

주행보조원치의 적용에 따른 하베스터 작업이 산림 토양물리성에 미치는 영향

공현종¹ · 김대솔¹ · 박준영¹ · 이석희¹ · 전수홍¹ · 강준원^{1*} · 문호성² · 박상준¹

¹경북대학교 임학과, ²국립산림과학원 산림기술경영연구소

Effects of Winch-Assisted Harvester Operations on Forest Soil Physical Properties

Hyeon-Jong Kong¹, Daesol Kim¹, Jun Young Park¹, Seok Hui Lee¹, Su Hong Jeon¹,
Jun Won Kang^{1*}, Ho-Seong Mun² and Sang-Jun Park¹

¹School of Forest Sciences and Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

²Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11187, Korea

요약: 산림청은 탄소중립 정책에 따라 목재 이용과 소규모 벌채 확대를 위한 기계화 임업을 장려하고 있으며, 이에 따라 하베스터 등 임업기계의 사용이 증가하고 있다. 그러나 임업기계를 활용한 목재수확 작업은 토양 용적밀도 증가와 수분 이동 저하 등 산림 토양의 물리적 성질을 악화시키는 문제를 초래한다. 이를 개선하기 위해 하베스터 작업에 주행보조원치를 적용하여 토양 훼손을 줄이려는 시도가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 주행보조원치 적용 효과를 평가하기 위해 목재 수확지에서 토양 깊이에 따른 용적밀도 변화를 측정하고 경사도와의 관계를 분석하였다. 연구 결과, 하베스터가 직접 주행한 휠트랙부에서 주행보조원치 미적용 시 토양 용적밀도 증가율은 20.2%였으나, 주행보조원치 적용 시 9.6% ($p < 0.05$)로 감소하여 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 한편, 작업로 경사 증가에 따른 토양 용적밀도 변화는 통계적으로 유의하지 않았으며, 45% 이상의 급경사 구간에서도 주행보조원치 적용 시 용적밀도가 감소하는 경향은 나타났으나 유의한 수준은 아니었다 ($p > 0.05$). 본 연구 결과는 급경사 지역에서 임업기계로 인한 토양 피해를 최소화하기 위해 주행보조원치를 활용한 작업 시스템의 도입이 필요함을 시사한다.

Abstract: Because of its carbon neutrality policy, Korea's Forest Service aims to expand timber use and small-scale logging by promoting the use of forestry machines such as harvesters. However, timber harvesting using forestry machinery can degrade the physical properties of forest soil by increasing soil bulk density and reducing water movement. Winches are used to assist harvester operations to minimize soil damage. This study evaluated the effects of winch assistance during harvester operations by measuring changes in soil bulk density at different soil depths in the harvested areas and analyzing the relationship between x and slope gradients. The results show that soil bulk density increased by 20.2% along the wheel track area of the unassisted harvester; in contrast, it increased to only 9.6% ($p < 0.05$) with winch assistance, indicating a statistically significant difference. Changes in soil bulk density with increasing slope were not statistically significant. However, bulk density tended to decrease significantly ($p > 0.05$) on steep slopes exceeding 45% when the winch was applied. These findings suggest that winch assistance can minimize soil damage caused by forestry machinery, especially in steep-slope areas.

Key words: harvester, soil bulk density, winch-assist, soil compaction, slope forestry

서론

* Corresponding author

E-mail: jwkang15@knu.ac.kr

ORCID

Jun Won Kang  https://orcid.org/0000-0003-3641-4654

최근 국내 산림에서는 임목축적이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 산림 작업의 생산성과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 방안으로 임업 기계화의 필요성이 강조되

고 있다. 특히 고령화와 작업 인력 부족이라는 구조적 문제에 대응하기 위해, 산림청은 지속가능한 산림경영 기반 마련을 목표로 고성능 임업기계의 도입을 적극 추진하고 있다(KFS, 2024). 이러한 정책 기조 아래, 하베스터 및 포워더와 같은 중대형 기계를 활용한 기계화 작업은 산림 현장에서 점차 확대되고 있다.

그러나 생산성과 효율성을 높이기 위한 기계화 작업은 산림 생태계의 기반인 토양 물리성에 부정적인 영향을 초래할 수 있다. 하베스터(Harvester)와 포워더(Forwarder)는 일반적으로 10톤 이상의 중량을 갖는 중대형 기계로 분류되며, 반복 운행 시 토양 구조에 압력을 가해 물리적 특성을 변화시킬 수 있다(McMahon and Evanson, 1994; Makineci et al., 2007). 이러한 변화는 기계 중량, 운행 빈도, 지형 경사, 토양 수분 함량 등 다양한 요인의 영향을 받으며, 장기적으로는 산림생태계의 기능 저하로 이어질 수 있다(Page-Dumroese et al., 2006; Kim et al., 2021). 특히 경사지에서는 기계의 견인력(tractive force) 저하로 인해 미끄러짐과 반복 주행이 발생하기 쉬우며, 그 결과 토양 답압(soil compaction)이 더욱 심화된다고(Holzleitner et al., 2018).

토양 용적밀도는 토양 입자와 유기물이 차지하는 부피에 대한 전체 토양 부피의 비율로 정의되며, 일반적으로 토심이 깊어질수록 증가하는 경향이 있다(Stirzaker et al., 1996; Kozłowski, 1999). 산림 토양의 용적밀도는 일반적으로 $1.0\sim 1.7\text{ g cm}^{-3}$ 범위에 있으며(USDA, 1999), 반복된 기계 주행은 이를 유의하게 증가시켜 수분 침투율과 통기성을 저해하고, 결과적으로 식물 뿌리 성장을 제한하는 주요 요인으로 작용할 수 있다(Adams and Froehlich, 1981; Labelle et al., 2022).

이러한 토양 물리성 변화는 지형 경사도에 따라 더욱 뚜렷하게 나타나며, 특히 45%를 초과하는 급경사지에서는 기계 하중이 집중되고 토양 침식 가능성도 함께 높아지는 것으로 보고된다(Brame and Jimenez, 2019). 이에 따라 경사도를 주요 분석 요소로 설정한 연구들이 일부 보고되었으나, 경사도 구간에 따른 토양 물리성 변화와 이에 대응하는 기술 적용 효과를 정량적으로 비교한 사례는 상대적으로 제한적이다. 특히 주행보조장치와 같은 보조 기술의 효과를 경사도 조건에 따라 실험적으로 검토한 연구는 부족하며, 지형 특성과 기술 간 상호작용을 분석하는 체계적인 접근의 확장이 필요하다.

주행보조원치(Winch-assist system)는 본래 급경사지에서 중대형 기계의 안정적인 운행을 보조하기 위해 개발된 장비이며, 작업 안정성 확보가 주된 목적이지만(Labelle and Jaeger, 2011; Visser and Stampfer, 2015), 기계 하중을

분산시키는 구조적 특성으로 인해 토양 답압 완화 효과 또한 기대되고 있다(Fagundes, 2022; Breinig et al., 2025).

국내에서는 주행보조원치를 이용한 산림 작업이 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 이 장비가 토양 물리성 변화에 미치는 영향을 실험적으로 분석한 연구는 거의 전무한 실정이다. 일부 연구에서는 목재 수확에 따른 토양 변화가 보고된 바 있으나(Lee, 2020), 경사도 조건을 반영하여 주행보조장치의 적용 효과를 체계적으로 비교한 사례는 부족하다. 국외에서는 관련 기술의 적용 가능성을 다룬 연구들이 이루어지고 있으며, 급경사지에서 임업기계의 작업 안정성을 높이고 토양 훼손을 저감하는 기술로 평가되고 있다(Green et al., 2020; Visser and Spinelli, 2023). 특히 주행보조원치의 사용은 경사지에서 기계의 미끄러짐(slip)을 줄이고, 결과적으로 토양 침식 및 물리성 저하를 완화하는 데 긍정적인 영향을 미친다(Cavalli and Amishev, 2019).

이에 본 연구는 경사지 산림에서 하베스터 작업 시, 주행보조원치 사용 및 지형 경사도 수준에 따른 토양 물리성 변화를 정량적으로 분석하고, 주행보조원치의 토양 보호 효과를 과학적으로 검토하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 목재수확작업 개요

본 연구는 산림 기계화 작업 중 하베스터의 주행보조원치 적용이 경사지 토양의 물리성 변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 수행되었다. 실험은 강원도 홍천군 화촌면 야시대리 산1-1 ($37^{\circ}48'58.3''\text{N}$, $127^{\circ}56'07.6''\text{E}$)에 위치한 가리산 선도산림경영단지 내 침엽수림 지역(면적 2.3 ha)에서 실시하였다.

조사지의 평균 영급은 IV급이며, 주요 수종은 잣나무(*Pinus koraiensis*)와 낙엽송(*Larix kaempferi*)으로 구성되어 있다. 잣나무의 평균 수고는 16 m ($12\sim 22\text{ m}$), 평균 흉고 직경 20.0 cm ($11.0\sim 31.0\text{ cm}$)였고, 낙엽송은 평균 수고 18 m ($14\sim 24\text{ m}$), 평균 흉고직경 18.0 cm ($10.0\sim 28.0\text{ cm}$)였다. 평균 경사도는 40%로 작업 대상지 전반이 중-급경사 조건에 해당하며, 평균 토양함수율은 11%로 측정되었다. 토성은 주로 양토(Loam)였으며, 일부 지역에서는 실트양토(Silt loam), 점양토(Clay loam), 점토(Clay)가 혼재되었다(Table 1).

목재수확작업에는 하베스터를 활용한 벌도 및 조재, 포워더를 활용한 집재 및 운재가 포함된 단목수확시스템(CTL, Cut-to-length system)이 적용되었다. 작업 방식은 열식간벌과 정성간벌을 혼합하여 진행하였으며, 집재선

Table 1. Environmental and operational conditions of the experimental plots.

Plot	Winch-assist	Mean Slope (%)	Soil Moisture (%)	Soil Texture	Organic Matters (g/kg)
a1	No	37	11.23	Loam	53.89
b1	Yes	41	12.37	Loam	54.29
b2	Yes	48	10.24	Loam	53.2
a2	No	34	9.58	Silt Loam	75.65
a3	No	33	10.38	Clay Loam	68.8
b3	Yes	36	9.99	Silt Loam	58.19
b4	Yes	51	10.22	Clay Loam	50.72
a4	No	42	12.03	Loam	60.15
b5	Yes	42	11.53	Loam	67.55
a5	No	44	10.07	Clay Loam	84.06
b6	Yes	52	11.83	Clay	97.94
a6	No	43	13.74	Silt Loam	131.16

을 따라 1열을 벌채한 후 인접 6열을 존치시키고, 이후 존치된 구간에서 정성간벌을 실시하였다.

사용된 장비는 KONRAD사의 KDH40-1 하베스터를 사용하였으며, 제원은 총 중량 11,600 kg, 출력 55.4 kW, 최대 주행속도 5 km/h이다. 주행보조원치는 해당 기종에 내장된 RW90-1 리깅 윈치로, 최대 인장력은 30 kN이며, 와이어의 직경은 Ø11 mm이고, 80 m 길이의 스틸 재질을 사용하였다(Figure 1).

2. 조사구 구성 및 시료 채취 방법

하베스터 주행보조원치 적용 유무에 따른 토양 물리성 변화를 비교하기 위해, 실험지는 경사도 및 토양 함수율, 유기물함량이 유사한 두 개의 조사구(Winch-assist plot,

Non winch-assist plot)로 구분하였다. 각 변수의 유사성 검토하기 위해 독립표본 t-검정을 실시한 결과, 세 변수 모두 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$). 이후 두 조사구 모두 동일한 벌채 시기 및 작업 조건하에, 주행보조원치를 적용한 하베스터와 미적용 하베스터를 사용하여 왕복 1회씩 주행하였다. 각 조사구에는 미주행 지역(Control, C)을 포함하여 휠트랙부(Wheel-track, WT), 트랙 중심부(Inter wheel-tracks, IW)의 세 구역으로 조사 범위를 설정하였다(Figure 2).

각 조사구 내 기계 작업로에는 5 m 간격으로 총 5 개의 조사선을 설치하였고, 각 조사선마다 세 구역(WT, IW, C)에서 토양 시료를 채취하였다. 시료 채취에는 Oakfield soil auger(SKU: Model A)를 사용하였으며, 시료 깊이는 5 cm,



Figure 1. Harvester (KDH40-1) equipped with a winch-assist system used in this study.

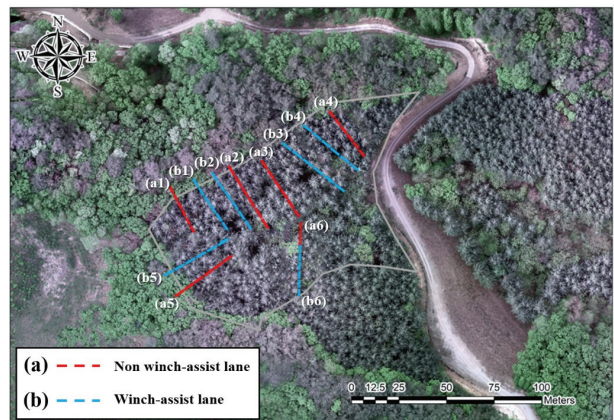


Figure 2. Aerial map of the study site showing machine traffic lanes with and without winch-assist. Red dashed lines indicate Non winch-assist lanes (a1-a6), and blue dashed lines indicate winch-assist lanes (b1-b6).

15 cm, 25 cm의 세 수준으로 구분하였다(Figure 3). 총 채취된 시료 수는 468개(대조구 108개, 트랙 중심부 180개, 휠트랙부 180개)였다. 수집된 시료는 실험실로 운반 후, 물리성 분석에 앞서 전처리를 실시하였다. 2 mm 체를 이용해 입자 크기 기준으로 시료를 선별하고, 이후 유기 잔재물 및 이물질을 제거하였다.

3. 주행보조원치 적용에 따른 토양 변화

1) 토양 용적밀도 측정 및 분석

전처리된 토양 시료는 ISO 11465 기준에 따라 105°C에서 24시간 이상 건조한 후 건중량을 측정하였다. 용적밀도(Bulk density)는 각 조사선 및 깊이, 구역별로 동일 조건에서 5개의 시료를 채취하여 산정하였으며, 식 1과 같이 계산하였다.

$$\rho_b = Md/Vt \quad (1)$$

여기서, Md 는 건조된 토양 시료의 질량(g), Vt 는 시료를 채취한 soil auger의 체적(cm^3)으로, 토양의 총 부피를 의미한다.

주행 구역(WT, IW, C) 간 용적밀도 차이는 Welch ANOVA를 통해 분석하였고, 등분산성 검토를 위한 Levene 검정과 정규성 검토를 위한 Shapiro-Wilk 검정을 사전에 수행하였다.

깊이에 따른 밀도 변화 경향은 Pearson 상관분석으로 평

가하였으며, 주행 구역과 깊이의 상호영향을 검토하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 모든 통계 분석은 SPSS Statistics 27.0 및 R 4.3.0 환경에서 수행하였다.

2) 용적밀도 증가율·공극률 산출 및 분석

휠트랙부에서 주행보조원치 적용 유무에 따른 용적밀도 증가율과 공극률 차이를 정량적으로 비교하였다. 용적밀도 증가율은 동일 조사선 내 대조구 대비 휠트랙부의 밀도 증가분을 백분율로 산출하였고, 공극률(Porosity)은 다음 식 2와 같이 계산하였다

$$n = (1 - \rho_b/\rho_p) \times 100 \quad (2)$$

여기서, ρ_b 는 용적밀도(g cm^{-3}), ρ_p 는 일반적인 토양 입자 밀도(2.65 g cm^{-3})이다

휠트랙부에서 주행보조원치 사용군(Winch-assist)과 미사용군(Non winch-assist)의 비교를 위해 Two-way ANOVA를 수행하였고, 분석에는 주효과(처리, 깊이)와 상호작용항(term)이 포함되었다. 등분산성과 정규성은 사전 검정을 통해 확인하였으며, 필요 시 깊이별 독립표본 t-검정을 병행하였다.

3) 경사도에 따른 효과 분석

조사구 내 기계 작업로의 평균 경사도는 Digital Inclinator (Bosch: GAM 220MF)를 사용하여 측정하였다. 각 조사선마다 5 m 간격으로 3회 반복 측정하여 평균

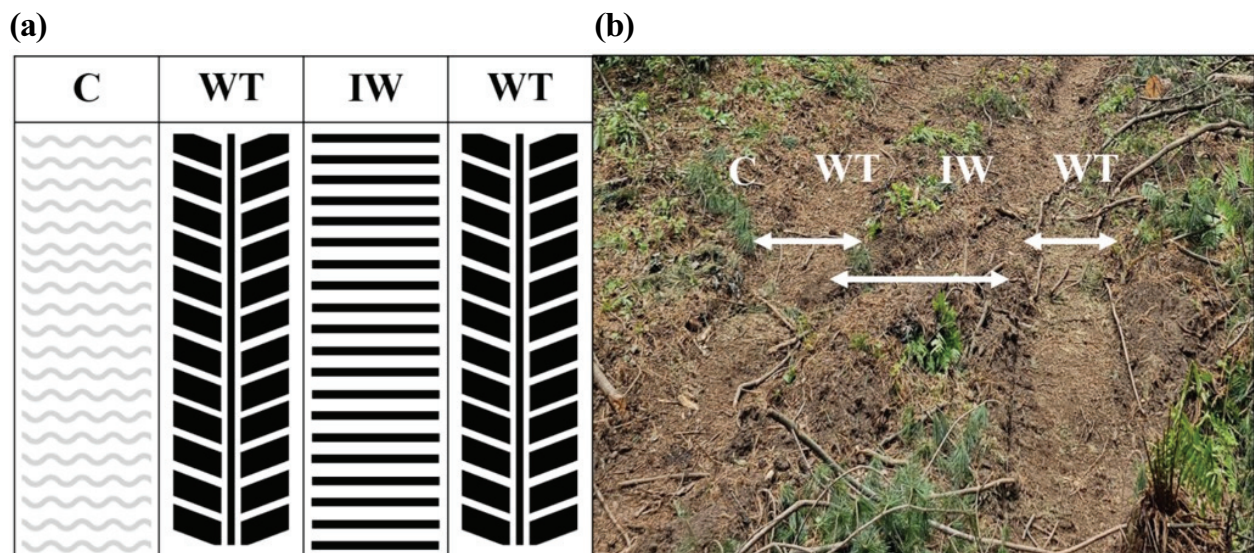


Figure 3. Survey plot design. (a) Schematic representation of the experimental traffic zones: C; Control, WT; Wheel Track, and IW; Inter-wheel tracks. (b) Field photograph showing the actual layout of the traffic zones after harvester operation.

값을 산출하였고, 이를 바탕으로 ①완만 경사($\leq 36\%$), ②중간 경사($36\sim 45\%$), ③급경사($>45\%$)의 세 구간으로 분류하였다.

경사도 구간별로 주행보조원치 유무에 따른 용적밀도 증가율 및 공극률을 비교하기 위해 One-way ANOVA를 실시하였으며, 정규성과 등분산성 검토 후 사후 검정은 표본 수에 따라 Tukey HSD 또는 Scheffé 검정을 적용하였다.

또한, 경사도를 연속 변수로 간주한 Pearson 상관분석과 단순 회귀 분석을 통해 주행보조원치 효과의 경사도별 추세를 평가하였다. 공분산분석(ANCOVA)에서는 경사도(공변량), 주행보조원치 유무(독립변수), 용적밀도 증가율 및 공극률(종속변수)을 기준으로 모델을 설정하였으며, Bonferroni 보정을 통해 사후 검정을 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 기계 주행이 토양 물리성에 미치는 영향

1) 토양 물리성 변화

(1) 기계 주행에 따른 용적밀도 변화

하베스터 주행이 토양의 용적밀도에 미치는 영향을 분석한 결과, 주행 구역에 따라 뚜렷한 차이가 나타났다 [Figure 4(a)]. One-way ANOVA 결과, 휠트랙부(Wheel-track, WT)는 대조구(Control)와 트랙 중심부(Inter wheel-tracks, IW)에 비해 유의하게 높은 용적밀도를 나타냈다 ($p < 0.05$). 트랙 중심부와 대조구 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

이러한 결과는 반복적인 기계 하중이 토양 입자 간 간극을 축소시키며, 토양 구조를 재배열시킨다는 기존 연구들과 일치한다(McNabb et al., 2001). 또한, 하중뿐 아니라 기계 운행 중 발생하는 진동 역시 토양 구조에 영향을 미치는 중요한 요인으로 제시된 바 있다. Picchio et al.(2020)는 하베스터를 활용한 임목생산 작업에서, 기계 주행 중 발생하는 진동과 지속적인 하중이 토양 입자 간 간극을 축소시켜 용적밀도 상승을 유발한다고 보고하였다. 같은 하중 조건에서도 주행 구역에 따라 토양이 받는 영향 정도가 상이할 수 있으며, 이는 토양 보호를 고려한 운행 경로 설계의 중요성을 뒷받침한다(Sohrabi et al., 2019).

실제 작업 현장에서는 부산물(잔가지, 수확 잔재)의 분포와 깊이도 토양 물리성 변화에 영향을 미칠 수 있다. Eliasson and Wästerlund.(2007)는 포워더 주행 시 부산물 피복(slash cover) 유무에 따라 토양 용적밀도 변화가 달라지며, 부산물이 기계 하중을 분산시켜 답압을 억제하는 역할을 한다고 보고하였다. 따라서 향후 연구에서는 진동, 운행 경로, 부산물 분포 등 복합적 요인을 고려한 통합적 분석이 필요하다.

(2) 토양 깊이에 따른 용적밀도 변화 경향

토양 깊이에 따른 변화 경향을 확인한 결과, 깊이가 증가할수록 용적밀도도 유의하게 증가하는 양상이 나타났다 [Figure 4(b)]. Pearson 상관 분석 결과 깊이와 용적밀도 간에는 유의한 양의 상관관계가 있었으며 ($p < 0.001$), 이는 기계 하중의 영향이 표층을 넘어 깊이 방향으로도 전달되어 심층도 영향을 받음을 시사한다(Sakai et al., 2008;

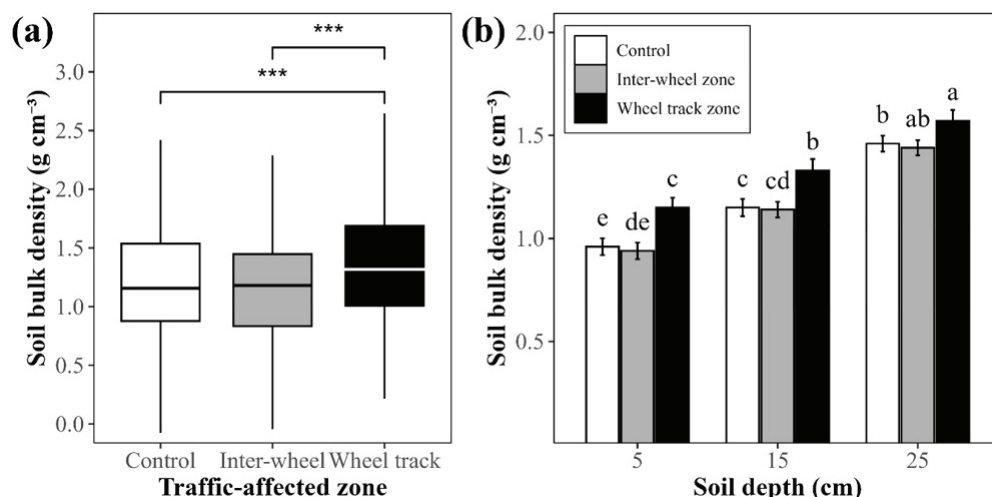


Figure 4. Changes in soil bulk density by traffic zone and soil depth following machine operation. (a) Boxplot comparison of soil bulk density across traffic-affected zones (** $p < 0.001$). (b) Soil bulk density across soil depths (5, 15, and 25 cm) within each traffic zone.

Cambi et al., 2015).

다중회귀분석에서도 토양 깊이와 주행 구역은 모두 용적밀도에 유의한 영향을 미치는 요인으로 확인되었으며 ($p < 0.001$), 특히 휠트랙부에서 깊이에 따른 밀도 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 정규성 검정을 위한 Shapiro-Wilk 검정 결과, 모든 변수는 정규성 가정을 충족하였다 ($p > 0.05$).

본 연구를 통해 기계 주행이 토양의 물리성, 특히 용적밀도에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었으며, 하베스터의 기계 주행으로 인한 토양 압축은 주행 경로 내에서도 공간적인 차이를 보이고, 휠트랙부에서 가장 뚜렷한 구조변화가 관찰되었다. 이는 반복적인 기계 하중으로 인한 압축 누적의 결과로 해석된다.

또한 깊이 증가에 따른 용적밀도 상승은 기계 하중이 토양 내부로 응력을 전달함으로써 심층까지 압축이 발생할 수 있음을 시사한다. 본 연구에서는 5 cm 표층에서 가장 뚜렷한 용적밀도 변화가 확인되었으며, 이는 기계 하중에 가장 먼저 노출되는 표층에서 압축이 집중적으로 발생함을 반영한다.

이러한 토양 압축은 공극 붕괴, 산소 부족, 수분 이동 저해, 뿌리 생장 제한, 미생물 다양성 저하 등 물리적·생물학적 기능을 복합적으로 저하시킬 수 있으며(Ponder Jr, 2004; Wang et al., 2019; Longepierre et al., 2021), 압축 심도가 증가할수록 그 영향이 더욱 심화되어 장기적인 생장 저해와 생산성 감소로 이어질 수 있다. 따라서 토양 보전 전략 수립 시에는 표층과 심층의 복합적 변화를 함께 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

2. 주행보조원치 적용에 따른 토양 보존 효과

기계 주행으로 인한 토양 압축 문제를 완화하기 위한 기술적 수단으로 주행보조원치의 적용 효과를 Two-way ANOVA를 통해 분석하였다. 비교의 타당성을 확보하기 위해, 분석에 앞서 두 조사구의 경사도, 토양 함수율, 유기물 함량에 대해 독립표본 t-검정을 실시하였으며, 세 변수 모두에서 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$).

그 결과, 주행보조원치 처리에 따른 토양 물리성 변화 저감 효과가 유의하게 확인되었으며, 특히 용적밀도 증가율과 공극률 모두에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (Table 2, 3).

1) 토양 용적밀도 증가율 완화 효과

주행보조원치 적용 구간의 평균 용적밀도 증가율은 9.6%로, 미적용 구간의 20.2%에 비해 유의하게 낮았으며 ($p < 0.01$), 약 52.5%의 상대적 감소율을 보였다(Table 2). Two-way ANOVA 결과 주행보조원치 처리의 주효과는 유의한 것으로 나타났다 ($p < 0.01$). 모든 깊이에서 적용구는 미적용구보다 낮은 증가율을 보이는 경향을 나타냈지만, 처리와 깊이 간의 상호작용 효과는 유의하지 않았다. 이는 주행보조원치가 압축 저감에 있어 전 심도에 걸쳐 일관된 효과를 발휘함을 의미한다[Figure 5(a)].

이러한 경향은 주행보조원치가 기계 하중을 분산시키는 데 기여하기 때문으로 해석된다. 실제로 하베스터가 경사지에서 자가 중량으로 이동할 경우, 하중이 특정 지점에 집중되기 쉬우며, 이는 휠트랙부 압축을 심화시킬 수 있다. 주행보조원치는 이러한 중량 전달을 줄이고 일정한 견

Table 2. Soil bulk density increase (%) in wheel-track by treatment and depth (mean $\pm$ SD). p -values from two-way ANOVA for the main effect of treatment.

Depth (cm)	Winch-assist	Non winch-assist	ANOVA p -value
5	15.22 $\pm$ 22.22	26.17 $\pm$ 20.64	0.005**
15	12.78 $\pm$ 20.96	18.88 $\pm$ 22.19	
25	0.72 $\pm$ 15.31	15.73 $\pm$ 17.13	

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Table 3. Porosity (%) in wheel-track by treatment and depth (mean $\pm$ SD). p -values from two-way ANOVA for the main effect of treatment.

Depth (cm)	Winch-assist	Non winch-assist	ANOVA p -value
5	58.02 $\pm$ 8.05	55.05 $\pm$ 7.04	0.011*
15	51.79 $\pm$ 9.30	47.84 $\pm$ 8.71	
25	42.17 $\pm$ 9.56	39.26 $\pm$ 7.74	

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

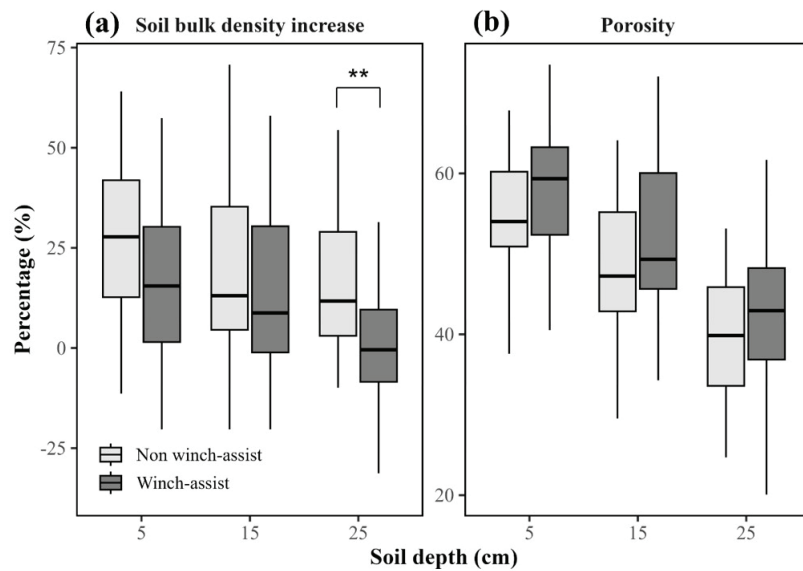


Figure 5. Effect of Winch-assist harvesting on soil bulk density increase and porosity in wheel-track zones across all soil depths. (a) Soil bulk density increase (%) and (b) Porosity (%) in wheel-track zones under Non winch-assist and winch-assist treatments across all soil depths. Asterisks indicate statistically significant differences (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

인력만으로 이동을 가능하게 하여, 전체적인 토양 압축을 저감시키는 역할을 한다. 이는 Holzfeind et al. (2020)의 연구에서도 유사한 결과가 보고되었으며, 경사지 작업 시 토양 보전을 위한 효과적인 기계화 전략으로 간주될 수 있다.

2) 공극률 감소 완화 효과

공극률 지표에서도 주행보조원치 적용구에서 평균적으로 51%로, 미적용구(10%)에 비해 상대적으로 높은 값을 나타냈으며(Table 3), 주행보조원치 처리의 주 효과가 통계적으로 유의하였다($p < 0.05$). 깊이에 따라 유사한 경향이 관찰되었으나, 상호작용 효과는 유의하지 않았다. 이러한 결과는 주행보조원치가 깊이에 관계없이 일정 수준의 공극률 유지 효과를 발휘함을 의미하며[Figure 5(b)], 토양 구조의 안정화에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

공극률은 뿌리 성장, 수분 보유, 산소 공급 등 다양한 생물학적 기능과 직결되는 주요 토양 물리성 지표로, 토양의 건강성과 밀접한 관련이 있다. 실제로 Nazari et al.(2021)의 메타분석에서는 반복적인 기계 통행이 공극률을 장기적으로 감소시켜 토양 기능 저하로 이어질 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서 확인된 주행보조원치의 공극률 유지 효과는 이러한 부정적 영향을 완화할 수 있는 실질적 대안으로, 산림 기계화 작업에서의 생태적 안정성 확보에 기여할 수 있음을 시사한다.

3. 경사도별 주행보조원치의 효과 분석

1) 용적밀도 증가율에 대한 경사도별 효과

경사도 구간(완만 경사 $\leq 36\%$, 중간 경사 $36-45\%$, 급경사 $>45\%$)에 따른 주행보조원치의 영향을 분석한 결과, 모든 경사도 구간에서 주행보조원치 사용군은 미사용군 보다 용적밀도 증가율이 낮은 경향을 보였다[Figure 6(a)]. 그러나 One-way ANOVA 결과, 경사도 자체의 주효과와 주행보조원치 $\times$ 경사도 간의 상호작용은 통계적으로 유의하지 않았다 ($p > 0.05$). 이는 주행보조원치의 용적밀도 증가율 완화 효과가 경사도 구간에 따라 통계적으로 차이는 없지만, 다양한 경사 조건에서도 비교적 안정적인 성능을 유지할 수 있음을 의미한다.

경사도 구간별 처리 효과 분석(Figure 6)은 각 경사 구간 내에서 주행보조원치 적용 여부에 따른 차이를 독립표본 t-검정으로 비교한 것으로, 특정 지형 조건에서의 효과성을 정밀하게 평가하는 데 목적을 두었다. 반면, Table 2와 3은 전체 데이터를 통합적으로 고려하여, 주행보조원치의 적용 유무와 토양 깊이가 토양 물리성 변화에 미치는 주효과 및 상호작용 효과를 평가하고자 하였으며, 이를 위해 Two-way ANOVA를 활용하였다. 이처럼 두 분석은 각각 지형 조건별 반응 특성과 전반적인 경향 및 영향 요인을 규명하는 상이한 목적으로 가지고 수행되었으며, 주행보조원치의 효과를 다각도로 해석하는 데 상호보완적인 역할을 한다.

최근 연구에서도 주행보조원치가 경사지에서 토양 답압

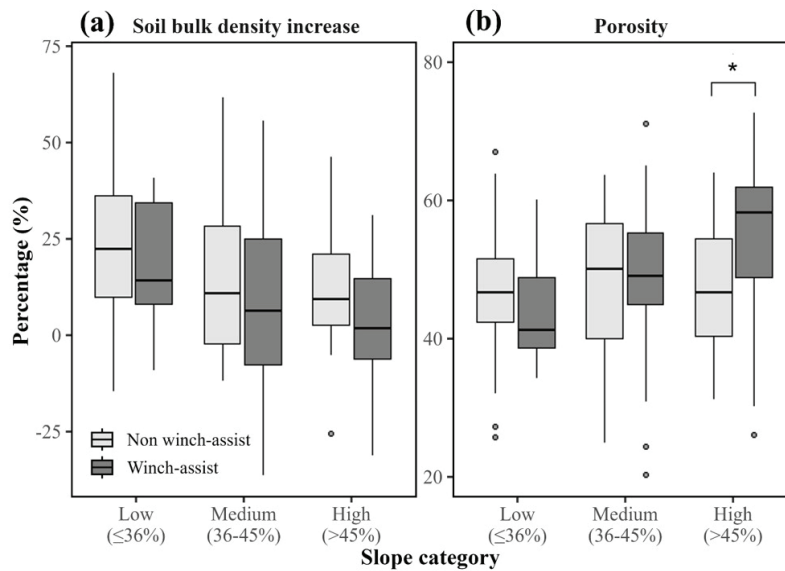


Figure 6. Effect of Winch-assist harvesting on soil bulk density increase and porosity under varying slope categories. (a) Soil bulk density increase (%) and (b) Porosity (%) in wheel-track zones under Non winch-assist and winch-assist treatments across three slope categories: Low ($\leq 36\%$), Medium (36–45%), and High ($> 45\%$). Asterisks indicate statistically significant differences ($*p < 0.05$, $**p < 0.01$).

을 완화하는 데 효과적이라는 결과가 보고되었다. Allman et al.(2024)은 27–52% 경사의 산림에서 임목생산 작업 시 주행보조원치를 적용한 경우, 미적용 조건에 비해 궤적 깊이 및 용적밀도 증가율이 유의하게 감소하였으며, 특히 급경사 구간에서 최대 22.3%까지 용적밀도 증가율이 억제되는 효과를 확인하였다. 또한, Garren et al.(2019)은 브라질 남동부의 급경사 지역에서 포워드 작업 시 주행보조원치를 적용하지 않았을 때 심층 답압이 심화된 반면, 주행보조원치를 적용하였을 때 용적밀도와 공극률이 유의하게 감소하였다고 보고하였다.

이러한 결과는 본 연구에서 확인된 경사도 전 구간에서의 완화 경향과 일치하며, 특히 급경사 구간에서 뚜렷한 답압 저감 효과와 일치한다. 따라서 주행보조원치는 경사도 조건에 관계없이 일정 수준의 토양 보호 기능을 수행할 수 있으며, 급경사 지역에서는 보다 확실한 효과를 기대할 수 있는 기계화 전략으로 활용 가능성이 높다.

2) 공극률에 대한 경사도별 효과

공극률의 경우, 경사도 구간에 따른 반응 차이가 명확히 드러났다. 급경사 구간($> 45\%$)에서는 주행보조원치 사용 시 공극률 감소가 유의하게 억제되었으며($p < 0.05$), 이는 미사용군 보다 토양 구조가 안정적으로 보존되었음을 의미한다[Figure 6(b)]. 반면 완만 경사 및 중간 경사 구간에서는 유의한 차이가 확인되지 않았다($p > 0.05$).

경사가 클수록 기계 하중이 토양의 일부 지점에 집중되

어 구조적 손상이 심화될 가능성이 크며, 이는 경사도 증가에 따라 공극률이 빠르게 감소한다는 기존 연구 결과와도 일치한다(Sensoy, 2024).

급경사 구간에 대해 독립표본 t-검정을 실시한 결과, 주행보조원치 사용군은 미사용군보다 유의하게 높은 공극률을 유지하고 있었으며($p < 0.05$), 이는 해당 지형 조건에서 주행보조원치 시스템이 실질적인 토양 보호 효과를 제공할 수 있음을 통계적으로 입증한다. 반면 완만-중간 경사에서는 유의한 차이가 나타나지 않아, 일정 경사도 이하에서는 주행보조원치의 효과가 제한적일 수 있음을 시사한다.

3) 주행보조원치 효과와 경사도의 연속적 관계 분석

경사도를 연속 변수로 간주하여 주행보조원치의 토양 보호 효과와의 관계를 분석하고자, 각 조사구의 평균 경사도를 기준으로 용적밀도 증가율 완화율과 공극률 보호율을 산출하고 Pearson 상관분석 및 단순 회귀 분석을 수행하였다.

그 결과, 용적밀도 증가율 및 완화율은 경사도와 음의 상관관계를 나타냈으며($r = -0.66$, $p < 0.01$), 공극률 보호율은 양의 상관관계($r = 0.67$, $p < 0.01$)를 보였다(Figure 7). 이는 경사도가 증가할수록 주행보조원치의 토양 보호 효과가 더욱 뚜렷해지는 경향이 있음을 보여준다.

이러한 분석은 경사도를 구간이 아닌 연속 변수로 해석했을 때 나타나는 추세이며 범주형 구간 분석에서는 전체적인 주효과 및 상호작용이 통계적으로 유의하지 않았던 결과와

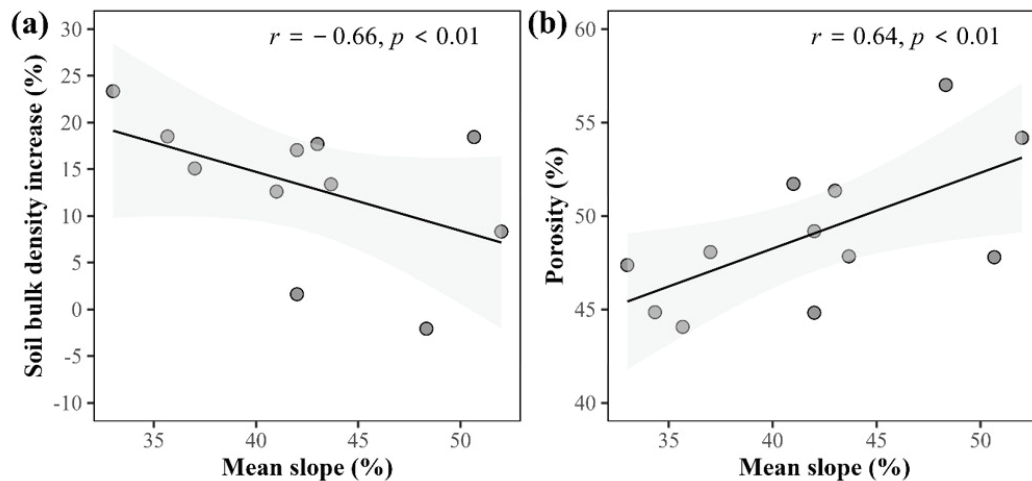


Figure 7. Correlation between mean slope and changes in soil physical properties after machine operation. (a) Significant negative correlation between mean slope and soil bulk density increase (%). (b) Significant positive correlation between mean slope and porosity (%). Shaded areas represent 95% confidence intervals.

는 다소 차이를 보인다. 즉, 경사도에 따른 주행보조원치의 효과는 모든 조건에서 일관되게 작용하기보다는 경사도가 큰 특정 조건에서 두드러지게 나타날 수 있음을 시사한다.

Solgi et al.(2019)은 스킵드 트레일의 곡선 구간에서 경사도가 클수록 토양 밀도 증가와 공극률 손실이 심화되는 경향을 보고하였으며, Solgi et al.(2020) 역시 경사도 조건이 토양 답압과 구조적 손상에 미치는 영향을 강조한 바 있다. 본 연구의 결과는 이러한 선행연구와 부합하며, 주행보조원치가 경사 증가에 따른 토양 물리성 악화를 효과적으로 완화할 수 있음을 실증적으로 제시한다.

따라서, 주행보조원치는 다양한 지형 조건에서도 일정 수준의 토양 보호 기능을 수행할 수 있으며, 특히 급경사지에서 효과성이 보다 확실하게 발휘될 가능성이 높다. 이러한 결과는 향후 목재수확작업 시 지형 조건을 고려한 기계화 전략 수립에 있어 유의미한 과학적 근거가 될 수 있다.

결론

국내 산림은 임목축적의 증가와 더불어 작업 효율성 및 안정성 확보의 중요성이 부각되면서, 고성능 임업기계를 활용한 기계화 작업이 확산되고 있다. 특히 경사지 작업에서 하베스터의 안전한 운용과 작업 반경 확보를 위해 주행보조원치의 도입이 확대되고 있으나, 이러한 장치가 토양 물리성 변화에 미치는 영향에 대해서는 실증적인 분석은 아직 미흡한 실정이다.

본 연구는 하베스터 작업 시 주행보조원치의 적용이 경사지에서 토양의 물리적 특성 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 연구 결과, 하베스터 단독 주행은 힐

트랙부에서 용적밀도 증가와 공극률 감소를 유발하였으나, 주행보조원치 적용 시 이러한 영향이 통계적으로 유의하게 완화되는 것으로 나타났다. 용적밀도 증가율은 평균 약 52.5% 감소하였고($p < 0.01$), 공극률 또한 주 효과 기준에서 유의하게 개선되었다($p < 0.05$). 특히 급경사 지역(>45%)에서는 공극률 유지 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 회귀분석 결과에서도 경사도가 높을수록 주행보조원치의 보호 효과가 증가하는 경향이 확인되었다.

다만, 경사도를 범주형 변수로 분석한 결과에서는 주행보조원치의 효과가 경사도에 따라 통계적으로 일관된 차이를 보이지 않았고, 일부 조건에서만 유의성이 나타나는 제한적 경향이 확인되었다. 이는 주행보조원치의 효과가 모든 지형에서 균일하게 발휘되기보다는, 경사도와 토양 특성 등 복합적인 환경 요인에 따라 달라질 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 주행보조원치는 임업 기계화 작업 중 토양 물리성 훼손을 완화할 수 있는 실질적 기술 대안으로 평가되며, 특히 급경사 지역에서는 작업 안정성 확보, 산림피해 저감형 기계화 전략 수립에 유용하게 활용될 수 있다. 향후에는 장기 반복 주행에 따른 누적 영향, 다양한 지형과 토양 조건에 따른 최적 적용 전략, 비용 대비 효과 분석 등 종합적인 후속 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 위탁연구과제(FO0200-2022-01-2023) 및 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00404388)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Adams, P.W. and Froehlich, H.A. 1981. Compaction of forest soils. Oregon State University, Extension Service. PNW-217.
- Allman, M., Dudáková, Z., Duchan, M., Jankovský, M. and Juško, V. 2024. Impact of winch-assisted logging machinery on soil disturbance in the mountainous forests of Western Carpathians. *Frontiers in Forests and Global Change* 7: 1464140.
- Brame, S. and Jimenez, J. 2019. Steep slope logging with ground-based cut to length equipment with a tether system on the Colville National Forest. USDA Forest Service Technical Report. Available online: <https://www.fs.usda.gov/> (accessed on April 28, 2024).
- Breinig, L., Hinte, B., Schönauer, M., Hoffmann, S., Brokmeier, H. and Jaeger, D. 2025. Traction Assistance of a Forwarder in Flat Terrain: Effects on Wheel Slip and Soil Disturbance. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 46(1): 1-17.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F. and Marchi, E. 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338: 124-138.
- Cavalli, R. and Amishev, D. 2019. Steep terrain forest operations—challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. *International Journal of Forest Engineering* 30(3): 175-181.
- Eliasson, L. and Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management* 252(1-3): 118-123.
- Fagundes, K.M. 2022. Assessing soil disturbance from tethered logging on steep slopes in Northern California. M.Sc. thesis, Cal Poly Humboldt, Arcata, CA, USA.
- Garren, A.M., Bolding, M.C., Aust, W.M., Moura, A.C. and Barrett, S.M. (2019). Soil disturbance effects from tethered forwarding on steep slopes in Brazilian eucalyptus plantations. *Forests* 10(9): 721.
- Green, P.Q., Chung, W., Leshchinsky, B., Belart, F., Sessions, J., Fitzgerald, S.A., Wimer, J.A., Cushing, T. and Garland, J.J. 2020. Insight into the productivity, cost and soil impacts of cable-assisted harvester-forwarder thinning in Western Oregon. *Forest Science* 66(1): 82-96.
- Holzfeind, T., Visser, R., Chung, W., Holzleitner, F. and Erber, G. 2020. Development and benefits of winch-assist harvesting. *Current Forestry Reports* 6(3): 201-209.
- Holzleitner, F., Kastner, M., Stampfer, K., Höller, N. and Kanzian, C. 2018. Monitoring cable tensile forces of winch-assist harvester and forwarder operations in steep terrain. *Forests* 9(2): 53.
- KFS (Korea Forest Service). 2024. 2024 Major Policy Plan of the Korea Forest Service. Available online: <https://www.forest.go.kr/> (accessed on March 20, 2024).
- Kim, I., Han, S. K., Acuna, M., Woo, H., Oh, J. H. and Choi, B. 2021. Effect of heavy machine traffic on soil CO2 concentration and efflux in a *Pinus Koraiensis* thinning stand. *Forests* 12(11): 1497.
- Kozłowski, T.T. 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(6): 596-619.
- Labelle, E.R. and Jaeger, D. 2011. Soil compaction caused by cut-to-length forest operations and possible short-term natural rehabilitation of soil density. *Soil Science Society of America Journal* 75(6): 2314-2329.
- Labelle, E.R., Hansson, L., Högbom, L., Jourgholami, M. and Laschi, A. 2022. Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: a comprehensive review. *Current Forestry Reports* 8(1): 20-37.
- Lee, E., Li, Q., Eu, S., Han, S.K. and Im, S. 2020. Assessing the impacts of log extraction by typical small shovel logging system on soil physical and hydrological properties in the Republic of Korea. *Heliyon* 6(3).
- Longepierre, M., Widmer, F., Keller, T., Weisskopf, P., Colombi, T., Six, J. and Hartmann, M. 2021. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. *ISME Communications* 1(1): 44.
- Makineci, E., Demir, M. and Yilmaz, E. 2007. Long-term harvesting effects on skid road in a fir (*Abies bornmulleriana* Mattf.) plantation forest. *Building and Environment* 42(3): 1538-1543.
- McMahon, S. and Evanson, T. 1994. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. *LIRO Report* 19(1): 8.
- McNabb, D.H., Startsev, A.D. and Nguyen, H. 2001. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 65(4): 1238-1247.
- Najafi, A., Solgi, A. and Sadeghi, S.H. 2010. Effects of skid trail slope and ground skidding on soil disturbance. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 8(1): 13-23.
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M.A., Bilyera, N. and Zamanian, K. 2021. Impacts of logging-associated compaction on forest soils:

- a meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change* 4: 780074.
- Nhindyasari, P.D., Maulanda, E., Setiawan, O., Sartohadi, J. and Pulungan, N.A.H. 2024. The Role of Slope Position on Soil Erosion Acceleration in the Tertiary-Quaternary Volcanic Landscape. *Ecological Engineering & Environmental Technology (EEET)*. 25(12).
- Page-Dumroese, D.S., Jurgensen, M.F., Tiarks, A.E., Ponder, Jr, F., Sanchez, F.G., Fleming, R.L., Kranabetter, J.M., Powers, R.F., Stone, D.M. and Scott, D.A. 2006. Soil physical property changes at the North American Long-Term Soil Productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. *Canadian Journal of Forest Research* 36(3): 551-564.
- Picchio, R., Mederski, P.S. and Tavankar, F. 2020. How and how much, do harvesting activities affect forest soil, regeneration and stands? *Current Forestry Reports* 6(2): 115-128.
- Ponder Jr, F. 2004. Soil compaction affects growth of young shortleaf pine following litter removal and weed control in the Missouri Ozarks. In *Proceedings of the 14th Central Hardwoods Forest Conference* 255-264.
- Sakai, H., Nordfjell, T., Suadiciani, K., Talbot, B. and Bøllehuus, E. 2008. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 29(1): 15-27.
- Sensoy, H. 2024. Impact of deforestation and erosion on some soil physicochemical properties and microbial activity on steep slopes. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 45(2): 305-318.
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Tavankar, F., Venanzi, R. and Picchio, R. 2019. Post-harvest evaluation of soil physical properties and natural regeneration growth in steep-slope terrains. *Forests* 10(11): 1034.
- Solgi, A., Naghdi, R., Zenner, E.K., Tsioras, P.A. and Hemmati, V. 2019. Effects of ground-based skidding on soil physical properties in skid trail switchbacks. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 40(2): 341-350.
- Solgi, A., Najafi, A., Page-Dumroese, D.S. and Zenner, E. K. 2020. Assessment of topsoil disturbance caused by different skidding machine types beyond the margins of the machine operating trail. *Geoderma* 367: 114238.
- Stirzaker, R.J., Passioura, J.B. and Wilms, Y. 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*. 185: 151-162.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. Soil quality test kit guide. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA.
- Visser, R. and Stampfer, K. 2015. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 36(2): 321-331.
- Visser, R.M. and Spinelli, R. 2023. Benefits and limitations of winch-assist technology for skidding operations. *Forests* 14(2): 296.
- Wang, M., He, D., Shen, F., Huang, J., Zhang, R., Liu, W., Zhu, M., Wang, L. and Zhou, Q. 2019. Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 22835-22845.

Manuscript Received : September 11, 2024

First Revision : April 21, 2025

Second Revision : May 9, 2025

Third Revision : June 9, 2025

Accepted : June 10, 2025