемийн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэг бөгөөд ус, хөрсийг хамгаалах, биологийн төрөл зүйлийн амьдрах орчин бүрдүүлэх, цөлжилт, газрын доройтол, элсний нүүлтийг сааруулах зэрэг олон талын экологийн чухал үүрэг гүйцэтгэдэг [1]. Түүнчлэн бэлчээр нь мал аж ахуй, аялал жуулчлал, эдийн засгийн тогтвортой байдалд онцгой ач холбогдолтой [2]. Монгол орны хувьд уудам нутаг дэвсгэр, байгаль, цаг уурын ялгаатай нөхцөл зэргээс шалтгаалан бэлчээрийн төлөв байдлыг тогтмол хянах, мониторинг хийхэд ихээхэн хугацаа, хөрөнгө шаарддаг. Мөн мэргэжлийн боловсон хүчний хангамж хангалтгүй байдаг нь энэ чиглэлийн судалгааны хэрэгцээг улам нэмэгдүүлж байна. Иймд зайнаас тандан судлалын технологид суурилсан, өндөр орон-зай, спектр болон цаг хугацааны нарийвчлалтай хиймэл дагуулын мэдээллийг ашиглан бэлчээрийн биомассыг зураглах, үнэлэх, шинэлэг арга зүйг нэвтрүүлэх шаардлага зүй ёсоор тавигдаж байна.

Монгол Улсад ургамалжлын судалгаа 1921 оноос эхлэлтэй бөгөөд 1950-иад оны сүүл үеэс эхлэн Монгол судлаачид бэлчээрийн сар, улирал, жилийн ургац, хэнзлэх зүй тогтлыг суурин болон хагас суурин аргаар судалсан [3], [4]. Хүнс, хөдөө аж ахуйн яам (ХААЯ, Шинжлэх ухааны академи (ШУА) зэрэг байгууллагуудаас хийсэн олон удаагийн хайгуул судалгааны үр дүнд бэлчээр, хадлангийн үндсэн хэв шинжүүдийг ангилан, ургацын хэмжээг тогтоож байжээ [5].

Дэлхий нийтэд зайнаас тандан судлалын технологийг бэлчээрийн мониторинг, менежментэд 1980-аад оноос хэрэглэж эхэлсэн бөгөөд [6], Монгол Улсад 1980-аад оны сүүлээр аэрофотометрийн аргаар бэлчээрийн ургацыг үнэлэх, ургамал-хөрсний спектрийн тодролын коэффициент тодорхойлох, АНУ-ын Агаар мандал, Далай Судлалын Үндэсний Газар (National Oceanic and Atmospheric Administration) хиймэл дагуулын мэдээг ашиглах анхны туршилтууд хийгдсэн [7], [8].

Сүүлийн жилүүдэд хиймэл дагуулын мэдээ болон хээрийн хэмжилтийн мэдээлэлд үндэслэн бэлчээрийн ургац, биомассыг үнэлэх олон судалгаа хийгдсэн. Тухайлбал, ургамлын нормчлогдсон ялгаврын индекс буюу Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)-ийг ба хээрийн ургацын хоорондын хамаарал $R^2=0.66$ гарсан тухай судалгаа Төв, Дундговь, Говьсүмбэр, Дорноговь аймгууд болон Бүгд Найрамдах Хятад

Ард Улс (БНХАУ)-ын Өвөр Монголын нутаг дэвсгэрт хийгдсэн байна [9].

Бэлчээрийн ургамлын төлөв байдал, биомассыг байгалийн бүсээр зайнаас тандах аргаар үнэлэх судалгааг NOAA хиймэл дагуулын NDVI мэдээгээр хийж, өөрчлөлт, даацыг тооцоолох аргазүй боловсруулсан [10]. Мөн Булган аймгийн бэлчээрийн доройтлыг үнэлэх, нөхөн сэргээх технологи боловсруулсан [11], санамсаргүй ойн (RF), хэсэгчилсэн хамгийн бага квадратын регресс (PLS) зэрэг машин сургалтын аргуудыг ашиглан биомассын зураглал хийсэн [12], [13], ARVI индексийг ашиглан өндөр хамаарал бүхий ($R^2=0.62$, $p<0.001$) загвар боловсруулсан байна [14]. Сүүлийн үеийн судалгаанд MODIS хиймэл дагуулын 30 гаруй индексүүдийг ашиглаж, RF, SVM, PLSR зэрэг аргачлалаар биомассын зураглал хийсэн [15]. Түүнчлэн, Yan нар (2023) МОДИС мэдээ, Terra Climate уур амьсгалын загвар, хээрийн биомассын мэдээлэл ашиглан өвөл-хаврын улирлын бэлчээрийн даацыг тооцсон [16], Sentinel-2 хиймэл дагуулын мэдээлэл, ургамлын индекс болон спектрийн сувгуудыг ашиглан Зүүн Монголын тал хээрийн бүсийн биомассын үнэлгээг машин сургалтын аргаар хийсэн судалгаа байна [17].

Энэхүү судалгаандаа хээрийн хэмжилт болон хиймэл дагуулын мэдээнд тулгуурлан машин сургалтын 5 төрлийн аргаар Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын хэмжээнд бэлчээрийн ургамлын биомассыг тооцоолж, орон зайн тархалтыг зураглахыг зорилоо. Судалгааны ажлын зорилгоо хэрэгжүүлэхийн тулд дараах зорилтыг 3 дэвшүүлэв. Үүнд:

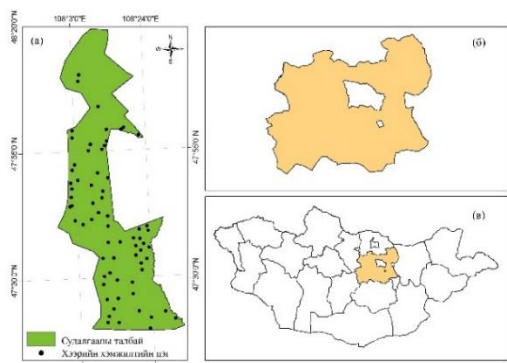
- Баяндэлгэр сумын хэмжээнд бэлчээрийн ургамлын биомассыг хэмжиж, боловсруулах
- Баяндэлгэр сумын хэмжээнд бэлчээрийн биомассыг илэрхийлэх индексүүдийг тооцоолох
- Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн биомассыг зураглах

2. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

2.1. Судалгааны талбай:

Төв аймгийн Баяндэлгэр сум нь нийт 213751.6 га газар нутагтай. Физик-газарзүйн мужлалаар Хангай-Хэнтийн уулархаг их мужийн Хэнтийн захын уулсын тойрогт хамаарна. Сумын нутаг дэвсгэр далайн түвшнээс дээш 1200–2200 м-ийн өндөрт өргөгдөн оршино ба нутгийн хойд хэсэгт уулын тайга, ойг хээр, нутгийн төв хэсгээр хээр,

нутгийн өмнөд хэсгээр хуурай хээрийн бүсүүд илэрдэг. Жилийн нийлбэр хур тунадас 250–400 мм, олон жилийн дундаж агаарын температур 0-2°C байна. Баяндэлгэр сум нь ургамал нөмрөгийн хувьд ойн хөвдөт сөөгөнцөр, хуш, шинэс, нарс, хусан ургамалжилт, уулын хээрийн дундаж өндөр ба нам уулсын ботууль, сөөгт ургамалжилт, нугажуу хээрийн дундаж өндөр ба нам уулсын хялганат, буур өвст, биелэг өвст, хянганд хусан төгөл, алаг өвст ургамалжилт, нугажуу хээрийн бэл, ухаа толгод, тал газрын зүр өвс, сөөгт ургамалжилт, хуурай хээрийн бэл, ухаа толгод, тал газрын харгана, хазаар өвс-хялганат, хялганат-харганат ургамалжилт, бургасан шугуй, ердийн нуга, цахилдаг, дэрст хужирлаг нугын ургамалжилт тус тус тархсан байна [18].



Зураг 1. Судалгааны талбай (а)-Баяндэлгэр сум, (б)-Төв аймаг, (в)-Монгол улс

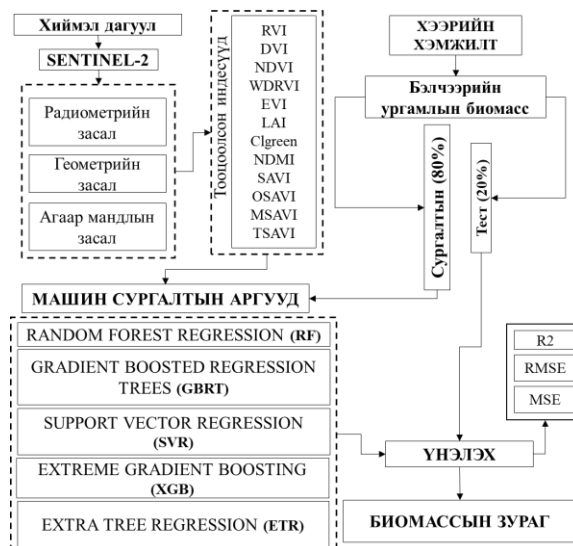
2.2. Боловсруулалт

Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын хэмжээнд 2020 оны 6 – р сарын 16 – 21-ний хооронд 5 өдрийн хугацаанд нийт 65 цэгт дээж авч бэлчээрийн геобатоникийн бичиглэл, хийж боловсрууллаа. Мөн Sentinel-2 хиймэл дагуулын 6 – р сарын 13 өдрийн мэдээг <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [19] сайтаас татан авч SNAP программ хангамжийг ашиглан ургамлын нийт 12 индексийг тооцоолон, Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн биомассыг машин сургалтын 5 төрлийн алгоритмаар загварчлалаа.

2.3. Машин сургалтын алгоритм

Санамсаргүй ойн регрессийн алгоритм (RF) нь хяналттай машин сургалтын ангилалд хамаарах бөгөөд хүрээлэн буй орчны судалгаа, ялангуяа биомассыг тооцох, хөрсний чийгийг тооцох зэрэгт түгээмэл ашиглагдаж байна [20], [21]. Энэхүү арга нь өгөгдлийг дэд багцуудад санамсаргүй байдлаар

хуваан олон салаалсан мод хэлбэрийн дүрсийг үүсгэн тэдгээрээс гарсан шийдвэр бүрийг нэгтгэн эцсийн шийдийг дунджаар нь авдаг.



Зураг 2. Судалгааны ерөнхий арга зүйн схем

Сайжруулсан модны регрессийн алгоритм (ETR) нь санамсаргүй ойн алгоритм дээр суурилан хөгжүүлсэн [22] бөгөөд оролтын бүх өгөгдлийг ашиглаж, модны зангилаа дээрх утгыг санамсаргүй байдлаар хуваадаг [23]. Ингэснээр системийн алдааг багасгах төдийгүй суралцах хугацаа бага байх давуу талыг олгодог.

Ансамблийн функцийн градинет ашиглан алдааг багасгадаг алгоритм (GBRT болон XGB)-уудыг ашигласан. Эдгээр алгоритмуудын үндсэн бүтэц нь төстэй боловч GBRT нь алдааны функцийг нэгдүгээр эрэмбийн уламжлалыг ашигладаг бол XGB нь 2-р эрэмбийн алдааны функцийг уламжлалыг ашигладаг [24]. Түүнчлэн XGB алгоритм нь GBRT-ийн сайжруулсан дараагийн түвшний хувилбар юм.

Тулах векторын регрессийн алгоритм (SVR)-ыг байгалийн ухааны салбарт сүүлийн жилүүдэд өргөнөөр ашиглах болсон. Тухайлбал, тулах векторын регрессийн алгоритмыг ашиглан зайнаас тандан судлалын өгөгдлийг хээрийн хэмжилтийн мэдээтэй хослуулан биомассыг загварчилсан [25]-[27] зэрэг судлаачдын судалгааны ажлыг дурдаж болно. Тулах векторын алгоритм нь удирдуулсан машин сургалтын нэг хэлбэр бөгөөд өгөгдсөн оролтын утгыг N хэмжээст гипер-хавтгайгаар тусгаарлахын /ангилж/ тулд, Кернелийн функцийг ашигладаг алгоритм юм [28]. Кернелийн функцийг ашиглахдаа оролтын өгөгдлөөр N-хэмжээст гипер-хавтгайг тодорхойлох хамгийн бага алдаатайгаар

захын цэгүүдийн зай их байх утгыг олохыг зорьдог. Оролтын өгөгдөл нь ямар нэг ангидуудад хуваагдах дискрет шинж чанартай тохиолдолд тулах векторын ангиллын алгоритмыг, харин тасралтгүй тоон утгын шинж чанартай бол регрессийн алгоритмыг ашиглана.

3. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

3.1. Геобатоникийн бичиглэлийн үр дүн:

Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын хэмжээнд 2020 оны 6 – р сарын 16 – 21-ний хооронд 5 өдрийн хугацаанд нийт 65 цэгт дээж авч бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх чийгтэй биомассын боловсруулалтын үр дүнгээс харахад бэлчээрийн биомассын дундаж хэмжээ 30.0 гр/м^2 , хамгийн бага хэмжээ нутгийн хойд хэсгийн ойт хэсгийн ойт хээрийн бүсийн голын татам орчмын улалж зонхилсон бэлчээрт 85.7 гр/м^2 байсан бол хамгийн бага хэмжээ нь судалгааны талбайн өмнөд хэсгийн хуурай хээрийн бүсийн ботууль зонхилсон бэлчээрт 16.3 гр/м^2 тус тус байна. Хээрийн судалгааны 65 цэгт боловсруулалт хийж, бэлчээрийн зонхилогч ургамлуудын биомассыг статистик үзүүлэлтийг тооцоолон **хүснэгт-1** үзүүлэв.

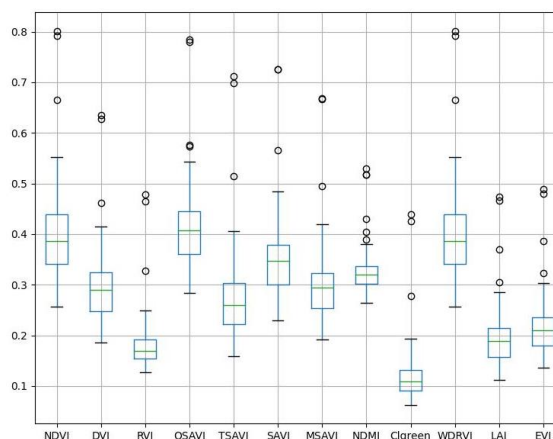
Хүснэгт 1. Бэлчээрийн зонхилогч ургамлын биомассын статистик үзүүлэлт. Хи-хамгийн их, Хб-хамгийн бага, Дж-дундаж

Бэлчээр	Цэгийн тоо	Чийгтэй биомасс, гр/м^2		
		Хи	Хб	Дж
Улалж	22	80.2	17.5	37.9
Хялгана	24	59.1	16.6	30.3
Шарилж	8	53.1	16.8	31.3
Хазаар өвс	5	34.9	17.3	22.4
Хиаг	3	39.3	29.8	34.4
Ботууль	3	32.4	11	23.6
Нийт	65			

3.2. Машин сургалтын загварт ашиглагдсан ургамлын индексүүдийн статистик үзүүлэлт:

Хээрийн хэмжилтээр тодорхойлсон ургамлын чийгтэй биомасс болон Sentinel-2 хиймэл дагуулын мэдээнээс боловсруулсан ургамлын индексүүдийг ашиглан Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомассыг машин сургалтын 5 төрлийн

алгоритмаар загварчилсан. Загварчлалд ашиглагдах оролтын өгөгдөл нь шинж чанарын болон тоон утгын зүй тогтлыг алдагдуулсан аномаль буюу гажилт ихтэй байвал загварын гүйцэтгэлийн чанарт нөлөөлдөг. Иймээс машин сургалтын загварт ашиглагдах оролтын өгөгдлийн шинж чанар буюу үл хамааран хувьсагчийн статистик үзүүлэлтийг харуулав (**Зураг 3**).



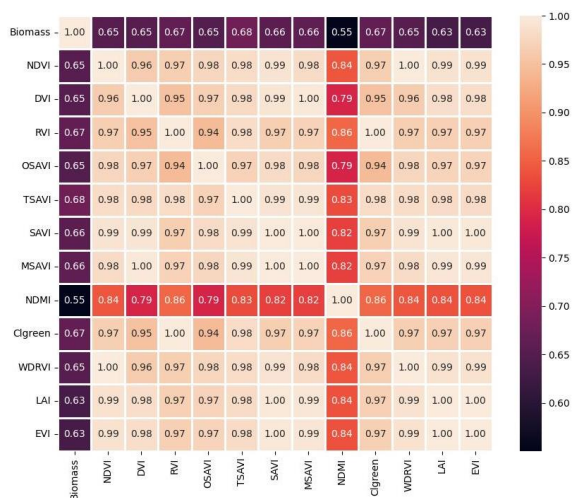
Зураг 3. Машин сургалтын загварт ашиглагдсан ургамлын индексүүдийн статистик үзүүлэлт

3.3. Машин сургалтын загварт ашиглагдсан оролтын хувьсагчдын хамаарал

Машин сургалтын загварын гүйцэтгэл өндөр байх өөрөөр хэлбэл загварын алдаа бага байх урьдач нөхцөлүүдийн нэг нь загварчлалд зориулан сургах өгөгдлийг шинж чанараар нь задлан үл хамаарах хувьсагчдыг оновчтой сонгох явдал юм. Үл хамаарах хувьсагчдыг оновчтой сонгох эхний алхам бол хамаарлын шинжилгээ хийх юм. Баяндэлгэр сумын хэмжээнд Sentinel-2 хиймэл дагуулын 6 сарын 13 өдрийн өгөгдлийг ашиглан тооцоолсон ургамлын 12 индекс болон хээрийн хэмжилтийн 65 цэг (6-р сар)-ийн ургамлын чийгтэй биомасс хоорондын хамаарлыг Персоны корреляцийн шинжилгээгээр тооцсон.

Зураг 4-д хээрийн хэмжилтээр тодорхойлсон ургамлын чийгтэй биомасс ба TSAVI, SAVI, MSAVI, OSAVI, CLgreen, NDVI, DVI, RVI, WDRVI, LAI, EVI индексүүд нь хоорондоо сайн хамааралтай ($R=0.63\sim0.68$, $p<0.01$) байсан бол NDMI индекс ($R=0.55$, $p<0.05$) дунд зэргийн хамааралтай байна. Мөн бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомассад тухайн газар нутгийн хөрснөөс хамаарсан индекс (TSAVI, SAVI, MSAVI, OSAVI) хамгийн чухал нөлөө үзүүлдэг байна. Ургамлын газрын дээрх биомассыг

тооцоолоход сонгон авсан индексүүд нь ($R=0.65\sim0.68$, $p<0.01$) хүчтэй хамааралтай байгааг илэрхийлж байна.



Зураг 4. Биомасс болон сонгон авсан индексүүд хоорондын хамаарлын матриц

3.4. Бэлчээрийн биомассыг загварчлахад чухал нөлөө үзүүлсэн хувьсагчид

Машин сургалтын загварт өгөгдлийн багц дахь шинж чанарууд нь /цаашид үл хамаарах хувьсагч гэх/ хамаарах хувьсагчийг таамаглахад хэр нөлөө үзүүлж хувь нэмэр оруулсан, аль нь ач холбогдол өндөртэй эсвэл ач холбогдолгүй хувьсагч байсныг эрэмбэлдэг. Үл хамаарах хувьсагчийн загварт үзүүлэх нөлөөг эрэмбэлснээр цаашид машин сургалтын гүйцэтгэлийг сайжруулах, загварт ач холбогдолгүй хувьсагчийг хасаж дахин ажиллуулах зэрэг давуу талыг олгоно [29]. Иймээс загварыг боловсруулахад ач холбогдолтой байсан үл хамааран хувьсагчдыг эрэмбэлэн **Зураг 5-д** харуулав.



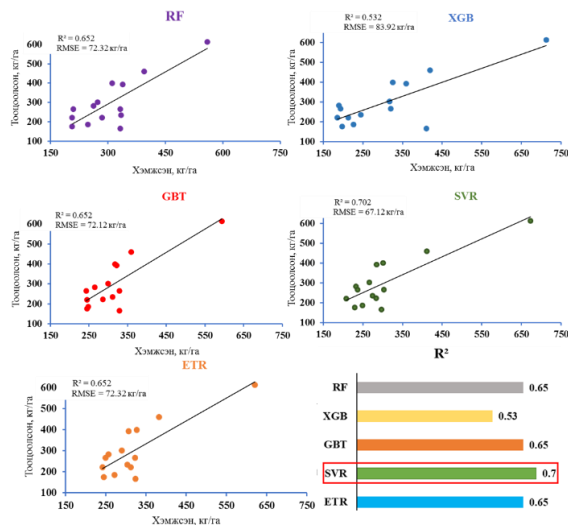
Зураг 5. Машин сургалтын загварын оролтын хувьсагчдын загварт үзүүлсэн нөлөөллийн эрэмбэ /1-утга хамгийн чухал нөлөө үзүүлсэн/

RF, XGB, GBRT, ETR машин сургалтын загваруудад TSAVI индекс, SVR машин сургалтын загварт EVI индекс хамгийн чухал буюу 1-т эрэмбэлэгдэж загварт өндөр ач холбогдолтой

байсан бол бусад загварт OSAVI, DVI, NDVI индексүүд чухал ач холбогдолтой байв. RF загварт LAI, SVR загварт WDRVI, XGB загварт RVI, GBRT болон ETR загварт SAVI индекс хамгийн бага ач холбогдолтой байна.

3.5. Машин сургалтын загваруудын гүйцэтгэлийн үнэлгээ

Машин сургалтын өөр өөр алгоритмаар бичигдсэн загварыг үнэлэх нь машин сургалтын гүйцэтгэлийг шалгах, загваруудыг хооронд нь харьцуулах цаашлаад загварыг сайжруулах, ажиглалтын утга болон тооцсон утгуудын зөрүүг үнэлэх зэрэг олон асуудлыг шийдвэрлэх алхам юм [30], [31]. Машин сургалтын 5 төрлийн алгоритм болох RF, XGB, GBT, SVR болон ETR загварын үр дүнг гүйцэтгэлийг ургамлын газрын дээрх биомассыг хэмжсэн хээрийн хэмжилтийн дүнгээр шалгасан. Загварын гүйцэтгэлийг детерминацийн коэффициент (R^2) болон квадрат дундаж алдаа (RMSE)-аар үнэлсэн (**Хүснэгт 2, Зураг 6**).



Зураг 6. Машин сургалтын алгоритмуудаар загварчилсан таамагласан, хээрийн хэмжилт хоорондын хамаарал

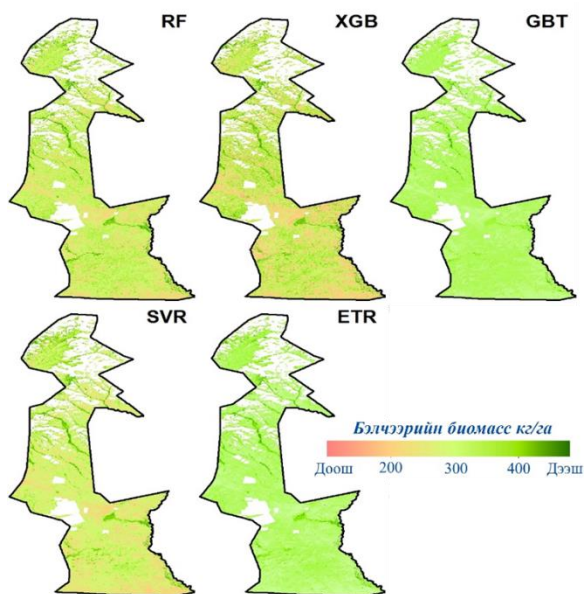
Хүснэгт 2. Машин сургалтын загваруудын гүйцэтгэлийн үнэлгээ

№	Ашигласан загварууд	RMSE	R^2
1	Random forest regression (RF)	72.32	0.65
2	Extreme Gradient Boosting Regression (XGB)	83.92	0.53
3	Gradient boosting regression (GBRT)	72.12	0.65
4	Support Vector Regression (SVR)	67.12	0.71

5	Extra Trees Regressor (ETR)	72.52	0.50
---	-----------------------------	-------	------

3.6. Машин сургалтын загвараар тооцоолсон бэлчээрийн биомассын орон зайн тархалтын үр дүн

Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын хэмжээнд нийт 65 цэгийн хээрийн хэмжилтээр тодорхойлсон бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомасс, Sentinel-2 хиймэл дагуулын өгөгдөлд тулгуурлан тооцоолсон ургамлын индекс болон машин сургалтын 5 алгоритмыг ашиглан бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомассыг загварчлалаа. Бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомассыг загварчлахдаа ойн сан бүхий газар, усан сан бүхий газар, хот, тосгон, бусад суурин газар, уул уурхай, газар тариалангийн талбайг хассан болно. Баяндэлгэр сумын хэмжээнд 2020 оны 6 – р сарын бэлчээрийн ургамлын газрын дээрх биомассыг RF, XGB, GBRT, SVR болон ETR машин сургалтын 5 загвараар тооцоолсон үр дүнг үзүүлэв (Зураг 7).



Зураг 7. Машин сургалтын алгоритмуудаар загварчилсан бэлчээрийн ургамлын биомассын орон зайн тархалт

Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн биомассын машин сургалтын RF алгоритмаар загварчилсан үр дүнгээс үзвэл 200 кг/га-аас бага 8%, 200-300 кг/га-д 45.5%, 300 - 400 кг/га-д 45.3%, 400 кг/га-аас их биомасстай нийт газар нутгийн 1.2% байсан бол XGB алгоритмаар загварчилсан үр дүнгээс үзвэл 200 кг/га-аас бага 12.1%, 200-300 кг/га-д 42.1%, 300 - 400 кг/га-д 33.3%, 400 кг/га-аас их биомасстай нийт газар нутгийн 12.5%-ийг тус тус эзэлж байна. Мөн GBRT алгоритмаар

загварчилсан үр дүнгээс үзвэл 200-300 кг/га-д 38.8%, 300 - 400 кг/га-д 59.8%, 400 кг/га-аас их биомасстай нийт газар нутгийн 1.4% байсан бол ETR алгоритмаар загварчилсан үр дүнгээс үзвэл 200-300 кг/га-д 41.2%, 300 - 400 кг/га-д 54.0%, 400 кг/га-аас их биомасстай нийт газар нутгийн 4.9%-ийг тус тус эзэлж байна. Харин SVR алгоритмаар загварчилсан үр дүнгээс үзвэл 200 кг/га-аас бага 1.6%, 200-300 кг/га-д 64.1%, 300 - 400 кг/га-д 26.8%, 400 кг/га-аас их биомасстай нийт газар нутгийн 7.5% -ийг тус тус хамарч байлаа.

4. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Манай орны эрдэмтэн, судлаачид дэлхий, бүс нутаг, тодорхой судалгааны талбайгаар янз бүрийн орон зайн шийдээр бэлчээрийн биомассыг тооцоолсон байдаг. Тухайлбал, Бэлчээрийн ургамлын төлөв байдал, биомассыг байгалийн бүсээр зайнаас тандах аргаар үнэлэх судалгааг NOAA хиймэл дагуулын NDVI мэдээгээр хийж, өөрчлөлт, даацыг тооцоолох аргазүй боловсруулсан [10]. Мөн Булган аймгийн бэлчээрийн доройтлыг үнэлэх, нөхөн сэргээх технологи боловсруулсан [11], санамсаргүй ойн (RF), хэсэгчилсэн хамгийн бага квадратын регресс (PLS) зэрэг машин сургалтын аргуудыг ашиглан биомассын зураглал хийсэн [12], [13], ARVI индексийг ашиглан өндөр хамаарал бүхий ($R^2=0.62$, $p<0.001$) загвар боловсруулсан байна [14]. Сүүлийн үеийн судалгаанд MODIS хиймэл дагуулын 30 гаруй индексүүдийг ашиглаж, RF, SVM, PLSR зэрэг аргачлалаар биомассын зураглал хийсэн [15]. Түүнчлэн, Yan нар (2023) МОДИС мэдээ, Terra Climate уур амьсгалын загвар, хээрийн биомассын мэдээлэл ашиглан өвөл-хаврын улирлын бэлчээрийн даацыг тооцсон [16], Sentinel-2 хиймэл дагуулын мэдээлэл, ургамлын индекс болон спектрийн сувгуудыг ашиглан Зүүн Монголын тал хээрийн бүсийн биомассын үнэлгээг машин сургалтын аргаар хийсэн судалгаа байна [17].

Энэхүү судалгааны нь орчин үеийн зайнаас тандан судлалын өндөр орон зайн шийд бүхий 20 метрийн нарийвчлалтайгаар Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн биомассыг машин сургалтын янз бүрийн загвараар тооцсон шинэлэг судалгааны ажил болсон юм. Мөн бэлчээрийн биомассын судалгаанд машин сургалтын RF, SVR аргазүйг түлхүү ашиглаж ирсэн бол (ETR) нь системийн алдааг багасгадаг бол GBRT, XGB нь градиент буулгалтын аргаар өмнөх шийдвэрийн модны алдааг дараагийн түвшинд оруулан алдааг дахин сурган шинэ сайжруулсан дараагийн

түвшний хувилбар үүсгэдэг давуу талтай алгоритм юм.

5. ДҮГНЭЛТ

Төв аймгийн Баяндэлгэр сумын нутагт 2020 онд хийсэн бэлчээрийн судалгааны хээрийн хэмжилтийн болон өндөр нарийвчлал бүхий Sentinel-2 хиймэл дагуулын 12 индексийг ашиглан бэлчээрийн биомассыг тооцоолоход ургамлын сайжруулсан индекс, хлорфиллийн индекс, хөрснөөс хамаарсан индекс (RVI, TSAVI, SAVI, Clgreen) индексүүд нь ($R=0.66\sim0.68$, $p<0.01$) чухал нөлөө үзүүлж байна. Баяндэлгэр сумын бэлчээрийн биомассыг машин сургалтын 5 загвараар тооцоолсон үр дүнгээс үзвэл RF загварт $R^2=0.65$, XGB загварт $R^2=0.53$, GBRT загварт $R^2=0.65$, ETR загварт $R^2=0.65$, SVR загвар хамгийн өндөр буюу $R^2=0.71$ байна. Хиймэл оюуны машин сургалтын төрөл бүрийн аргаар өндөр нарийвчлал бүхий хиймэл дагуулын өгөгдөлд тулгуурлан бэлчээрийн ургамлын биомассыг тооцоолсноор тухайн газар нутгийн зуншлагын байдлыг тодорхойлж, бэлчээрийн менежментийг сайжруулах боломжтой юм.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааг “Зайнаас тандан судлалын олон төрлийн өгөгдлийн сан (хиймэл дагуулын мэдээ) дээр тулгуурлан Хятад-Монголын бэлчээрийн мониторинг хийх гол технологи судалгааг хөгжүүлэх” төслийн хүрээнд хийж гүйцэтгэсэн бөгөөд сэдвийн удирдагч доктор (Ph.D.) Б.Баяртунгалаг болон хамтран ажилласан судлаачдаа гүн талархал илэрхийлье.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] M. Arasumani, M. Bunyan, and V. V. Robin, “Opportunities and challenges in using remote sensing for invasive tree species management, and in the identification of restoration sites in tropical montane grasslands,” *J. Environ. Manage.*, vol. 280, p. 111759, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111759>.
- [2] G. Haase, “Geoecological mapping for sustainable land use planning,” *Ecol. Model.*, vol. 107, no. 2–3, pp. 347–356, 1998.
- [3] S. Reinermann, S. Asam, and C. Kuenzer, “Remote sensing of grassland production and management: A review,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 12, p. 1949, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12121949>.

- [4] Мал аж ахуйн эрдэм шинжилгээний хүрээлэн, “Бэлчээр ашиглалтыг сайжруулж мал сүргийг байгалийн гамшгаас хамгаалах арга зам (2001–2003) сэдэвт суурь судалгааны тайлан,” Улаанбаатар, 2003. Accessed on: Nov. 12, 2025. <http://data.stf.gov.mn/Project/ProjectViewPublic.aspx?id=107877>.
- [5] Мал аж ахуйн эрдэм шинжилгээний хүрээлэн, “Бэлчээрийн урт хугацааны мониторинг (2013–2015) сэдэвт онолын суурь судалгааны тайлан,” Улаанбаатар, 2015. Accessed on: Nov. 12, 2025. <http://data.stf.gov.mn/Project/ProjectViewPublic.aspx?id=105963>.
- [6] Цэрэндаш, С., Цэрэндулам, Р., Буян-Орших, Х., Чогний, О., Нарантуяа, Н., Оюунцэцэг, Ч., Хөдөлмөр, С., Жигмэддорж, Б., Александра, Ш., Болормаа, Д., Оюунчимэг, Ш., & Тунгалаг, Ш. (2000). “Монгол орны бэлчээрийн чадавхи, экологи ба чанарын үнэлгээ” (1999–2000) сэдэвт суурь судалгааны тайлан. *Мал аж ахуйн эрдэм шинжилгээний хүрээлэн*. <http://data.stf.gov.mn/Project/ProjectViewPublic.aspx?id=108718>.
- [7] P. T. Tueller, “Remote sensing technology for rangeland management applications,” *J. Range Manage.*, vol. 42, no. 6, pp. 442–453, 1989.
- [8] [8] Ус цаг уур, ой агнуурын эрдэм шинжилгээний институт, “Тал хээрийн бүс нутгийн бэлчээрийн ургамлын ургацыг агаар-сансрын мэдээллээр үнэлэх арга сэдэвт ажлын тайлан,” Улаанбаатар, 1988. Accessed on: Nov. 12, 2025. <http://data.stf.gov.mn/Project/ProjectViewPublic.aspx?id=109159>.
- [9] Ц. Адъяасүрэн, “Монгол орны хээрийн бүсийн бэлчээрийн ургамлын төлөвийг зайнаас тандан хэмжсэн мэдээллээр үнэлэх нь,” Докторын зэрэг горилсон бүтээл, Улаанбаатар, 1989.
- [10] Д. Болормаа ба бусад., “Доройтсон бэлчээрийн экологийг нөхөн сэргээх технологийн хамтарсан судалгаа (2017–2019) сэдэвт хамтарсан төслийн тайлан,” Мал аж ахуйн эрдэм шинжилгээний хүрээлэн, Улаанбаатар, 2019. Accessed on: Nov. 12, 2025. <http://data.stf.gov.mn/Project/ProjectViewPublic.aspx?id=106236>.
- [11] М. Эрдэнэтуяа, “Бэлчээрийн мониторингийн зайнаас тандах арга технологи,” Докторын

- зэрэг горилсон бүтээл, МУИС., Улаанбаатар, 2004.
- [12] М. Уртнасан ба бусад., “Монгол улсын хэт талхлагдсан бэлчээрийг зайнаас тандах аргаар судлах ба нөхөн сэргээх туршилт (2018–2020) гадаадтай хамтарсан төслийн тайлан,” ШУА-ийн Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэн, Улаанбаатар, 2022. Accessed on: Nov. 12, 2025.
- [13] M. Otgonbayar, C. Atzberger, J. Chambers, and A. Damdinsuren, “Mapping pasture biomass in Mongolia using Partial Least Squares, Random Forest regression and Landsat 8 imagery,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 40, no. 8, pp. 3204–3226, 2019.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1541110>.
- [14] Б. Батбилэг, “Зайнаас тандах аргаар бэлчээрийн биомассыг үнэлэх аргазүйн асуудалд,” Докторын зэрэг горилсон бүтээл, МУИС., Улаанбаатар, 2021.
- [15] B. Bayaraa, A. Hirano, M. Purevtseren, B. Vandansambuu, B. Damdin, and E. Natsagdorj, “Applicability of different vegetation indices for pasture biomass estimation in the north-central region of Mongolia,” *Geocarto Int.*, vol. 37, no. 25, pp. 7415–7430, 2022.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1974956>.
- [16] Byambadolgor, B., D. Amarsaikhan, and E. Nyamjargal, “Estimation and mapping of vegetation biomass in forest-steppe and steppe zones of Mongolia using MODIS data,” *Mong. J. Geogr. Geoecol.*, vol. 44, 2023.
<https://orcid.org/0000-0002-9017-0729>.
- [17] N. Yan, W. Zhu, B. Wu, B. Tuvdendorj, S. Chang, O. Mishigdorj, and X. Zhang, “Assessment of the grassland carrying capacity for winter-spring period in Mongolia,” *Ecol. Indic.*, vol. 146, p. 109868, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109868>.
- [18] B. Dashpurev, M. Dorj, T. N. Phan, J. Bendix, and L. W. Lehnert, “Estimating fractional vegetation cover and aboveground biomass for land degradation assessment in eastern Mongolia steppe: Combining ground vegetation data and remote sensing,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 44, no. 2, pp. 452–468, 2023.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2165421>.
- [19] *Монгол Улсын Үндэсний Атлас*, ШУА-ийн Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэн, Улаанбаатар, Монгол, 2022
- [20] Y. Zhang, J. Ma, S. Liang, X. Li, and M. Li, “An evaluation of eight machine learning regression algorithms for forest aboveground biomass estimation from multiple satellite data products,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 24, p. 4015, 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12244015>.
- [21] C. Zheng, A. Abd-Elrahman, V. Whitaker, and C. Dalid, “Prediction of strawberry dry biomass from UAV multispectral imagery using multiple machine learning methods,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 18, p. 4511, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14184511>.
- [22] P. Geurts, D. Ernst, and L. Wehenkel, “Extremely randomized trees,” *Mach. Learn.*, vol. 63, no. 1, pp. 3–42, 2006.
<https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1>.
- [23] A. Sharafati, S. B. H. S. Asadollah, and M. Hosseinzadeh, “The potential of new ensemble machine learning models for effluent quality parameters prediction and related uncertainty,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 140, pp. 68–78, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.045>.
- [24] W. Wang, G. Chakraborty, and B. Chakraborty, “Predicting the risk of chronic kidney disease (CKD) using machine learning algorithm,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 202, 2020.
<https://doi.org/10.3390/app11010202>.
- [25] Z. Tang, X. Xia, Y. Huang, Y. Lu, and Z. Guo, “Estimation of national forest aboveground biomass from multi-source remotely sensed dataset with machine learning algorithms in China,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 21, p. 5487, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14215487>.
- [26] Y. Wang, R. Qin, H. Cheng, T. Liang, K. Zhang, N. Chai, J. Gao, Q. Feng, M. Hou, J. Liu, C. Liu, W. Zhang, Y. Fang, J. Huang, and F. Zhang, “Can machine learning algorithms successfully predict grassland aboveground biomass?” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 16, p. 3843, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14163843>.
- [27] C. Zheng, A. Abd-Elrahman, V. Whitaker, and C. Dalid, “Prediction of strawberry dry biomass from UAV multispectral imagery using multiple machine learning methods,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 18, p. 4511, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14184511>.
- [28] Y. Zhang, J. Ma, S. Liang, X. Li, and M. Li, “An evaluation of eight machine learning regression algorithms for forest aboveground biomass estimation from multiple satellite data products,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 24, p.

- 4015, 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12244015>.
- [29] N. M. Khan, C. N. Madhav, A. Negi, and I. S. Thaseen, "Analysis on improving the performance of machine learning models using feature selection technique," in *Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2018), Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 941, A. Abraham, A. K. Cherukuri, P. Melin, and N. Gandhi, Eds. Cham, Switzerland: Springer Int. Publ., 2020, pp. 69–77.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-16660-1_7.
- [30] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 7, e623, 2021.
<https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
- [31] C. Zheng, A. Abd-Elrahman, V. Whitaker, and C. Dalid, "Prediction of strawberry dry biomass from UAV multispectral imagery using multiple machine learning methods," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 18, p. 4511, 2022.
<https://doi.org/10.3390/rs14184511>.