

ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Bülent AKGÜN



yaz
yayınları

**Orman Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Bülent AKGÜN

yaz
yayınları

2026

**Orman Mühendisliği Alanında Güncel
Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Bülent AKGÜN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5450-73-9

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Climate Change and The Physiology of Mediterranean Forest Trees: Drought, Heat, And Rising Co₂	1
<i>Bülent AKGÜN, Emre YAZAR</i>	
Heyelan Duyarlılık Haritalamada Güncel Gelişmeler: Dünya ve Türkiye Örnekleri	21
<i>Ender BUĞDAY</i>	
Ahşap Bazlı Kompozit Panellerde Sürdürülebilirlik ve İnovasyon.....	38
<i>Celal UĞUR</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

CLIMATE CHANGE AND THE PHYSIOLOGY OF MEDITERRANEAN FOREST TREES: DROUGHT, HEAT, AND RISING CO₂

Bülent AKGÜN^{1*}

Emre YAZAR²

1. INTRODUCTION

The Mediterranean Basin is a climate change hotspot (Giorgi, 2006): the region has warmed more than the global average, and precipitation is projected to decline (Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change [MedECC], 2020). Mediterranean trees are adapted to summer drought, but droughts are now accompanied by higher temperatures, a combination termed hotter drought (Allen et al., 2015), and drought- and heat-induced tree mortality has been documented in forests worldwide (Allen et al., 2010; Hammond et al., 2022).

Whether a stand grows, declines, or dies under a given climate depends largely on physiological processes: the regulation of water loss, the vulnerability of the water transport system, and carbon assimilation and its use for growth, storage, and defense (McDowell et al., 2008). This chapter reviews how these processes respond to drought, heat, and rising CO₂ in Mediterranean forest trees. We pay particular attention to the eastern Mediterranean and Türkiye, where physiological

¹ Asst. Prof. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye, ORCID: 0000-0002-8236-3280. (*Corresponding)

² Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Graduate Education Institute, Department of Bioengineering and Sciences, Kahramanmaraş, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0249-0798.

evidence is sparse compared with the western part of the basin. We report contradictory findings as such, and statements that data are lacking refer to the literature we located through online searches in English and Turkish up to October 2026.

2. THE CHANGING CLIMATE OF THE MEDITERRANEAN BASIN

Basin-wide annual mean temperature is now 1.54 °C above the level of 1860–1890, 0.4 °C above the global average increase, and the region is expected to continue warming faster than the globe, by about 20% over the year and by about 50% in summer (MedECC, 2020). In Türkiye, areal precipitation in 2025 was 414.9 mm, 27.6% below the 1991–2020 average and the lowest in 61 years, and a new national temperature record of 50.5 °C was set (Turkish State Meteorological Service [TSMS], 2026).

For trees, warming matters not only through the soil water balance but also through the air's evaporative demand. Saturation vapor pressure rises exponentially with temperature (Allen et al., 1998), so that the vapor pressure deficit (VPD) increases even when relative humidity is unchanged (Figure 1A). At 30 °C and 40% relative humidity, warming by 2 °C raises VPD by 12% if relative humidity is conserved and by 20% if the air's water vapor content stays constant.

Global data sets show that VPD has risen sharply since the late 1990s, with increasing trends over 53–64% of the vegetated area (Yuan et al., 2019). Stomatal conductance declines with the logarithm of VPD, with a sensitivity proportional to the conductance at low VPD (Oren et al., 1999). As the air dries, transpiration therefore increases less than proportionally and eventually levels off, while carbon uptake is progressively restricted (Figure 1B; Grossiord et al., 2020).

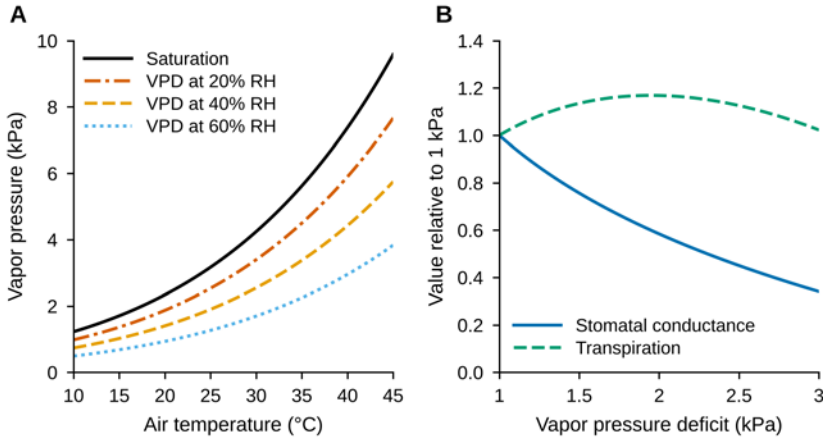


Figure 1. Atmospheric drought and stomatal response (authors' calculation). (A) Saturation vapor pressure, calculated as $0.6108 \exp[17.27T/(T + 237.3)]$ kPa for air temperature T in °C (Allen et al., 1998), and vapor pressure deficit (VPD) at three levels of relative humidity (RH). (B) Stomatal conductance relative to its value at a VPD of 1 kPa, following the relationship $1 - 0.6 \ln(\text{VPD})$ reported for a large range of mesic species (Grossiord et al., 2020; Oren et al., 1999), and the resulting relative transpiration (conductance $\times$ VPD, assuming equal leaf and air temperature). The relationship is shown up to 3 kPa only and should not be extrapolated to the highest VPD of panel A.

3. WATER RELATIONS AND HYDRAULIC FUNCTION

Stomatal closure is among the earliest responses to water deficit. A meta-analysis combined with a hydraulic model indicates that stomata must close before embolism forms to avoid rapid death; the margin between the two thresholds widens with increasing embolism resistance (Martin-StPaul et al., 2017). Under heat, this sequence can break down. Trees of *Quercus ilex* and *Quercus coccifera* kept a low but positive stomatal

conductance while water potential passed embolism thresholds (Gauthey et al., 2024).

In a natural mixed stand in Türkiye, *Pinus brutia* and Anatolian black pine (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*) both reached their lowest midday water potential in August, and the authors judged black pine the more sensitive to summer drought (Deligöz & Cankara, 2020). A contrast between strategies was found in container-grown seedlings under imposed drought in Kahramanmaraş, where the non-native *Ailanthus altissima* restricted stomatal conductance and kept midday water potential above -1.9 MPa, whereas *Crataegus orientalis* sustained gas exchange down to -5.0 MPa (Akgün et al., 2026).

The water potential at which 50% of hydraulic conductivity is lost (Ψ_{50}) summarizes the xylem's resistance to embolism, and the distance between the water potentials a species experiences and this threshold is its hydraulic safety margin. Worldwide, 70% of 226 forest species operate with safety margins narrower than 1 MPa (Choat et al., 2012). Table 1 lists published values for Mediterranean trees. Across 40 conifer species, Ψ_{50} ranges from -2.9 to -11.3 MPa (Delzon et al., 2010); the Ψ_{50} values listed in Table 1 for Mediterranean pines and Atlas cedar (*Cedrus atlantica*), -2.8 to -6.0 MPa, lie in the less resistant half of this range. In contrast, *Juniperus drupacea*, sampled on Mount Hermon, had a Ψ_{50} of -11.8 MPa (Larter et al., 2024). However, values depend on method and material. Researchers obtain vulnerability curves by dehydrating cut branches on the bench, forcing pressurized air into the xylem (air injection), or spinning stem segments in a centrifuge (Cavitron), and the three methods do not always agree. For the same four provenances of *Pinus halepensis*, the Cavitron gave estimates about 1 MPa more negative than bench dehydration (David-Schwartz et al., 2016).

Table 1. Published estimates of xylem vulnerability to embolism (Ψ_{50}) for Mediterranean trees

Species	Ψ_{50} (MPa)	Method and material	Source
<i>Cedrus atlantica</i>	-3.8	Air injection; twigs of seedlings	Froux, Huc, Ducrey, and Dreyer (2002)
<i>Cedrus atlantica</i>	-4.4; -6.0 after moderate drought	Young plants; method not given in the abstract	Ladjal, Huc, and Ducrey (2005)
<i>Juniperus drupacea</i>	-11.8	Cavitron; branches of five trees	Larter et al. (2024)
<i>Pinus halepensis</i>	-4.9	Air injection; twigs of seedlings	Froux et al. (2002)
<i>Pinus halepensis</i>	-5.0 to -5.5	Cavitron; branches of mature trees of four provenances	David-Schwartz et al. (2016)
<i>Pinus halepensis</i>	-3.6 to -4.5	Bench dehydration; same provenances and trial	David-Schwartz et al. (2016)
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>nigricans</i>	-2.8	Air injection; twigs of seedlings	Froux et al. (2002)
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	About -6	Native embolism of about 50% at this water potential; potted 14-year-old plants	Peguero-Pina, Mendoza-Herrer, Gil-Pelegrín, and Sancho-Knapik (2018)

Note. Ψ_{50} = xylem water potential causing 50% loss of hydraulic conductivity. Values obtained with different methods and plant material are not directly comparable.

Vulnerability can also be plastic. Ψ_{50} of *C. atlantica* shifted from -4.4 to -6.0 MPa after moderate drought (Ladjal et al., 2005). In *Q. ilex*, stomata are reported to close at about -3 MPa, well before the roughly -6 MPa at which half of the conductivity is lost; in potted plants dried to that level, about 50% of the conductivity was indeed lost, and the embolism limited the recovery of gas exchange after rewatering (Peguero-Pina et al., 2018). We found no vulnerability curve measured on Anatolian provenances of *P. brutia*, *P. nigra* subsp. *pallasiana*, *Juniperus excelsa*, or *Abies cilicica*, which together with *Cedrus libani* are the characteristic conifers of Mediterranean Anatolia; for *J. excelsa*, the closest value we found is -8.7 MPa for *Juniperus seravschanica* from Uzbekistan, a taxon that Larter et al. (2024)

equate with *J. excelsa* subsp. *polycarpus*. For *C. libani*, the evidence comes from young plants. In *C. libani* (a Lebanese and a Turkish provenance) and *Cedrus brevifolia*, conductivity declined sharply only between -6.4 and -7.5 MPa (Ladjal et al., 2005).

In *Q. ilex*, long-term partial rainfall exclusion changed stand structure more than leaf physiology. In a forest in southern France, excluding 29% of the precipitation input reduced annual transpiration by 23% and canopy leaf area by 18% (Limousin et al., 2009). Photosynthetic parameters maintained the same relationships with leaf water potential in both treatments; leaf area index, leaf mass per area, and leaf chemistry changed (Limousin et al., 2010).

4. CARBON ASSIMILATION, HEAT, AND RISING CO₂

In *Q. ilex*, light-saturated assimilation, stomatal and mesophyll conductance, and the capacities for carboxylation and electron transport all declined markedly with soil water limitation in summer (Limousin et al., 2010). Because stomatal closure lowers chloroplast CO₂ concentration while warming favors Rubisco's oxygenase reaction, the share of assimilated carbon lost to photorespiration rises under hot, dry conditions; Yazar (2026) quantified its dependence on chloroplast CO₂ and temperature. For *P. brutia* and *P. nigra* subsp. *pallasiana* in Türkiye, photorespiration and drought-induced stomatal closure together reduced net primary production from a radiation-limited potential of 5.61 to 3.46 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ (Yazar et al., 2026).

Site means of the critical temperature at which photosystem II is disrupted range from 41.5 °C at an Arctic site to 50.8 °C in tropical lowland forest, and thermal safety margins, the distance between this limit and the leaf temperatures reached,

are narrowest at mid-latitudes (O’Sullivan et al., 2017). In three European oaks, including *Q. ilex* and *Q. coccifera*, the critical temperature averaged 54.7 °C, more than any site mean of the global survey; canopies warmed up to 10 °C above the air when photosynthesis ceased, but safety margins stayed positive at air temperatures of up to 42 °C (Gauthey et al., 2024). Water deficit narrows the margin because leaves that transpire less cool less. In a greenhouse experiment with imposed heat waves, drought-stressed plants of 20 broadleaf evergreen species had smaller thermal safety margins and more crown dieback (Marchin et al., 2022). The tolerance limit itself is not fixed. Seedlings of a Turkish provenance of *C. libani* were more thermotolerant than those of a French provenance of *C. atlantica*, and drought raised the temperature at which photosystem II efficiency collapsed by more than 3 °C (Epron, 1997). We found no such measurements on *P. brutia*, *J. excelsa*, *A. cilicica*, or Anatolian black pine.

Rising CO₂ increases intrinsic water-use efficiency (iWUE). Across 47 sites in five biomes, iWUE derived from tree-ring isotopes rose by 20.5% in 40 years without a significant overall increase in growth (Peñuelas et al., 2011). One explanation is that stem growth can be limited by water and temperature before it is limited by carbon: in a *Q. ilex* coppice, stem increment stopped below a predawn water potential of -1.1 MPa while carbon uptake continued, and annual stem growth was predicted by the duration of growth in spring and not by carbon supply (Lempereur et al., 2015). The carbon balance of a stand and the increment of its stems are therefore different quantities, and a calculated loss of primary production need not translate proportionally into lost wood growth.

5. GROWTH AND DROUGHT LEGACIES

Tree rings record the cumulative outcome. Growth responses to drought are described by resistance (the growth maintained during a drought), recovery (the increase afterward), and resilience (the return to the earlier level), and by legacy effects, the deficits that persist after the drought. A global analysis of 1,338 sites found legacy effects lasting 1–4 years (Anderegg et al., 2015), and crown defoliation on monitoring plots in Türkiye carried legacies of at least 2 years (Dogan Ciftci et al., 2024); the data sets differ in period, region, and variable. Resilience has predictive value. Across 118 sites, trees that later died were less resilient to earlier droughts than surviving neighbors, with lower resistance in angiosperms and slower recovery in gymnosperms (DeSoto et al., 2020). On Samos in the eastern Aegean, rainfall declined after the late 1970s and the radial increment of *P. brutia* fell to its lowest level in a century; growth came to depend on rainfall integrated over 5–6 years, and many low-elevation pines died in 2000 (Sarris et al., 2007).

6. DIEBACK, MORTALITY, AND INTERACTING DISTURBANCES

Drought kills trees through the interdependent failure of water transport and carbon supply, often amplified by biotic agents (Figure 2; McDowell et al., 2008). Across species, hydraulic failure was ubiquitous at death, with at least 60% loss of xylem conductivity in all species. In contrast, depletion of carbohydrate reserves was not universal and was more common in gymnosperms (Adams et al., 2017).

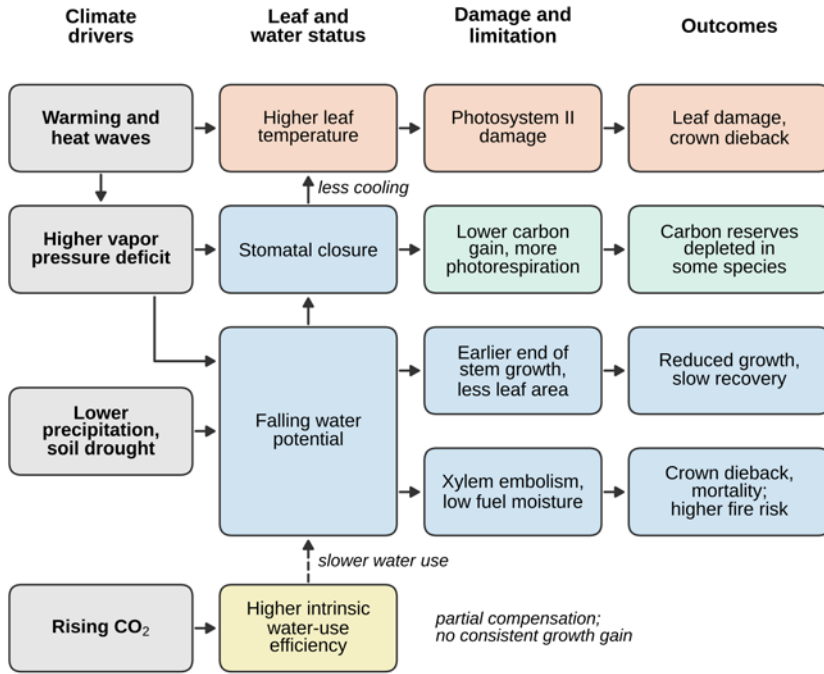


Figure 2. Pathways from climate drivers to tree and stand responses in Mediterranean forests (original conceptual diagram summarizing the literature reviewed in this chapter). Solid arrows show the direction of influence; the dashed arrow indicates partial compensation. Falling water potential is the direct effect of soil and atmospheric drought; stomatal closure is the response that slows it, at the cost of carbon gain and leaf cooling.

A global review compiled 88 episodes of drought- and heat-induced mortality since 1970 (Allen et al., 2010). A later database of 1,303 plots indicates that the climatic conditions associated with mortality would become 22% more frequent with 2 °C and 140% more frequent with 4 °C of warming (Hammond et al., 2022). In the semi-arid Yatir forest in Israel, drought years killed 5–10% of the *P. halepensis* trees; visibly stressed trees had lower predawn water potentials in the dry season (−2.8 against −2.3 MPa) and narrower rings for 15–20 years before death. Survival was associated with higher rock cover and soil stoniness

(Preisler et al., 2019). Fire links physiology to disturbance because live fuel moisture follows plant water status; in a Mediterranean mixed forest, predawn water potential predicted it better than two drought indices (Nolan et al., 2018).

7. EASTERN MEDITERRANEAN AND TÜRKİYE: EVIDENCE AND KNOWLEDGE GAPS

In Türkiye, forests covered 22.9 million ha in 2020, or 29.4% of the country's area. By principal tree species, oaks accounted for 29.4% of the forest area, *P. brutia* for 22.7%, *P. nigra* for 18.3%, *Fagus orientalis* for 8.2%, junipers for 6.4%, *Pinus sylvestris* for 6.1%, firs for 2.2%, and *C. libani* for 1.8% (Orman Genel Müdürlüğü [OGM], 2021). The physiological basis for judging the future of these forests is thin. Tree rings add the long-term view. In the Boz Mountains of western Türkiye, *P. brutia* was the most climate-sensitive of three conifers and was limited by winter and July precipitation, while planted *C. libani* showed a positive growth trend (Güney et al., 2025). This ranking by climate sensitivity of ring width differs from the physiological ranking of Deligöz and Cankara (2020), in which black pine was the more drought-sensitive species; the two measures describe different properties. In the Taurus Mountains, *C. libani* was less limited by summer drought and recovered faster from water deficit than co-occurring *J. excelsa* (Güney et al., 2020). Across 277 monitoring plots in Türkiye, defoliation in most species was more strongly related to temperature than to precipitation (Dogan Ciftci et al., 2024).

Several gaps stand out. Apart from *C. libani*, we found no xylem vulnerability curves or thermal tolerance limits for Anatolian provenances of the dominant conifers. We are not aware of a long-term rainfall-exclusion or CO₂-enrichment

experiment in an eastern Mediterranean forest. For the dry periods after 1990, drought-related dieback has been reported in Türkiye for black pine, *P. sylvestris*, and firs in Central Anatolia, for *P. brutia* in the Aegean region, and for *P. sylvestris* and *Picea orientalis* in the Black Sea region (reviewed by Tüfekçioğlu & Tüfekçioğlu, 2018), and a mortality episode in Central Anatolia in 2002–2007 is listed in the global overview of Allen et al. (2010). Neither source reports physiological measurements; the conference reports on which the Central Anatolian records rest were not available to us. Filling these gaps requires coordinated measurements of water potential, hydraulic traits, gas exchange, and growth at permanent sites along the aridity gradient from the Mediterranean coast to Central Anatolia.

8. ADAPTATION AND MANAGEMENT IMPLICATIONS

Physiological knowledge translates into a limited number of management options. Reducing stand density lowers competition for water. In declining *P. halepensis* stands in Israel, annual mortality was 0.2% after intense thinning, 2% after moderate thinning, and 5% in the control (Calev et al., 2016), and precommercial thinning improved midday water potential and gas exchange in young Anatolian black pine over three growing seasons, although the authors warned that the wider spacing (3–3.5 m) might be detrimental in extremely dry years (Deligöz et al., 2019). Seed source matters: in a common-garden test with three-year-old seedlings of *P. brutia* families from Türkiye, inland populations suffered, on average, less drought damage than coastal ones (Kandemir et al., 2017). On degraded karst in southern Türkiye, *C. libani* plantations generally had higher soil organic carbon and microbial biomass than an unplanted reference site (Babur et al., 2026).

9. CONCLUSION

Mediterranean forest trees face a climate in which soil drought, atmospheric drought, and heat increasingly coincide. Their first line of defense, stomatal closure, slows the drop in water potential at the cost of carbon gain and leaf cooling, and under extreme heat it may not hold; what follows depends on xylem vulnerability and the capacity to adjust leaf area. Rising CO₂ has increased water-use efficiency without a consistent gain in growth, probably because stem growth is often limited by water and temperature before carbon supply limits it. Reduced growth, slow recovery, canopy dieback, and mortality form a sequence, and low plant water status raises fire risk.

For the eastern Mediterranean and Türkiye, the main conclusion is that the evidence does not yet match the scale of the forests at risk. Tree-ring studies identify drought-sensitive species and sites, but for Anatolian provenances of *P. brutia*, black pine, *J. excelsa*, and *A. cilicica*, we found few or no published values of the traits needed for mechanistic prediction, especially xylem vulnerability and thermal tolerance. Measuring these traits, establishing manipulative experiments, and monitoring mortality alongside climate would reduce uncertainty in forest projections and give silviculture a physiological basis for thinning, species choice, and seed transfer.

REFERENCES

- Adams, H. D., Zeppel, M. J. B., Anderegg, W. R. L., Hartmann, H., Landhäusser, S. M., Tissue, D. T., . . . McDowell, N. G. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*, 1(9), 1285–1291. doi:10.1038/s41559-017-0248-x
- Akgün, B., Yazar, E., Buğday, Ö., Battaglia, M., & Babur, E. (2026). Contrasting water-use strategies of *Ailanthus altissima* and *Crataegus orientalis* under drought stress reveal restoration potential in Mediterranean drylands. *Water*, 18(16), 1952. doi:10.3390/w18161952
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1–55. doi:10.1890/es15-00203.1
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., . . . Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>
- Anderegg, W. R. L., Schwalm, C., Biondi, F., Camarero, J. J., Koch, G., Litvak, M., . . . Pacala, S. (2015). Pervasive

- drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 349(6247), 528–532. doi:10.1126/science.aab1833
- Babur, E., Yalçıntaş, B., Ünsal, Y. T., Kezik, U., Akgün, B., & Yazar, E. (2026). Soil carbon and microbial functioning reveal multidimensional patterns across a *Cedrus libani* afforestation chronosequence in Mediterranean karst. *Biology*, 15(18), 1594. doi:10.3390/biology15181594
- Calev, A., Zoref, C., Tzukerman, M., Moshe, Y., Zangy, E., & Osem, Y. (2016). High-intensity thinning treatments in mature *Pinus halepensis* plantations experiencing prolonged drought. *European Journal of Forest Research*, 135(3), 551–563. doi:10.1007/s10342-016-0954-y
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., . . . Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752–755. doi:10.1038/nature11688
- David-Schwartz, R., Paudel, I., Mizrachi, M., Delzon, S., Cochard, H., Lukyanov, V., . . . Cohen, S. (2016). Indirect evidence for genetic differentiation in vulnerability to embolism in *Pinus halepensis*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 768. doi:10.3389/fpls.2016.00768
- Deligöz, A., Bayar, E., Karatepe, Y., & Genç, M. (2019). Photosynthetic capacity, nutrient and water status following precommercial thinning in Anatolian black pine. *Forest Ecology and Management*, 451, 117533. doi:10.1016/j.foreco.2019.117533
- Deligöz, A., & Cankara, F. G. (2020). Differences in physiological and biochemical responses to summer drought of *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* and *Pinus brutia*

- in a natural mixed stand. *Journal of Forestry Research*, 31(5), 1479–1487. doi:10.1007/s11676-018-00876-8
- Delzon, S., Douthe, C., Sala, A., & Cochard, H. (2010). Mechanism of water-stress induced cavitation in conifers: Bordered pit structure and function support the hypothesis of seal capillary-seeding. *Plant, Cell & Environment*, 33(12), 2101–2111. doi:10.1111/j.1365-3040.2010.02208.x
- DeSoto, L., Cailleret, M., Sterck, F., Jansen, S., Kramer, K., Robert, E. M. R., . . . Martínez-Vilalta, J. (2020). Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nature Communications*, 11(1), 545. doi:10.1038/s41467-020-14300-5
- Dogan Ciftci, N., Şahin, A. D., Yousefpour, R., & Christen, A. (2024). Effects of climate trends and variability on tree health responses in the Black Sea and Mediterranean forests of Türkiye. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(5), 3969–3991. doi:10.1007/s00704-024-04853-6
- Epron, D. (1997). Effects of drought on photosynthesis and on the thermotolerance of photosystem II in seedlings of cedar (*Cedrus atlantica* and *C. libani*). *Journal of Experimental Botany*, 48(10), 1835–1841. doi:10.1093/jxb/48.10.1835
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M., & Dreyer, E. (2002). Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annals of Forest Science*, 59(4), 409–418. doi:10.1051/forest:2002015
- Gauthey, A., Kahmen, A., Limousin, J.-M., Vilagrosa, A., Didion-Gency, M., Mas, E., . . . Grossiord, C. (2024). High heat tolerance, evaporative cooling, and stomatal

- decoupling regulate canopy temperature and their safety margins in three European oak species. *Global Change Biology*, 30(8), e17439. doi:10.1111/gcb.17439
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), L08707. doi:10.1029/2006gl025734
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., . . . McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. doi:10.1111/nph.16485
- Güney, A., Erkan, T., Oğlakcı, R., & Özer, E. (2025). Climate-growth relationships and growth trends of *Cedrus libani*, *Pinus brutia*, and *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* in the Boz Mountains (Western Türkiye). *Turkish Journal of Forestry*, 26(2), 137–147. doi:10.18182/tjf.1508195
- Güney, A., Zweifel, R., Türkan, S., Zimmermann, R., Wachendorf, M., & Güney, C. O. (2020). Drought responses and their effects on radial stem growth of two co-occurring conifer species in the Mediterranean mountain range. *Annals of Forest Science*, 77(4), 105. doi:10.1007/s13595-020-01007-2
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., . . . Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. doi:10.1038/s41467-022-29289-2
- Kandemir, G., Önde, S., Temel, F., & Kaya, Z. (2017). Population variation in drought resistance and its relationship with adaptive and physiological seedling traits in Turkish red

pine (*Pinus brutia* Ten.). *Turkish Journal of Biology*, 41(2), 256–267. doi:10.3906/biy-1608-77

- Ladjal, M., Huc, R., & Ducrey, M. (2005). Drought effects on hydraulic conductivity and xylem vulnerability to embolism in diverse species and provenances of Mediterranean cedars. *Tree Physiology*, 25(9), 1109–1117. doi:10.1093/treephys/25.9.1109
- Larter, M., Akhmedov, A., Payne, C., Delzon, S., & Klein, T. (2024). High and variable hydraulic resistance to embolism among three Asian juniper species. *Journal of Plant Hydraulics*, 10(1), 2. doi:10.20870/jph.2024.2
- Lempereur, M., Martin-StPaul, N. K., Damesin, C., Joffre, R., Ourcival, J.-M., Rocheteau, A., & Rambal, S. (2015). Growth duration is a better predictor of stem increment than carbon supply in a Mediterranean oak forest: Implications for assessing forest productivity under climate change. *New Phytologist*, 207(3), 579–590. doi:10.1111/nph.13400
- Limousin, J.-M., Misson, L., Lavoie, A.-V., Martin, N. K., & Rambal, S. (2010). Do photosynthetic limitations of evergreen *Quercus ilex* leaves change with long-term increased drought severity? *Plant, Cell & Environment*, 33(5), 863–875. doi:10.1111/j.1365-3040.2009.02112.x
- Limousin, J.-M., Rambal, S., Ourcival, J.-M., Rocheteau, A., Joffre, R., & Rodriguez-Cortina, R. (2009). Long-term transpiration change with rainfall decline in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Global Change Biology*, 15(9), 2163–2175. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01852.x
- Marchin, R. M., Backes, D., Ossola, A., Leishman, M. R., Tjoelker, M. G., & Ellsworth, D. S. (2022). Extreme heat

- increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. *Global Change Biology*, 28(3), 1133–1146. doi:10.1111/gcb.15976
- Martin-StPaul, N., Delzon, S., & Cochard, H. (2017). Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology Letters*, 20(11), 1437–1447. doi:10.1111/ele.12851
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., . . . Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x
- Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change. (2020). *Climate and environmental change in the Mediterranean Basin – Current situation and risks for the future. First Mediterranean assessment report* (W. Cramer, J. Guiot, & K. Marini, Eds.). Marseille, France: Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP. doi:10.5281/zenodo.4768833
- Nolan, R. H., Hedo, J., Arteaga, C., Sugai, T., & Resco de Dios, V. (2018). Physiological drought responses improve predictions of live fuel moisture dynamics in a Mediterranean forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 417–427. doi:10.1016/j.agrformet.2018.09.011
- Oren, R., Sperry, J. S., Katul, G. G., Pataki, D. E., Ewers, B. E., Phillips, N., & Schäfer, K. V. R. (1999). Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant, Cell & Environment*, 22(12), 1515–1526. doi:10.1046/j.1365-3040.1999.00513.x

- Orman Genel Müdürlüğü. (2021). *Türkiye orman varlığı 2020* [Forest resources of Türkiye 2020]. Ankara, Türkiye: Author. Retrieved from <https://www.ogm.gov.tr/tr/ormanlarimiz-sitesi/TurkiyeOrmanVarligi/Yayinlar/2020%20T%C3%BCrkiye%20Orman%20Varl%C4%B1%C4%9F%C4%B1.pdf>
- O’Sullivan, O. S., Heskel, M. A., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Weerasinghe, L. K., Penillard, A., . . . Atkin, O. K. (2017). Thermal limits of leaf metabolism across biomes. *Global Change Biology*, 23(1), 209–223. doi:10.1111/gcb.13477
- Peguero-Pina, J. J., Mendoza-Herrer, Ó., Gil-Pelegrín, E., & Sancho-Knapik, D. (2018). Cavitation limits the recovery of gas exchange after severe drought stress in holm oak (*Quercus ilex* L.). *Forests*, 9(8), 443. doi:10.3390/f9080443
- Peñuelas, J., Canadell, J. G., & Ogaya, R. (2011). Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4), 597–608. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00608.x
- Preisler, Y., Tatarinov, F., Grünzweig, J. M., Bert, D., Ogée, J., Wingate, L., . . . Yakir, D. (2019). Mortality versus survival in drought-affected Aleppo pine forest depends on the extent of rock cover and soil stoniness. *Functional Ecology*, 33(5), 901–912. doi:10.1111/1365-2435.13302
- Sarris, D., Christodoulakis, D., & Körner, C. (2007). Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biology*, 13(6), 1187–1200. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01348.x

- Tüfekçioğlu, A., & Tüfekçioğlu, M. (2018). Kuraklık ve orman ekosistem dinamikleri etkileşimi [Forest ecosystems and drought interactions]. *Turkish Journal of Forestry*, 19(1), 103–108. doi:10.18182/tjf.342931
- Turkish State Meteorological Service. (2026). *The state of Türkiye's climate 2025*. Ankara, Türkiye: Author. Retrieved from https://emcc.mgm.gov.tr/files/State_of_the_Climate_in_Turkey_in_2025.pdf
- Yazar, E. (2026). Photorespiratory flux in C₃ plants: A meta-analysis of FvCB model fits to published A–Cc and A–PAR data across crop and forest species. *Turkish Journal of Forest Science*, 10(1), 1943941. doi:10.32328/turkjforsci.1943941
- Yazar, E., Akgün, B., & Babur, E. (2026). Quantifying carbon losses associated with photorespiration and drought stress in two dominant Mediterranean pine species. *Plants*, 15(16), 2527. doi:10.3390/plants15162527
- Yuan, W., Zheng, Y., Piao, S., Ciais, P., Lombardozzi, D., Wang, Y., . . . Yang, S. (2019). Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 5(8), eaax1396. doi:10.1126/sciadv.aax1396

HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMADA GÜNCEL GELİŞMELER: DÜNYA VE TÜRKİYE ÖRNEKLERİ

Ender BUĞDAY¹

1. GİRİŞ

Heyelan, küresel ölçekte can ve mal kayıplarına yol açan, ekonomik ve sosyal sonuçları bakımından en yıkıcı doğal afetler arasında yer almaktadır. Tayebi ve ark. (2024) tarafından derlenen küresel çalışma, heyelanların iklim değişikliği ve artan insan kaynaklı baskılarla birlikte giderek daha şiddetli insanlara zarar veren bir hal aldığını ortaya koymaktadır. Emberson & Kirschbaum (2022), yağış tetikli heyelanları kapsayan büyük ölçekli küresel bir literatür üzerinde gerçekleştirdikleri topoğrafik analiz çalışmasında, heyelan olaylarının coğrafi ve iklimsel dağılımında belirgin örüntüler saptamış ve bu örüntülerin duyarlılık modellerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunduğunu aktarmıştır. Wang & Wang (2023) ise ılımlı iklim değişikliği senaryosu altında küresel heyelan riskini değerlendirmiş ve önümüzdeki yıllarda risk düzeyinin belirgin biçimde artacağını öngörmüştür.

Heyelan duyarlılık haritalaması (HDH), bir bölgedeki heyelan riskini değerlendirmek için bir çalışma alanındaki heyelan oluşum olasılığının mekânsal dağılımını tahmin etmeyi amaçlayan ve afet risk yönetiminin temel araçlarından biri konumundaki uygulamalı bir yaklaşımdır. Son beş yılda bu alandaki bilimsel üretim çarpıcı bir ivme kazanmış, makine

¹ Prof. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Orman İnşaatı ve Transportu Anabilim Dalı, ORCID: 0002-3054-1516

öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nde ve sayısal haritaların oluşturulmasındaki dinamikliği ile heyelan araştırma gündeminin merkezine yerleşmiştir. Liu ve ark. (2023), makine öğrenmesi tabanlı HDH yöntemlerini kapsamlı biçimde derleyerek bu alandaki metodolojik dönüşümün boyutlarını sistematik olarak ortaya koymuştur.

Türkiye, topoğrafik yapısı, jeolojik çeşitliliği ve yağış rejimi nedeniyle heyelan riski yüksek ülkeler arasında yer almaktadır. Doğu Karadeniz başta olmak üzere çeşitli bölgelerde her yıl tekrarlayan heyelan olayları hem altyapıyı hem de orman ekosistemlerini ciddi ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmanın amacı, son beş yılda (2020-2025) küresel ve Türkiye ölçeğinde gerçekleştirilen HDH çalışmalarını sistematik biçimde ele alarak tetikleyici faktörler, yöntemsel yaklaşımlar, iklim değişikliğinin yansımaları ve erken uyarı sistemleri gibi başlıklarda güncel bilgi birikimini sunmaktır.

2. HEYELAN TETİKLEYİCİ FAKTÖRLER VE KÜRESEL DAĞILIM

2.1. Doğal Tetikleyiciler

Heyelanlar, tek bir etkenin değil birden fazla faktörün eş zamanlı etkisiyle ortaya çıkan karmaşık jeomorfik süreçlerdir. Yağış, en yaygın tetikleyici faktör olup özellikle kısa süreli yüksek şiddetli yağışlar ile uzun süreli birikimli yağışlar heyelan olasılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Emberson & Kirschbaum (2022), küresel ölçekteki yağış tetikli heyelan literatürünü topoğrafik özellikler açısından analiz etmiş ve eğim gradyanı, rölyef ve drenaj yoğunluğunun yağış tetikleme heyelan lokasyonlarının belirlenmesinde kritik değişkenler olduğunu göstermiştir. Tsunetaka ve ark. (2024), iklim modeli projeksiyonlarını Japonya'daki heyelan tetikleme riski

bağlamında değerlendirmiş; yüzyılın sonuna dek tetikleyici potansiyeli yüksek yağış olaylarının sıklık ve coğrafi yaygınlık bakımından artacağını ortaya koymuştur.

Deprem, büyük ölçekli heyelanların önemli bir tetikleyicisi olarak öne çıkmakta; dünya genelinde pek çok yıkıcı heyelan olayında belirleyici rol üstlenmektedir. Kar erimesi ise Alp ve benzeri dağlık topografyalarda bahar aylarındaki heyelan oluşumuna katkıda bulunan ikincil bir etkidir. Araújo & Ramos (2022), iklim değişikliğiyle bağlantılı aşırı yağış olaylarının Portekiz'deki heyelan aktivitesi üzerindeki etkilerini araştırmış ve gelecek dönemde aşırı yağışların daha yoğun ve yaygın biçimde heyelanlara neden olacağını projeksiyonlarla desteklemiştir.

2.2. Antropojenik Faktörler

İnsan kaynaklı faktörler, heyelan oluşumunun artmasında belirleyici bir rol üstlenmektedir. Tanyaş & Görüm (2022), Türkiye'de yol inşaatlarının kitlesel hareketleri tetikleme potansiyelini jeolojik veritabanları üzerinden sistematik biçimde analiz ederek yol yapımının depreme kıyasla dahi bazı bölgelerde daha yüksek heyelan tetikleme riski yarattığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, ormanlık alanlarda gerçekleştirilen orman yolu inşaatlarının çevresel risklerini değerlendiren çalışmalar açısından da büyük önem taşımaktadır. Arazi örtüsü değişimi, ormansızlaşma ve kentleşme de eğim stabilitesini olumsuz etkileyen başlıca antropojenik etkenler arasında sayılmaktadır.

Kocaman & Tavus (2020), Doğu Karadeniz'de meydana gelen bir meteorolojik afet bağlamında sel ve heyelanları birlikte değerlendirmiş; afet alanındaki mekânsal dağılımı uzaktan algılama verileriyle analiz etmiştir. Bu çalışma, doğal ve antropojenik faktörlerin bir arada değerlendirilmesinin afet risk yönetimindeki önemini somut verilerle ortaya koymaktadır.

2.3. Küresel Heyelan Veri Tabanları

Güvenilir heyelan envanterlerinin oluşturulması, duyarlılık modellerinin kalibrasyonu ve doğrulanması açısından zorunlu bir ön koşuldur. NASA'nın yönettiği Global Heyelan Kataloğu (GLC) ve Global Ölümcül Heyelan Veri Tabanı (GFLD), bu alanda en kapsamlı ve güncel kaynaklar arasında yer almaktadır. Tayebi ve ark. (2024), beş ülkedeki paydaşların heyelan risk algısını karşılaştırmalı olarak incelemiş; hükümet yetkilileri ile akademisyenlerin insan kaynaklı tetikleyicilere (arazi kullanım değişikliği, ormansızlaşma) yerel topluluk temsilcilerine kıyasla çok daha fazla önem atfettiğini saptamıştır. Bu bulgu, heyelan risk iletişiminde disiplinlerarası yaklaşımların gerekliliğine işaret etmektedir.

3. DUYARLILIK HARITALAMASINDAKİ ETKİ FAKTÖRLERİ VE ENVANTER

3.1. Etki Faktörü Seçimi

Heyelan duyarlılık modellerinde etki faktörü (conditioning factor) seçimi, model performansını doğrudan belirleyen kritik bir aşamadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan etki faktörleri arasında; eğim, bakı, eğrilik (profil ve plan), yükseklik, litoloji, toprak tipi, arazi örtüsü/kullanımı, Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), drenaj yoğunluğu, Topografik Islak Dizin (TWI), fay hatlarına mesafe ve yol ağına mesafe yer almaktadır. Hussain ve ark. (2023), 15 farklı etki faktörü kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada yağışın en yüksek Varyans Enflasyon Faktörü (VIF) değerine sahip olduğunu belirleyerek bu faktörün heyelan modellemesindeki belirleyici konumunu teyit etmiştir.

Huang ve ark. (2022), heyelan mekansal veri setlerinin komşuluk özelliklerini ve hidrolojik havza birimlerini birlikte ele

alan yenilikçi bir modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Bu çalışmada, geleneksel grid tabanlı modellere kıyasla komşuluk analizini içeren yaklaşımın duyarlılık tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Faktör çoklu doğrusallığının test edilmesi ve gereksiz değişkenlerin elenmesi de model güvenilirliği açısından kritik metodolojik adımlar olarak öne çıkmaktadır.

3.2. Heyelan Envanteri Hazırlama

Heyelan envanteri, geçmişteki heyelan lokasyonlarının sistematik biçimde belgelenmesini kapsamaktadır. Envanter hazırlama yöntemleri; arazi çalışmaları, hava fotoğrafı yorumlama, uydu görüntüsü analizi ve InSAR gibi uzaktan algılama teknolojilerini kapsamaktadır. Hussain ve ark. (2023), InSAR teknolojisini kullanarak Karakoram Otoyolu boyunca mevcut heyelan envanterini güncelleyen çalışmalarında 571 heyelan lokasyonu tespit etmiş, bunların yanı sıra 24 yeni potansiyel heyelan alanı belirlemiştir. Envanterin doğruluğu ve mekansal kapsama alanı, üretilen duyarlılık haritalarının güvenilirliğini doğrudan belirlemektedir. Liu ve ark. (2023), envanter kalitesinin makine öğrenmesi modellerinin performansı üzerindeki etkisini kapsamlı biçimde ele alarak yüksek kaliteli envanter verisinin model sonuçları üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamıştır.

4. DUYARLILIK HARITALAMASINDAKİ YÖNTEMSEL YAKLAŞIMLAR

4.1. Klasik İstatistiksel Yöntemler

Frekans oranı, ağırlıklı bindirme, istatistiksel indeks ve lojistik regresyon yöntemleri, hesaplama kolaylığı ve yorumlanabilirlik avantajları nedeniyle HDH çalışmalarında uzun yıllar boyunca standart araçlar olarak kullanılmıştır. Buğday

(2019), Çankırı-Yapraklı ormanlık alanında bu yöntemleri karşılaştırmalı olarak uygulamış ve farklı koşullar altında her yaklaşımın gösterdiği performans farklılıklarını ortaya koymuştur. Adnan ve ark. (2020), farklı makine öğrenmesi algoritmalarıyla üretilen haritalar arasındaki mekansal uyumu sistematik biçimde analiz etmiş ve model belirsizliğini azaltmak amacıyla bütünleşik bir harita üretme yaklaşımı geliştirmiştir. Ancak klasik istatistiksel modeller, yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan veri yapılarını modellemede makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla genellikle yetersiz kalmaktadır.

4.2. Karar Ağacı Tabanlı Topluluk Yöntemleri

Son beş yılda, karar ağacı tabanlı topluluk (ensemble) yöntemleri HDH literatürüne hâkim olmuştur. Bu yöntemler arasında Rassal Orman (Random Forest - RF), XGBoost (Extreme Gradient Boosting) ve Gradyan Artırma Makinesi (GBM) öne çıkmaktadır. Şahin (2020), Türkiye'nin Sinop iline bağlı Ayancık ilçesinde RF, XGBoost ve GBM yöntemlerinin tahmin kapasitelerini karşılaştırmış; XGBoost modelinin en yüksek doğruluk değerlerine ulaştığını göstermiştir. Shibao ve ark. (2021), Bayes hiperparametre optimizasyonu ile desteklenen RF ve XGBoost modellerinin standart versiyon modellerine göre belirgin iyileştirme sağladığını ortaya koymuştur.

Yavuz Özalp & Akıncı (2023), ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmalarını Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş; RF ve XGBoost'un yüksek performans sergilediğini doğrulamıştır. Zhang & He (2023), bu iki algoritmayı heyelan duyarlılık haritalama bağlamında sistematik biçimde incelemiş ve veri setinin büyüklüğü ile özellik çeşitliliğinin algoritma seçimini etkileyen belirleyici etkenler olduğunu vurgulamıştır. Huang ve ark. (2022), komşuluk analizi ile geliştirilmiş RF ve SVM modellerinin geleneksel yaklaşımlara kıyasla mekansal uyumu önemli ölçüde artırdığını kanıtlamıştır.

Nhu ve ark. (2020) ise sığ heyelanlara yönelik RF tabanlı duyarlılık modellerinin ormancılık uygulamalarında sunduğu potansiyeli somut verilerle ortaya koymuştur.

4.3. Derin Öğrenme Yaklaşımları

Derin öğrenme yöntemleri, özellikle büyük veri setlerinin mevcut olduğu bağlamlarda HDH'da üstün performans sergileme potansiyeli taşımaktadır. Merghadi ve ark. (2021), Bilimsel Raporlar dergisinde yayımladıkları çalışmada derin öğrenme tabanlı HDH'nın geleneksel makine öğrenmesi modellerine kıyasla sağladığı performans kazanımlarını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Hussain ve ark. (2023), CNN 2D, Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), RF ve XGBoost modellerini karşılaştırmalı olarak test etmiş; CNN 2D'nin Karakoram Otoyolu çalışma alanı için en yüksek AUC değerine ulaştığını göstermiştir. Ma ve ark. (2023), derin dikkat mekanizmalı dilate artık evrişim sinir ağı (DADRCNN) mimarisini geliştirerek çok ölçekli bilginin bir arada değerlendirilmesini sağlamış ve çalışma alanındaki heyelan duyarlılık değerlendirmesinde yüksek doğruluk elde etmiştir.

Liu ve ark. (2023), derin öğrenme yöntemlerinin mevcut veri sınırlılıkları koşullarındaki uygulanabilirliğini tartışmış; transfer öğrenmesi yaklaşımlarının veri yetersizliğinin bulunduğu heyelan araştırmaları için kısmi bir çözüm sunabileceğini vurgulamıştır. Kassa (2024), son beş yıldaki HDH çalışmalarını sistematik derleme yöntemiyle ele almış; derin öğrenme ve topluluk makine öğrenmesi yöntemlerinin büyük veri setleriyle en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur.

5. TÜRKİYE'DE HEYELAN DUYARLILIK ARAŞTIRMALARI

5.1. Türkiye'nin Heyelan Riski Profili

Türkiye, engebeli topografyası, çeşitli jeolojik yapısı, aktif fay sistemleri ve mevsimlere göre önemli farklılıklar gösteren yağış rejimi nedeniyle heyelana son derece elverişli doğal koşullar barındırmaktadır. Türkiye genelinde yılda ortalama 200-250 arasında heyelan olayı kaydedilmekte; bu olaylar her yıl can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi, eğimli yamaçlar, yoğun yağış ve kırılgan kayaç formasyonlarının birleşimiyle Türkiye'nin heyelan açısından en riskli bölgesi konumundadır. Tanyaş & Görüm (2022), Türkiye bağlamında yol inşaatlarının tetiklediği kitlesel hareketleri kapsamlı biçimde irdelemiş; özellikle dağlık ormanlık alanlarda altyapı geliştirme faaliyetlerinin getirdiği jeoteknik riskleri somut verilerle ortaya koymuştur.

5.2. Makine Öğrenmesi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Son yıllarda Türkiye'deki araştırmacılar, HDH alanındaki küresel metodolojik dönüşüme etkin biçimde katkıda bulunmuştur. Akıncı ve ark. (2020), RF modelini kullanarak Artvin'in Doğu Karadeniz kıyı kesiminde HDH gerçekleştirmiş; modelin başarı ve tahmin oranlarının sırasıyla %98,3 ve %97,7 gibi yüksek değerlere ulaştığını göstermiştir. Aynı çalışmada, hatalı arazi kullanım kararlarının heyelan ve heyelan kaynaklı zararları artırabildiği vurgulanmıştır. Yavuz Özalp & Akıncı (2023), farklı ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmalarının Türkiye koşullarındaki performansını karşılaştırmalı olarak ele almış ve coğrafi bağlama özgü faktörlerin algoritma performansı üzerindeki belirleyici etkisine dikkat çekmiştir. Kocaman & Tavus (2020), Ordu ve Giresun'da 2019 yılında yaşanan meteorolojik felaketten kaynaklanan sel ve heyelanları uzaktan

algılama verileriyle değerlendirmiş; zarar tespiti ve afet alanı haritalamada uydu görüntülerinin etkin kullanım olanaklarını göstermiştir.

5.3. Ormanlık Alanlara Özgü Çalışmalar

Türkiye'de ormanlık alanlardaki heyelan riski, orman yolu ağının yoğunluğu, orman yangınları sonrası kaybedilen gövdeler ve doğrudan sökümler kaynaklı erozyon süreçleriyle doğrudan ilişkilidir. Buğday (2019), Çankırı-Yapraklı ormanlık alanında farklı modelleme yaklaşımlarının HDH performansını sistematik biçimde karşılaştırmıştır. Buğday & Özel (2020), yarıkurak ormanlık alanlarda CBS tabanlı heyelan duyarlılık modellerini geliştirerek orman rehabilitasyon perspektifinden değerlendirmiştir. Bu çalışma, yarıkurak iklim koşullarının geleneksel HDH modellerinde yeterince temsil edilmediğini ortaya koyması bakımından özgün bir metodolojik katkı sunmaktadır.

Özçelik & Buğday (2022), Çankırı bölgesinde matematiksel modeller ile İHA verilerini entegre ederek HDH gerçekleştirmiş; yüksek çözünürlüklü İHA topoğrafisinin duyarlılık modellerinin mekansal doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Buğday & Akay (2022), CBS tabanlı çok kriterli karar analizi ile makine öğrenmesini birleştirerek heyelan duyarlılık haritalarından alternatif orman yolu güzergâhlarının planlanmasında yararlanmıştır; bu entegre yaklaşım, ormancılık altyapısı planlamasında HDH'nin pratik kullanımına yönelik özgün bir metodolojik katkı oluşturmaktadır. Buğday (2022), CBS tabanlı makine öğrenmesiyle heyelan duyarlılık haritası üretmiş ve bu haritalar koruma ormanlarındaki yol ağı planlamasına entegre etmiştir.

6. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE HEYELAN RİSKİ

6.1. Yağış Örüntüleri ve Heyelan Tetikleme Eşikleri

İklim değişikliği, yağış yoğunluğu ve sıklığını değiştirerek heyelan tetikleme koşullarını önemli ölçüde etkilemektedir. Araújo & Ramos (2022), Portekiz'de aşırı yağış olaylarının heyelan aktivitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmiş; iklim değişikliği projeksiyonları altında toprak kayması ve sık heyelanların daha sık gerçekleşeceğini göstermiştir. Tsunetaka ve ark. (2024), 72 saatlik yağış eşiği yaklaşımını Japonya'da on farklı bölgeye uygulayarak heyelan tetikleme potansiyeli yüksek yağış olaylarının 2060 sonrasında belirgin biçimde artacağını öngörmüştür. Bu bulgular, mevcut duyarlılık modellerinin iklim değişikliği projeksiyonlarıyla bütünleştirilmesinin zorunluluğunu açıkça ortaya koymaktadır.

6.2. Gelecek Risk Senaryoları

Wang & Wang (2023), ılımlı iklim değişikliği senaryosu altında küresel heyelan kayıp riskini değerlendirmiş; bölgesel iklim modelleri ile mevcut sosyoekonomik kırılabilirlik haritalarını bütünleştirerek gelecekteki riski büyük ölçekte öngörmüştür. Bu çalışma, heyelan risk yönetimi açısından önceliklendirilmesi gereken bölgelerin belirlenmesine yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Türkiye'de de mevsimsel yağış örüntüleri ve ekstrem hava olayları üzerine giderek artan sayıda araştırma yapılmaktadır; bu çalışmaların HDH metodolojileriyle sistematik biçimde entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

7. ERKEN UYARI SİSTEMLERİ VE RİSK YÖNETİMİ

7.1. İzleme Teknolojileri

HDH çalışmalarından elde edilen duyarlılık haritaları, arazide aktif izleme sistemlerinin kurulumunda önceliklendirme

aracı olarak kullanılmaktadır. InSAR (Interferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) teknolojisi, zemin yüzeyi deformasyonlarını milimetrik hassasiyetle ölçebilmekte ve aktif heyelanların uzaktan takibine olanak tanımaktadır. Hussain ve ark. (2023), SBAS-InSAR ve PS-InSAR yöntemlerini entegre ederek güncellenen heyelan envanteri oluşturmuş ve bu envanterin duyarlılık modellemesine olan katkısını somut verilerle göstermiştir. Xiao & Wei (2021), uydu ve yer tabanlı veri kaynakları kullanarak bir heyelanın uzun vadeli izlenmesini gerçekleştirmiş ve izleme yaklaşımlarının bütünlük kullanımının zamansal evrim dinamiklerinin aydınlatılmasına sağladığı katkıları ortaya koymuştur. İHA'ların heyelan izlemesindeki rolü Buğday & Özçelik (2025) tarafından kapsamlı biçimde incelenmiş ve Türkiye bağlamında bu teknolojinin afetlere hazırlık süreçlerine entegrasyonuna yönelik somut öneriler sunulmuştur.

7.2. Erken Uyarı Metodolojileri

Erken uyarı sistemleri (EWS), yağış eşiği tabanlı uyarı sistemlerinden anlık deformasyon ölçümüne dayalı gerçek zamanlı izlemeye kadar geniş bir metodolojik yelpaze sunmaktadır. Bai & Lu (2022), heyelan ivmelenme sürecine yönelik melez erken uyarı yöntemi geliştirmiş ve bu yöntemin kritik deformasyonun önceden öngörülmesindeki performansını gerçek vaka örüntüleriyle desteklemiştir. Etkili EWS kurulumu için duyarlılık haritaları, izleme ağları ve uyarı mekanizmalarının birlikte çalışabilir platformlar aracılığıyla entegre edilmesi gerekmektedir. Türkiye'de 2021 yılındaki Kastamonu-Sinop sel ve heyelanları gibi yıkıcı olaylar, entegre erken uyarı ve afet müdahale sistemlerinin geliştirilmesine yönelik acil ihtiyacı açıkça gözler önüne sermiştir.

8. SONUÇ

Bu çalışma, 2020-2025 yılları arasındaki HDH literatürünü sistematik biçimde ele alarak küresel ve Türkiye ölçeğindeki başlıca gelişmeleri ortaya koymuştur. Son beş yılda en belirgin eğilim, RF, XGBoost ve GBM gibi karar ağacı tabanlı topluluk yöntemlerinin hâkimiyeti olmakla birlikte, büyük veri setlerine dayanan çalışmalarda derin öğrenme yaklaşımları da giderek daha belirgin bir yer edinmektedir. Mevcut bulgular; hiperparametre optimizasyonunun, uygun etki faktörü seçiminin ve yüksek kaliteli envanterle çalışmanın model performansı açısından kritik olduğunu tutarlı biçimde göstermektedir.

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi ve ormanlık alanlarda nitelikli çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü topoğrafik verilerinin makine öğrenmesiyle entegrasyonu, Türkiye koşullarında duyarlılık modellerinin mekansal doğruluğunu artıran özgün bir metodolojik katkı olarak öne çıkmaktadır. Orman yolu planlamasının HDH sonuçlarıyla bütünleştirilmesi ise sürdürülebilir ormancılık altyapısı için özgün ve uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır.

İklim değişikliğinin yağış örüntülerini dönüştürdüğü ve insan kaynaklı baskıların yoğunlaştığı günümüzde, HDH araştırmalarının iklim projeksiyonlarıyla bütünleşik biçimde yürütülmesi bir öncelik haline gelmektedir. Gelecekteki araştırmaların dinamik duyarlılık modellerine, gerçek zamanlı veri akışına dayalı güncel haritalar üretimine ve mekânsal-zamansal risk değerlendirme yaklaşımlarına odaklanması araştırma alanı yanı sıra afet risk yönetimi pratiklerine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adnan, M. S. G., Rahman, M. S., Ahmed, N., Ahmed, B., Rabbi, M. F., & Rahman, R. M. (2020). Improving spatial agreement in machine learning-based landslide susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 12(20), 3347. <https://doi.org/10.3390/rs12203347>
- Akıncı, H., Kılıçoğlu, C., & Doğan, S. (2020). Random forest-based landslide susceptibility mapping in coastal regions of Artvin, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 553. <https://doi.org/10.3390/ijgi9090553>
- Araújo, J. R., & Ramos, A. M. (2022). Impact of extreme rainfall events on landslide activity in Portugal under climate change scenarios. *Landslides*, 19(12), 2897-2910. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01895-7>
- Bai, D., & Lu, G. (2022). A hybrid early warning method for the landslide acceleration process based on machine learning. *Applied Sciences*, 12(13), 6478. <https://doi.org/10.3390/app12136478>
- Buğday, E. (2019). Landslide susceptibility mapping using different modeling approaches in forested areas (Sample of Çankırı-Yapraklı). *European Journal of Forest Engineering*, 5(2), 61-67. <https://doi.org/10.33904/ejfe.582276>
- Buğday, E. (2022). A GIS based landslide susceptibility mapping using machine learning and alternative forest road routes assessment in protection forests. *Šumarski List*, 146(3-4), 137-148. <https://doi.org/10.31298/sl.146.3-4.4>
- Buğday, E., & Akay, A. E. (2022). Assessment of alternative forest road routes and landslide susceptibility mapping

- using machine learning. *Cerne*, 28(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1590/01047760202228012976>
- Buğday, E., & Özel, H. B. (2020). Modeling of landslide sensitive areas using GIS in semi-arid forests and evaluation in terms of forest rehabilitation. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 241-255.
- Buğday, E., & Özçelik, A. (2025). İnsansız hava araçlarının afetlere hazırlık sürecindeki rolü: Olanaklar, sınırlılıklar ve uygulamalar. *Bütünleşik Afet Yönetimi Dergisi*, 1(1), 92-107.
- Emberson, R., & Kirschbaum, D. (2022). Insights from the topographic characteristics of a large global catalog of rainfall-induced landslide event inventories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(4), 1129-1149.
<https://doi.org/10.5194/nhess-22-1129-2022>
- Huang, F., Tao, S., Li, D., Lian, Z., Catani, F., Huang, J., & Zhang, W. (2022). Landslide susceptibility prediction considering neighborhood characteristics of landslide spatial datasets and hydrological slope units using remote sensing and GIS technologies. *Remote Sensing*, 14(18), 4436. <https://doi.org/10.3390/rs14184436>
- Hussain, M. A., Chen, Z., Zheng, Y., Shoaib, M., Ma, J., Ahmad Khan, J., & Nie, Y. (2023). Deep learning and machine learning models for landslide susceptibility mapping with remote sensing data. *Remote Sensing*, 15(19), 4703. <https://doi.org/10.3390/rs15194703>
- Kassa, S. M. (2024). A systematic review of machine learning based landslide susceptibility mapping. *Put i Saobraćaj*, 70(2), 23-30. <https://doi.org/10.31075/pis.70.02.03>
- Kocaman, S., & Tavus, B. (2020). Evaluation of floods and landslides triggered by a meteorological catastrophe

- (Ordu, Turkey, June 2020) using optical and radar data. *Geofluids*, 2020, 8830661. <https://doi.org/10.1155/2020/8830661>
- Liu, S., Wang, L., & Zhang, W. (2023). A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping. *Geological Journal*, 58(6), 2283-2301. <https://doi.org/10.1002/gj.4666>
- Ma, Y., Xu, S., Jiang, T., Yang, X., Liu, F., Lu, H., & He, J. (2023). Learning a deep attention dilated residual convolutional neural network for landslide susceptibility mapping in Hanzhong City, Shaanxi Province, China. *Remote Sensing*, 15(13), 3296. <https://doi.org/10.3390/rs15133296>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., Avtar, R., & Abderrahmane, B. (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 11, 24112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1>
- Nhu, V. H., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chen, W., Clague, J. J., Geertsema, M., Jaafari, A., Avand, M., Miraki, S., Asl, D. T., Pham, B. T., Ahmad, B. B., & Lee, S. (2020). Shallow landslide susceptibility mapping by random forest base classifier and its ensembles in a semi-arid region of Iran. *Forests*, 11(4), 421. <https://doi.org/10.3390/f11040421>
- Özçelik, A., & Buğday, E. (2022). Generating landslide susceptibility maps using mathematical models and UAV data: The case of Çankırı Region in Türkiye. *European Journal of Forest Engineering*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.33904/ejfe.1066040>
- Şahin, E. K. (2020). Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility

- mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest. *SN Applied Sciences*, 2, 1308. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3060-1>
- Shibao, W., Zhuang, J., Mu, J., Guo, W., Zhan, J., & Wang, Z. (2021). Application of Bayesian hyperparameter optimized random forest and XGBoost model for landslide susceptibility mapping. *Frontiers in Earth Science*, 9, 712240. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.712240>
- Sun, J., Yuan, G., Song, L., & Zhang, H. (2024). Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: A review. *Drones*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>
- Tanyaş, H., & Görüm, T. (2022). Could road constructions be more hazardous than an earthquake in terms of mass movement? *Natural Hazards*, 112(2), 639-663. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05199-2>
- Tayebi, S., Javed, M. A., Ruano, A. L., Amarnath, G., & Villholth, K. G. (2024). Stakeholder perspectives on landslide triggers and impacts in five countries. *Landslides*, 21(8), 2033-2043. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02270-4>
- Tsunetaka, H., Murakami, W., Nakao, K., Gomi, T., Moriwaki, T., Tarolli, P., & Hotta, N. (2024). Evaluation of the impact of climate change on rainfall for potential landslide triggering in Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.6050>
- Wang, X., & Wang, Y. (2023). Assessing global landslide casualty risk under moderate climate change based on hazard and vulnerability estimations. *International*

Journal of Disaster Risk Science, 14(4), 639-651.
<https://doi.org/10.1007/s13753-023-00514-w>

Xiao, T., & Wei, H. (2021). Long-term and emergency monitoring of Zhongbao landslide using space-borne and ground-based approaches. Remote Sensing, 13(8), 1578.
<https://doi.org/10.3390/rs13081578>

Yavuz Özalp, A., & Akıncı, H. (2023). Comparative analysis of tree-based ensemble learning algorithms for landslide susceptibility mapping in the Eastern Black Sea Region of Turkey. Water, 15(14), 2661.
<https://doi.org/10.3390/w15142661>

Zhang, W., & He, Y. (2023). Landslide susceptibility mapping using random forest and extreme gradient boosting: A case study of Fengjie County in the Three Gorges Reservoir Area. Geological Journal, 58(6), 2372-2387.
<https://doi.org/10.1002/gj.4683>

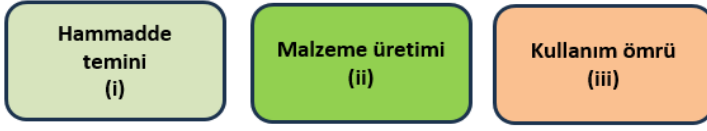
AHŞAP BAZLI KOMPOZİT PANELLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE İNOVASYON

Celal UĞUR¹

1. GİRİŞ

Toplumumuzu tehdit eden en ciddi iki kriz iklim değişikliği ve çevrenin bozulmasıdır. İnsanlığın fosil kaynakları pervasızca kullanması bu sorunlara büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. "Al-yap-at" zihniyetiyle, doğrusal ekonomik sistemimiz bunların geri dönüştürülemeyen ve sonunda yakılan veya çöplüklerde son bulan malzeme ve ürünlere dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu durum hem sera gazı emisyonlarına hem de ciddi çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle, bu doğrusal ekonomiyi sürdürülebilir bir döngüsel ekonomiye dönüştürmek son derece önemlidir. Fosil hammaddeler yerine yenilenebilir doğal kaynakların kullanımı, bu geçişin temel taşlarından biridir. Bu, kaynakların, onları sağlayan ekosistemlerin sağlığını tehlikeye atmadan ihtiyaçlarımızı karşılamak için kullanılması anlamına gelen çevresel sürdürülebilirliğin gerçekleştirilmesine yardımcı olabilir [1]. Ahşap bir ürünün sürdürülebilirliğini değerlendirmek için ömrünün üç aşaması önemlidir (şekil 1).

¹ Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-3278-3674.



Şekil 1. Ürünün sürdürülebilirliğini için önemli olan ürün ömrünün üç aşaması.

Ahşap esaslı kompozit paneller sürdürülebilir ormancılık uygulamaları açısından kritik bir rol oynamakta olup, sosyal, ekonomik ve çevresel boyutlarda önemli katkılar sağlamaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) son raporuna göre [2], ahşap ve ahşap esaslı kompozit panel üretim sanayi, 2017-2019 yılları arasında küresel ölçekte yaklaşık 19,4 milyon kişiye istihdam sağlamış ve bu rakam ormancılık sektöründeki toplam istihdamın %58'inden fazlasını oluşturmuştur. Bu durum, ahşap esaslı kompozit panellerin yalnızca çevresel sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda ekonomik kalkınma ve sosyal refah açısından da stratejik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Küresel ahşap esaslı kompozit panel üretimi 2021-2022 döneminde rekor seviyelere ulaşmıştır. Özellikle 2022 yılında toplam üretim 375,3 milyon m³ olarak gerçekleşmiş olup, bu üretimin %66,7'si yonga levha (YL), orta yoğunluklu lif levha (MDF) ve yönlendirilmiş yonga levha (OSB) gibi ürün gruplarından oluşmuştur. Söz konusu yılda en yüksek üretim hacmine ulaşan ürün, 110 milyon m³'ün üzerindeki üretimle yonga levha olurken, yaklaşık 102 milyon m³'lük üretimle MDF ikinci sırada yer almıştır. Asya ve Avrupa, YL ve MDF üretiminde başı çekerken; Kuzey Amerika, OSB üretiminde öne çıkmaktadır. 2022 yılı itibarıyla Kuzey Amerika, 20 milyon m³'ün üzerinde OSB üretimiyle, küresel toplamın %54,6'sını karşılamıştır. Avrupa bu alanda yaklaşık %25'lik payla ikinci sırada yer alırken, Asya %18,7'lik oranla üçüncü sıradadır [3]. Bu veriler ahşap esaslı kompozit panel endüstrisinin sadece üretim hacmi

açısından değil, aynı zamanda bölgesel uzmanlaşma ve ekonomik etkiler bakımından da çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu panellerin, endüstriyel ormancılığın dönüşümünde ve kaynakların verimli kullanımında oynadığı rol, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Ahşap bazlı kompozit paneller, düşük kaliteli ahşap ve atıkların değerlendirilmesinin yanı sıra uzun süreli karbon depolama açısından da önemlidir. Mobilyalarda kullanılan ahşap bazlı kompozit paneller yaklaşık 25–30 yıl, binalarda kullanılanlarsa 50 yıl veya daha fazla süreyle karbon depolayabilir. Puettman'ın [4] yaptığı bir araştırma, Kuzey Amerika'da üretilen ahşap esaslı kompozit panellerin üretim sırasında saldıklarından daha fazla karbon depoladığını ortaya koymuştur. Yalnızca 2019 yılında bu panellerin 354 milyon metrik ton CO₂ eşdeğeri karbon depoladığı tahmin edilmektedir.

Yönlendirilmiş yonga levha (OSB) üretiminde kullanılan hammadde türleri, büyük ölçüde bölgesel orman kaynaklarının mevcudiyetine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kanada'da faaliyet gösteren OSB üreticileri, üretimde ağırlıklı olarak titrek kavak (*Populus tremuloides*) ve beyaz huş (*Betula papyrifera*) gibi sert ağaç türlerini tercih etmekte; yumuşak ağaç türlerinin kullanımı ise oldukça sınırlı düzeyde kalmaktadır. Buna karşılık, Amerika Birleşik Devletleri'nde OSB üretiminde yaygın olarak Güney sarıçamı (*Pinus spp.*) gibi yumuşak ağaç türleri kullanılmaktadır. Ayrıca, bölgesel farklılıklara bağlı olarak huş (*Betula spp.*), akçaağaç (*Acer spp.*) ve sığla (*Liquidambar styraciflua*) gibi diğer ağaç türleri de daha düşük oranlarda hammadde olarak değerlendirilmektedir [5].

OSB, Avrupa'da yumuşak ağaçtan (çam ve ladin) ve sert ağaçtan (titrek kavak) üretilirken, Asya'da kauçuk ağacı yaygın olarak kullanılır. YL ve MDF, genellikle düşük değerli veya hızlı büyüyen ağaç türlerinden, kereste fabrikası artıklarından (talaş, talaş ve rendelenmiş odun) ve keten, kenevir, bambu ve şeker

kamışı gibi geri dönüştürülmüş odun ve odun dışı lignoselülozik malzemelerden yapılır [6, 7]. Ancak son çalışmalar, iklim değişikliği, çevresel ve sosyal sorunlar, temiz enerji politikaları ve diğer sektörlerden gelen rekabet nedeniyle lif tedariklerinin önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde azalabileceğini göstermektedir [8, 9]. İklim değişikliği, yaygın olarak kullanılan ağaç türlerinin bulunabilirliğini azaltabilir, orman tahribatının sıklığını ve yoğunluğunu artırabilir ve mevcut tedarik zincirini altüst edebilir. Ayrıca, 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını azaltmayı hedefleyen Temiz Yakıt Standardı gibi Kanada federal hükümet politikaları, ahşap bazlı kompozit paneller endüstrisi ile biyoenerji sektörü arasındaki odun artıkları için rekabet seviyesini artırabilir [8,9].

Günümüz tüketici pazarında çevresel faktörler giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Tüketiciler, hem satın aldıkları ürünlerin çevresel etkilerine hem de markaların bu konuda aldıkları önlemlere daha fazla dikkat etmektedirler. Aynı zamanda, hükümetlerin çevre dostu uygulamaları teşvik etmesi ve sıkı düzenlemeler getirmesi, işletmeleri daha sürdürülebilir ürünler geliştirmeye zorunlu kılmaktadır. Yeni gelişmeler arasında, daha verimli süreçler ve tehlikesiz, biyobazlı ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler kullanılarak hafif ve çok işlevli paneller üretmeye yönelik artan bir ilgi ve tüketici sonrası panellerin yeni ürünlere dönüştürülmesi fırsatlarının değerlendirilmesi yer almaktadır. Yonga levha ve MDF mobilya ve döşemeler için laminat yüzey teknolojileri, devam eden inovasyon alanlarından bir diğeridir. En son gelişmelerden biri, kamu ve hastane ortamlarındaki mutfaklar ve tezgahlar gibi yüksek hijyen seviyelerinin gerekli olduğu uygulamalar için antimikrobiyal laminatlarla ilgilidir [10,11].

Bu çalışmada YL, MDF ve OSB üretimi için yeni hammadde kaynaklarının çeşitlendirilmesi veya optimize edilmesi konusundaki en son araştırmaları incelenmiştir. Bu

kaynaklar arasında alternatif ağaç türleri, kereste artıkları, yangından zarar görmüş odun ve özellikle YL ve MDF'den gelen tüketici sonrası odun yer almaktadır.

2. YENİ HAMMADDE KAYNAKLARI

2.1. Ahşap esaslı kompozitler

Ahşap esaslı kompozitler, doğal ahşabın genellikle başka malzemelerle (plastik, reçine, cam elyafı gibi) birleşmesiyle elde edilen ve birçok endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. [12]

Ahşap esaslı kompozit'lerin özellikleri, ağaç türü ve bileşimi, ahşap elemanların boyutu, yapıştırma türü, son işlem vb. dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Ahşap esaslı kompozitler, mobilya, denizcilik, inşaat, taşımacılık ve paketleme gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanıldıkları için dünya çapında önemlidir. Son yıllarda, yeni yüksek performanslı Ahşap esaslı kompozitler, doğal ahşabın sınırlamalarını aşarak daha iyi performans gösteren malzemeler sunar. Bu kompozitlerin hafiflik [13], mekanik mukavemet [14], ısı yalıtımı [15], ses emilimi [16], dayanıklılık [17], yapıştırma kalitesi [18] ve alev geciktiricilik [19] gibi birçok önemli özelliği bulunmaktadır. Her bir özellik, farklı kullanım alanları ve ihtiyaçlar için önemli avantajlar sağlar.

Ahşap esaslı kompozitlerin teknik standartlarla tanımlanması, bu malzemelerin güvenli, kaliteli ve dayanıklı bir şekilde üretilmesi ve kullanılmasını sağlamak için son derece önemlidir. Bu standartlar, üreticilerin ve kullanıcıların belirli kalite ve performans kriterlerine göre ürünler geliştirmelerine yardımcı olur. EN 313-2 [20] gibi Avrupa standartları, özellikle kontrplak gibi ahşap esaslı kompozitlerin tanımlarını ve gereksinimlerini içerir. Ahşap esaslı kompozitler, özellikle yapısal uygulamalarda veya teknik özelliklerin kritik olduğu

durumlarda, genellikle işlenmiş ahşap ürünleri olarak değerlendirilir. Bunun temel nedeni, bu kompozitlerin üretim sürecinin doğrudan kontrol edilebilir ve optimize edilebilir olmasıdır. Bu özellik, masif ahşaba kıyasla daha tutarlı ve öngörülebilir performanslar sunmalarını sağlar. Elbette, adından da anlaşılacağı gibi, ahşap plastik kompozitler de iki bileşenli ahşap esaslı kompozitler kategorisine girer çünkü bunlar, odun liflerinin polimerik bir matrisle ekstrüzyonla birleştirilmesiyle üretilir. Bazı laminat türleri de bu kategoriye dahil edilebilir. Açıkçası, ahşap esaslı kompozitlerde kullanılan yapıştırıcı karışımları da amaçlanan son kullanıma bağlı olarak değişebilir. Şimdiye kadar açıklanan ürünlerin ortak özelliği, ahşap hammaddesini farklı boyutlarda üniter elemanlara indirgeyen birincil bir işlemle üretilmesidir. Bu elemanlar kurutulduktan sonra, yapıştırma ve presleme yoluyla yeniden bir araya getirilir [21].

Son olarak, dilimlenmiş kaplamaların (doğal, boyalı, çok katmanlı ahşap [22]) veya estetik değeri olan farklı malzemelerin (plastik laminat, folyo vb.) kontrplak, sunta veya MDF'den yapılmış bir levhaya yapıştırılmasıyla üretilen paneller, ikincil işlemle üretilmiş olsalar bile genellikle dekoratif paneller olarak adlandırılır. Bu durumda, nihai ürün, destek panelini üreten aynı kuruluş ve tesiste veya piyasadan satın alınan farklı yarı mamul malzemelerin bir araya getirilmesiyle üretilebilir. Bu dekoratif panellerin üretimi, iç mekan tasarımında ve mobilya üretiminde geniş bir uygulama alanına sahiptir. İşlem sırasında kullanılan malzemeler, ürünün görünümü kadar dayanıklılığını, işlenebilirliğini ve performansını da etkiler.

2.2. Alternatif ahşap türleri

OSB, 1960'lı yıllarda Kanada'da, titreşim kavak ve kavak gibi düşük kaliteli ya da yeterince değerlendirilmeyen sert ağaç türlerini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. Özellikle

Kuzey Amerika’da konut inşaatlarında OSB’nin yaygın biçimde benimsenmesi ve bu panellere yönelik talebin hızla artması, araştırmacıları OSB üretiminde alternatif ağaç türlerinin kullanımını incelemeye yöneltmiştir. Günümüzde araştırmalar, Kanada’da çeşitli yumuşak ağaç türlerinin yanı sıra dünya genelinde alışılmadık ve hızlı büyüyen türler de dâhil olmak üzere çok farklı ağaç türlerinden OSB üretiminin olanaklarını araştırmaya odaklanmaktadır [23–24]. Zhuang ve çalışma arkadaşlarına [23, 25] göre, kara ladin, balsam köknarı ve titrek kavak–kara ladin karışımları gibi Kanada’ya özgü yumuşak ağaç türleri, OSB üretimi için uygun hammadde seçenekleri arasında yer almaktadır.

Lunguleasa ve arkadaşları [26], iki farklı ağaç türünden üretilen OSB panellerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırarak alternatif bir yaklaşım ortaya koymuştur. Çalışmada, Avrupa’da yaygın olarak kullanılan karışık yumuşak ağaç türleri (köknar–ladin–çam) ile hızlı büyüyen sert ağaç türlerinden (kavak–söğüt–huş) üretilen OSB panelleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hızlı büyüyen sert ağaç türlerinden üretilen OSB panelleri, karışık yumuşak ağaçlardan üretilen panellere kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilemiş, buna karşın yalnızca biraz daha yüksek kalınlık artışı göstermiştir. Bu bulgular doğrultusunda yazarlar, yumuşak ağaç türlerinin aşırı kullanımını azaltmak amacıyla Avrupa’daki OSB üretiminde hızlı büyüyen sert ağaç türlerinin alternatif bir hammadde olarak değerlendirilmesini önermektedir.

Sean ve Labrecque [27], panellerde kullanılan geleneksel hammaddelerin %30’una kadar olan kısmının, panellerin fiziksel ve mekanik özelliklerinden ödün vermeksizin, üç yıllık söğüt gövdeleriyle ikame edilebileceğini ortaya koymuştur. Dahası, söğüt yaprakları ve kabuğu; antimikrobiyal, analjezik, antioksidan, antikarsinogenik ve antidiyabetik özelliklere sahip aktif bileşikler içermekte olup, bu nedenle farmakolojik ve tıbbi

amaçlara yönelik biyo ürünlerin üretiminde değerlendirilebilmektedir [28]. Rahman ve arkadaşları [29], Malezya'nın hâlihazırda yaygın olarak kullanılan kauçuk ağacının, panel üretimi dışındaki amaçlar için daha kârlı olan yağ palmyesi plantasyonlarıyla ikame edilmesi nedeniyle ciddi bir hammadde kıtlığıyla karşı karşıya olduğunu bildirmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla Malezya ve diğer Asya ülkeleri, panel endüstrisi için kauçuk ağacına potansiyel alternatif olarak çeşitli hızlı büyüyen ağaç türlerini araştırmaktadır. Bu türlerden biri *Leucaena leucocephala*'dır. Hızlı büyüme özelliği ve başarılı deneme dikimlerine ek olarak, 18 aylık *Leucaena* ağaçlarından üretilen yonga levhaların tatmin edici fiziksel ve mekanik özellikler sergilediği rapor edilmiştir. Ayrıca, kısa rotasyonlu okaliptüs ve kavak gibi diğer türler de Güneydoğu ABD'de MDF üretimi için potansiyel hammadde olarak değerlendirilmektedir [30].

2.3. Tomruk artıkları

Ormancılık faaliyetleri sonucunda her yıl büyük miktarlarda tomruk artığı ortaya çıkmaktadır. Bu artıkların belirli bir kısmının sahada bırakılması; toprak verimliliğinin, saha üretkenliğinin, karbon tutulumunun ve biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlamakta olup, saha kalitesine bağlı olarak bu oran %30–70 arasında değişmektedir. Bununla birlikte, geri kalan önemli bir kısmın toplanarak değerlendirilmesi mümkündür [31, 32]. Bu artıkların bir kısmı enerji geri kazanımı amacıyla değerlendirilse de, büyük bir bölümü kesim bloklarında veya yol kenarlarında bırakılmakta; bu durum potansiyel bozulma süreçlerine, sera gazı emisyonlarına ve yangın riskine yol açmaktadır [33,34].

Ormancılık artıklarının sahadan uzaklaştırılmasına yönelik uygulamalar; ülkelerin politikaları, yasal düzenlemeleri ve sertifikasyon sistemlerinden etkilenmekte olup, hem ülkeler

arasında hem de ülke içi bölgeler arasında farklılık göstermektedir [35]. Örneğin Finlandiya’da ormancılık artıkları yaygın olarak enerji amaçlı değerlendirilmekte, besin maddelerinin orman ekosisteminde kalmasını sağlamak amacıyla artıkların yaklaşık %30’u sahada bırakılmaktadır [36].

Buna karşılık, Kanada’nın Britanya Kolombiyası eyaletinde endüstriyel uygulamalar genellikle ormancılık artıklarının kesim alanında ayrıştırılması veya açıkta yığın yakma yöntemleri ile bertaraf edilmesini içermektedir. Bu uygun maliyetli yöntemler minimum yönetim gereksinimlerini karşılamasına rağmen, önemli miktarda sera gazı emisyonuna ve zararlı partikül açığa çıkmasına yol açarak hem iklim değişikliğini hızlandırmakta hem de insan sağlığını olumsuz etkilemektedir [37].

Panel endüstrisi, söz konusu kalıntıların değerlendirilmesi yoluyla kereste fabrikası artıklarına olan bağımlılığını azaltabilir, bol ve süreklilik arz eden hammadde kaynaklarından lif tedariki sağlayabilir ve orman kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, bu kalıntıların geri kazanımı; saha erişilebilirliği, coğrafi mesafeler, taşıma maliyetleri, malzemenin bileşimi, şekli, boyutu ve tür karışımı gibi özelliklerden kaynaklanan heterojenlik ile heterojen hammaddelerin işlenmesine yönelik parçalama ekipmanlarının maliyeti ve uyarlanabilirliği gibi çeşitli teknik ve lojistik kısıtlar nedeniyle güçlük arz etmektedir [38].

Bu kapsamda gerçekleştirilen çok sayıda fizibilite çalışması, söz konusu zorlukların aşılabilmesi ve potansiyel değerlendirme senaryolarının ortaya konulabilmesi amacıyla, kereste artıklarının bulunabilirliğini ve panel üretim tesislerine olan mekânsal yakınlığını analiz etmiştir [39, 40]. Kanada panel endüstrisi açısından olası bir diğer dezavantaj ise, devletin temiz enerji politikaları doğrultusunda büyümesi öngörülen biyoenerji

sektörünün yaratacağı hammadde rekabetidir; bu durumun 2030 yılına kadar panel endüstrisi için arz kısıtlarına yol açabileceği öngörülmektedir [41].

Şahin [42], üre-formaldehit (UF) reçinesiyle bağlanmış yonga levha üretiminde üç farklı orman kalıntısı türü olan çam kozalaklarının kullanımının uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, kütük kalıntıları %10–50 oranlarında Yonga levhan'ın çekirdek tabakasında odun yongaları ile birlikte kullanılırken, yüzey tabakaları %100 odun yongalarından oluşturulmuştur. Kalıntıların, muhtemelen yüksek ekstraktif ve reçine asidi içeriklerine bağlı olarak düşük pH değerleri sergilediği ve sıcak su, soğuk su ile %1 NaOH çözeltilerinde yüksek çözünürlük gösterdiği belirlenmiştir. Söz konusu kimyasal özelliklerin, UF reçinesiyle bağlanmış panellerin performansını olumsuz yönde etkilediği rapor edilmiştir. Kalıntı içeren PB panellerinin su emme değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiş; ancak kalıntı oranının düşük tutulduğu (%10–20) numunelerde elastisite modülü , eğilme direnci ve iç bağ mukavemeti bakımından ilgili standartların sağlandığı belirtilmiştir.

3. YANGINDAN ZARAR GÖRMÜŞ ODUN

Yangından zarar görmüş odunun ahşap bazlı kompozit panellerin üretiminde kullanımına ilişkin araştırmalar günümüzde sınırlı olmakla birlikte, son yıllarda küresel ölçekte meydana gelen benzeri görülmemiş orman yangınları bu konunun artan önemini açık biçimde ortaya koymuştur. Ocak–Mayıs 2022 döneminde Rusya Federasyonunda orman yangınları yaklaşık 3,8 milyon hektarlık alanı etkilemiş olup, bu değer 2021 yılının aynı döneminde bildirilen 18 milyon hektarı aşan yangın alanına kıyasla yaklaşık 400.000 hektarlık bir artışa karşılık gelmektedir [43]. Benzer şekilde, Kanada Kurumlararası Orman Yangın

Merkezi verilerine göre, Ocak–Kasım 2023 arasında Kanada’da 18 milyon hektardan fazla orman alanı yangınlardan zarar görmüştür [44]. Anttila ve Verkerk [45], yangınlar dâhil olmak üzere orman tahribatı olaylarının sıklığı ve şiddetinin iklim değişikliği ile birlikte artabileceğini; bunun da uzun vadede orman verimliliğini ve endüstriyel lif arzını ciddi biçimde tehdit edebileceğini bildirmiştir. Bu bağlamda, panel üretim tesislerinin hammadde tedarik zincirlerine yangından zarar görmüş odunu giderek daha yüksek oranlarda dâhil etmek zorunda kalacağı öngörülmektedir.

Yangından zarar görmüş odunun panel üretiminde kullanımına odaklanan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmalardan birinde Moya ve ark. [46], yangın hasar düzeyinin (hafif, orta ve şiddetli) ve kızılçam kabuğu içeriğinin (%0–20) yönlendirilmiş yonga levha (OSB) özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Kabuksuz yanmış odundan üretilen OSB panellerinin, yangın hasar düzeyinden bağımsız olarak, yanmamış odundan üretilen panellerle benzer fiziksel ve mekanik özellikler sergilediği rapor edilmiştir. Buna karşılık, kabuk içeriğinin artırılması; kabuk parçacıklarının nispeten küçük boyutları ve düşük mekanik dayanımları nedeniyle eğilme direnci ve elastisite modülü değerlerinde azalmaya yol açmıştır. Bununla birlikte, yangına maruz kalma sonucu hemiselülozların (en higroskopik polimer) kısmen bozunması ve lignin içeriğinin (en hidrofobik polimer) göreceli olarak artması, kabuğun hidrofobik karakterini güçlendirmiş ve buna bağlı olarak panellerdeki kalınlık şişmesini azaltmıştır.

Akgül ve ark. [47] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, Türkiye’de yangından etkilenen bir bölgeden elde edilen yanmış çam odunu ile yanmamış ahşap karışımları (%50 kayın ve %50 meşe) kullanılarak orta yoğunluklu lif levha (MDF) üretimi değerlendirilmiştir. Paneller endüstriyel koşullar altında üretilmiş ve üre-formaldehit (UF) yapıştırıcı ile bağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, iç bağ mukavemetinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlenmediğini, buna karşın eğilme özellikleri ile vida tutma direncinin arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, yanmış odun kullanımı kalınlık şişmesi ve Janka sertliği üzerinde olumsuz etkilere neden olmuş ve MDF panellerin ortalama yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. MDF yüzeylerinin boyama ve son işlem performansının iyileştirilebilmesi için daha pürüzsüz ve aşırı emici olmayan bir yapı gerektirdiği dikkate alındığında, yangından zarar görmüş odunun yüzey özellikleri üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı biçimde araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

4. TÜKETİCİ SONRASI AHŞAP

Tüketici sonrası ahşap; dağıtım zincirinden iade edilen malzemeler de dâhil olmak üzere, ahşap ürünlerinin nihai kullanıcıları tarafından üretilen ve kullanım amacını tamamlamış ahşabı ifade etmektedir. *Ahşap atığı* ise, tehlikeli veya zararlı maddelerle kontaminasyon nedeniyle bertarafı gerekli olan ahşabın yanı sıra, yeniden kullanımının teknik veya ekonomik açıdan mümkün ya da etkili olmadığı artıklar ve kullanılmış ahşap ürünleri kapsamaktadır. Bu terim, özellikle ahşap esaslı malzemelerin sınıflandırılması ve atık yönetimi bağlamında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geri dönüştürülmüş malzeme kavramı ise, üretim süreçlerinden veya tüketici kullanımından sonra oluşan atık akışlarından geri kazanılan ya da başka şekilde yönlendirilen, yeni ürünlerin üretiminde yeniden kullanılan ve kuruluşun Durum Tespiti Sistemi gerekliliklerine uygunluğuna ilişkin kanıt sunulabilen malzemeleri tanımlamaktadır [48].

FAOSTAT verilerine göre [2], 2022 yılında dünya genelinde geri kazanılan tüketici sonrası ahşap miktarı 38 milyon m³ olarak rapor edilmiştir. Bu değer, önceki iki yıla kıyasla

yaklaşık %7,8'lik ortalama yıllık artış oranına karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, bu ürünlerin büyük bir bölümünün birkaç on yıl içinde yeniden atık haline geleceği dikkate alındığında, söz konusu artışın küresel ahşap bazlı kompozit panel talebindeki büyüme hızıyla karşılaştırıldığında görece sınırlı kaldığı görülmektedir. Nitekim, orta yoğunluklu lif levhanın (MDF) hacimsel olarak yaklaşık %80'inin, üretiminden sonraki 25 yıl içerisinde atık statüsüne geçeceği öngörülmektedir [49]. Küresel ölçekte tüketici sonrası ahşap geri kazanımı bakımından Avrupa, %82,9'luk pay ile en büyük katkıyı sağlayan bölge konumundadır. Avrupa içinde ise Almanya (%22), Fransa (%17,5) ve Birleşik Krallık (%12) en yüksek katkıya sahip üç ülke olarak öne çıkmaktadır. Geriye kalan %17'lik pay Asya kaynaklı olup, Çin tek başına küresel tüketici sonrası odun geri kazanımının yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır [2]. Tüketici sonrası odun, özellikle yonga levha (YL) ve orta yoğunluklu lif levha (MDF) üretimi açısından, malzeme geri kazanımına dayalı sürdürülebilir bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir [13, 45]. Bununla birlikte, yeni panellerin üretiminde kullanılmak üzere tüketici sonrası odunun geri dönüştürülmesi; hammaddenin yüksek düzeyde heterojenlik göstermesi ile birlikte boya, kaplama, yapıştırıcı ve diğer kirlenici bileşenlerin varlığı nedeniyle teknik açıdan karmaşık ve zorlu bir süreç olarak öne çıkmaktadır. Yonga levha (YL) ve MDF'nin geri dönüşümü özellikle zordur; zira bu paneller, yapıştırıcılar, kaplamalar, koruyucular ve yangın geciktiriciler (FR'ler) gibi katkı maddeleri içermekte olup, bu tür kimyasal kirlenimler mekanik işlemlerle giderilememektedir. Bu durum, geri dönüştürülmüş panellerin kalite kontrolünü ve güvenli kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Yalnızca mekanik yöntemlerle geri kazanılan ahşap lifler üzerinde kalan kirlenmiş yapıştırıcı, yeni panellerin fiziksel ve mekanik performansını önemli ölçüde düşürmekte ve formaldehit ile uçucu organik bileşikler (VOC) emisyonlarını artırmaktadır [50, 51]. Kirlenmiş

yapıştırıcı, tercih edilen değerlendirme stratejisine bağlı olarak hidroliz, piroliz veya enzimoliz yöntemleri ile giderilebilir. Bu yöntemlerden hidroliz, genellikle geri dönüştürülmüş liflerin panellere dahil edilmesi amacıyla kullanılırken; piroliz ve enzimoliz, ahşap bazlı kompozit panel atıklarını yüksek katma değerli kimyasallara veya karbon malzemelere dönüştürmek için araştırılmıştır [52, 53].

Üre-formaldehit (UF) bazlı yapıştırıcı, yonga levha ve MDF atıklarındaki birincil kirlenme kaynağıdır. UF yapıştırıcısı, düşük nem direncine sahip olması nedeniyle hidrotermal, asidik veya termal hidroliz yöntemleri ile kısmen giderilebilir. Hidrolize duyarlılık sırası, asidik koşullar > nötr koşullar > bazik koşullar şeklindedir [54]. Çeşitli çalışmalar, kürlenmiş reçine giderimi ile elyaf kalitesi arasında bir denge bulmak için hidroliz koşullarının optimize edilmesini incelemiştir. Örneğin, Fu ve arkadaşları [55], tüketici sonrası yonga levhayı geri kazanmak için en uygun termal hidroliz koşullarının 20 dakika boyunca 140 °C olduğunu bulmuştur. Bu işlem, kürlenmiş UF reçinesinin yaklaşık %65'ini gidermiş ve tamamen geri dönüştürülmüş parçacıklardan oluşan ve ham parçacıklardan yapılan yonga levha ile benzer özelliklere sahip yonga levha üretmeyi mümkün kılmıştır.

MDF atıklarının yeni panel üretimi için geri dönüştürülmesi, yonga levha atıklarına kıyasla daha karmaşık bir süreçtir. Bunun temel nedenlerinden biri, MDF panellerinin yonga levhaya göre daha yüksek yapıştırıcı içeriğine sahip olmasıdır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş MDF lifleri genellikle daha düşük kalitede olup; daha kısa uzunluk, düşük incelik oranı ve saf liflere göre daha ince yapıya sahiptir. Bu özellikler, liflerin özgül yüzey alanını artırmakta ve standartlara uygun MDF paneller üretmek için daha fazla yapıştırıcı kullanılmasını gerektirmektedir [56, 57].

MDF liflerini geri kazanmak için çeşitli yöntemler araştırılmıştır; bunlar arasında hidrotermal hidroliz, asidik hidroliz, termal hidroliz, orta dalga frekansı, buhar patlaması, buhar rafinasyonu ve bunların kombinasyonları yer almaktadır. Önceki çalışmalar, yapıştırıcı giderme etkinliği ve ön işlem yöntemlerinin MDF panellerin özellikleri üzerindeki etkisinin; ağaç türü, geri dönüştürülmüş/saf lif oranı ve kullanılan geri dönüşüm yöntemine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Gürsoy ve Ayrılmış [68], %7,5 kraft lignin eklemenin, hiçbir ön işlemten geçirilmemiş %10 geri dönüştürülmüş elyaftan üretilen MDF panellerin özelliklerini iyileştirebileceğini ve formaldehit emisyonlarını azaltabileceğini göstermiştir. MDF elyaf geri kazanımı için umut vadeden bir yaklaşım, hidroliz ve buhar patlaması kullanarak reçine giderimini, lif ayrılmasını ve su tüketimini optimize eden çok işlemlili yöntemlerdir. Bu yöntem, saf liflerle benzer morfolojik özelliklere sahip %67 geri dönüştürülmüş lif üretirken azotun %80'inden fazlasını başarıyla uzaklaştırmıştır [52]. Hagel ve Saake [69], MDF atıklarının geri kazanımı için bu har rafinasyonu ve asidik hidroliz yoluyla fraksiyonlama yöntemini önermiştir. Bu işlem, azotun yaklaşık %80'ini giderirken, ambalaj kağıdı veya MDF üretiminde yeniden kullanılabilir %70'ten fazla lif ve ayrıca %30'a kadar karbonhidrat içeren bir özüt üretmiştir.

Diğer bir yenilikçi yaklaşım, yüzey lamineli MDF atıklarından geri dönüştürülmüş liflerin üç katmanlı MDF panellerin çekirdek katmanına dahil edilmesi ve hidroliz ile ekstrüzyonun birleştirilmesi yöntemini içermektedir. Bu işlem sayesinde, yüzey lamineli MDF atıkları kullanılarak en az %20 geri dönüştürülmüş lif içeren ve ham lif panellere eşdeğer veya daha iyi özelliklere sahip yeni MDF paneller üretilmiştir [70]. Endüstriyel ölçekte, Avrupalı üreticiler yeni MDF paneller üretmek amacıyla MDF atıklarını geri kazanma yönteminde öncülük etmiştir. Bu teknoloji, reçineli lifleri yeniden kullanıma

hazırlamak için buhar ve yüksek basınçlı ısıtma işlemi uygulanmasını içermektedir. Başlangıçta tesiste oluşan panel atıkları üzerinde test edilen yöntem, yakında tüketici sonrası MDF atıkları üzerinde de uygulanacak ve saf liflerin %25'ine kadarının geri dönüştürülmüş liflerle değiştirilmesini mümkün kılacaktır [71].

Yönlendirilmiş yonga levha (OSB) atıklarının geri dönüşümü veya geri dönüştürülmüş odunun yeni panel üretiminde kullanımı üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bunun başlıca nedeni, OSB'nin yuvarlak odunlardan üretilmesi ve lifli yapısının yonga levha veya lif levha (MDF) panellere kıyasla daha uzun bir kullanım ömrüne sahip olmasıdır.

Schild ve arkadaşları [72], kontamine odun atığı parçacıklarından oluşan çekirdek katman kullanarak OSB panelleri üretmeyi araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, CSA standardı O437-93'te belirtilen kriterleri karşılayan, tamamen geri dönüştürülmüş odun parçacıklarından oluşan bir çekirdek katman ile OSB üretiminin mümkün olduğu gösterilmiştir. Ancak, odun atığı ayrıştırma sürecindeki eksiklikler nedeniyle paneller arasında ve panellerin kendi iç yapısında belirgin yoğunluk farklılıkları gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

İklim değişikliği ve enerji sektöründen gelen rekabet, bazı bölgelerde panel üretiminde kullanılan liflerin mevcut kaynaklarını tehdit etmektedir. Teknolojik açıdan bakıldığında, ağaç kesim artıklarının panel endüstrisinde kullanılması, artıkların doğru şekilde sınıflandırılmasını, uygun parçalama teknolojilerinin geliştirilmesini ve panel üretim parametrelerinin ayarlanması gerektirmektedir. Yangından zarar görmüş odun da panel üretiminde araştırılmaya değer olabilir, çünkü orman

yangınlarının iklim değişikliği nedeniyle daha sık ve daha şiddetli hale gelmesi beklenmektedir.

Mevcut araştırmaların azlığı göz önüne alındığında, yangından zarar görmüş odunun kullanımının genel panel özelliklerini nasıl etkilediğini daha iyi anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Geri dönüştürülmüş ahşabın panel üretiminde kullanılmasına yönelik artan bir ilgi olmasına rağmen, sektör özellikle MDF'nin etkili bir şekilde geri dönüştürülmesi söz konusu olduğunda hala zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Ahşap esaslı kompozit sektörü, ekonomik, sosyal ve çevresel düzeylerde dünya çapında öneme sahiptir. Ahşap esaslı kompozitler, özellikle inşaat ve mobilya sektörlerinde ahşabın yüksek performanslı ve sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanımına olan artan ilgiden faydalanabilir. Birçok ahşap esaslı kompozitlerin hafifliği ve ahşabın bazı özelliklerini iyileştirmek için farklı malzemelerin birleştirilebilmesi, ulaşım sektörü ve güvenliğin temel bir gereklilik olduğu alanlar gibi çeşitli uygulamalar açısından bir başka olumlu yöndür. Ahşap esaslı kompozitler daha iyi performansa ve daha yüksek sürdürülebilirliğe taşımayı amaçlayan birçok bilimsel çalışma halihazırda mevcuttur.

Genel olarak, yapıştırıcılarda, kaplamalarda ve alev geciktiricilerde bulunan tehlikeli kimyasallar, panellerin geri dönüştürülmesi ve ahşap esaslı kompozitler endüstrisi içinde daha döngüsel bir ekonomi oluşturulması için bir zorluk teşkil etmektedir. Küresel ahşap esaslı kompozitler üretiminin artmaya devam etmesiyle birlikte panel atıklarının hacmi önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artacaktır. Bu nedenle, panellerin geri dönüşümü sorununu ele almak için yeni malzemelerin kullanımını değerlendirmek ilgi çekicidir. Çevresel açıdan en iyi kullanım yollarını belirlemek için hammadde kaynakları için yaşam döngüsü değerlendirmeleri tamamlanmalıdır.

Özetle, İklim değişikliğinin, orman yangınlarının ve diğer sektörlerle rekabetin panel üretimi için elyaf tedarikine etkisi değerlendirilmeli; yerel veya bölgesel bağlamla bağlantılı sosyo-ekonomik ve çevresel konuları dikkate alınabilir. Stratejik planlama amacıyla, ağaç kesim artıkları ve yangından zarar görmüş odunun panel üretiminde kullanımının ekonomik, çevresel ve teknolojik yönlerini araştırılmalıdır. Geri dönüşüm fırsatlarını araştırılabilir ayrıca gelecekte geri dönüşümü kolaylaştırabilecek çevre dostu malzemeler benimsenmeli ve çevreye duyarlı karar alma için hammadde kaynaklarının, süreçlerin ve ürünlerin yaşam döngüsü değerlendirmeleri gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Morelli J. 2011 Environmental sustainability: a definition for environmental professionals. *Journal of Environmental Sustainability* 1, 2. (doi:10.14448/jes.01.0002)
2. FAO. The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies [Internet]. Rome: FAO; 2022 [cited 2023 November 27]. [https:// doi. org/ 10. 4060/ cb936 0en](https://doi.org/10.4060/cb9360en).
3. FAO. FAOSTAT: Forestry production and trade [Internet]. [Place unknown]: FAO; 2024 [cited 2024 February 01]. Available from: [https:// www. fao. org/ faost at/ en/# data](https://www.fao.org/faostat/en/#data).
4. Puettman ME. Carbon analysis of wood composite panels. *Forest Prod J.* 2022;72(2):112–5. [https:// doi. org/ 10. 13073/ FPJ-D- 22- 00010](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-22-00010).
5. Canadian Wood Council. Oriented strand board (OSB) [Internet]. [Place unknown]: Canadian Wood Council; 2022 [cited 2023 November 27]. Available from: [https:// cwc. ca/ en/ how- to- build- withwood/ wood- produ cts/ panel- produ cts/ orien ted- strand- board- osb/#](https://cwc.ca/en/how-to-build-withwood/wood-products/panel-products/oriented-strand-board-osb/#).
6. EPF – European Panel Federation. Types of wood-based panels and their economic impact [Internet]. Brussels: European Panel Federation; 2018 [cited 2023 December 05]. Available from: [https:// europ anels. org/ the- wood- based- panel- indus try/ typesof- wood- based- panels- econo mic- impact/](https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/).
7. Lee SH, Lum WC, Boon JG, Kristak L, Antov P, Pędzik M, et al. Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. *J Mater Res Technol.* 2022;20:4630–58. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. jmrt. 2022. 08. 166](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166).
8. Hope E, Gagnon B, Avdić V. Assessment of the impact of climate change policies on the market for forest

- industrial residues. *Sustain.* 2020;12:1787. [https:// doi.org/ 10. 3390/ su120 51787](https://doi.org/10.3390/su12051787).
9. Auer V, Rauch P. Wood supply chain risks and risk mitigation strategies: A systematic review focusing on the Northern hemisphere. *Biomass Bioenerg.* 2021;148:106001. [https:// doi.org/ 10. 1016/j. biomb ioe. 2021. 106001](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106001).
 10. Nosál E, Reinprecht L. Antibacterial and anti-mold efficiency of silver nanoparticles present in melamine-laminated particleboard surfaces. *BioResour.* 2019;14(2):3914–24.
 11. Yontar AK, Çevik S, Akbay Ş. Production of environmentally friendly and antibacterial MDF (Medium-density fiberboard) surfaces with green synthesized nano silvers. *Inorg Chem Commun.* 2024;159:111865. [https:// www. scien cedir ect. com/ scien ce/artic le/ pii/ S1387 70032 30147 76](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387700323014776).
 12. Cai, Z.; Ross, R.J. Mechanical properties of wood-based composite materials. In *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*, Centennial ed.; U.S. Department of Agriculture; Forest Service; Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2010; Chapter 12;p. 12-1.
 13. Monteiro, S.; Martins, J.; Magalhães, F.D.; Carvalho, L. Lightweight Wood Composites: Challenges, Production and Performance. In *Lignocellulosic Composite Materials*; Kalia, S., Ed.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2018; pp. 293–322.
 14. Cetera, P.; Negro, F.; Cremonini, C.; Todaro, L.; Zanuttini, R. Physico-mechanical properties of thermally treated poplar OSB. *Forests* 2018, 9, 345. [CrossRef]
 15. Shalbafan, A.;Welling, J. Thermal and acoustic characteristics of innovative foam core particleboards. *Wood Fiber Sci.* 2017, 49, 73–83.
 16. Negro, F.; Cremonini, C.; Fringuellino, M.; Zanuttini, R. An innovative composite plywood for the acoustic

- improvement of small closed spaces. *Holzforschung* 2017, 71, 521–526. [CrossRef]
17. Källbom, S.; Lillqvist, K.; Spoljaric, S.; Seppälä, J.; Segerholm, K.; Rautkari, L.; Hughes, M.; Wålinder, M. Effects of water
 18. Brunetti, M.; Nocetti, M.; Pizzo, B.; Negro, F.; Aminti, G.; Burato, P.; Cremonini, C.; Zanuttini, R. Comparison of different bonding parameters and combined beech-spruce CLT by standard and optimized test methods. *Constr. Build. Mater.* 2020, 265, 120168.[CrossRef]
 19. Kalali, E.N.; Zhang, L.; Shabestari, M.E.; Croyal, J.; Wang, D.Y. Flame-retardant wood polymer composites (WPCs) as potential fire safe bio-based materials for building products: Preparation, flammability and mechanical properties. *Fire Saf. J.* 2019, 107, 210–216. [CrossRef]
 20. CEN. EN 313-2 Plywood. Classification and Terminology. Terminology; CEN: Brussels, Belgium, 2000.
 21. Marra, A.A. *Technology of Wood Bonding: Principles in Practice*; Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1992; 700p.
 22. Castro, G.; Zanuttini, R. Multilaminar wood: Manufacturing process and main physical-mechanical properties. *For. Prod. J.* 2004, 2, 61–67.
 23. Zhuang B, Cloutier A, Koubaa A. Physical and mechanical properties of oriented strand board made from Eastern Canadian softwood species. *For.* 2022;13:523. <https://doi.org/10.3390/f13040523>.
 24. Lunguleasa A, Dumitrascu A-E, Ciobanu V-D. Comparativestudies on two types of OSB boards obtained from mixed resinous and fast-growing hardwood. *Appl Sci.* 2020;10(19):6634. <https://doi.org/10.3390/app10196634>.
 25. Zhuang B, Cloutier A, Koubaa A. Effects of strands geometry on the physical and mechanical properties of

- oriented strand boards (OSBs) made from black spruce and trembling aspen. *BioResour.* 2022;17(3):3929–43.
26. Lunguleasa A, Dumitrascu A-E, Ciobanu V-D. Comparative studies on two types of OSB boards obtained from mixed resinous and fast-growing hardwood. *Appl Sci.* 2020;10(19):6634. [https:// doi. org/ 10. 3390/ app10 196634](https://doi.org/10.3390/app10196634).
27. Sean ST, Labrecque M. Use of short-rotation coppice willow clones of *Salix viminalis* as furnish in panel production. *For Prod J.* 2006;56(9):47–52.
28. Tawfeek N, Mahmoud MF, Hamdan DI, Sobeh M, Farrag N, Wink M, et al. Phytochemistry, pharmacology and medicinal uses of plants of the genus *Salix*: an updated review. *Front Pharmacol.* 2021;12:593856. [https:// doi. org/ 10. 3389/ fphar. 2021. 593856](https://doi.org/10.3389/fphar.2021.593856).
29. Rahman WMNWA, Johari NAN, Sarmin SN, Yunus NYM, Japarudin Y, Mahmud J, et al. *Leucaena leucocephala*: A fastgrowing tree for the Malaysian particleboard industry. *BioResour.* 2020;15(4):7433–42.
30. Rockwood DL, Winandy JE, Gribbins NR. Processing and wood factors influence medium-density fiberboard production from young *Eucalyptus grandis*, *E. amplifolia*, *Corymbia torelliana*, and cottonwood grown in Florida USA. *For.* 2022;13(2):266. [https:// doi. org/ 10. 3390/ f1302 0266](https://doi.org/10.3390/f13020266).
31. Pokharel R, Grala RK, Latta GS, Grebner DL, Grado SC, Poudel J. Availability of logging residues and likelihood of their utilization for electricity production in the US South. *J For.* 2019;117(6):543– 59. [https:// doi. org/ 10. 1093/ jofore/ fvz047](https://doi.org/10.1093/jofore/fvz047).
32. Titus BD, Brown K, Helmisaari HS, Vanguelova E, Stupak I, Evans A, et al. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Sustain Soc.* 2021;11:10. [https:// doi. org/ 10. 1186/ s13705- 021- 00281-w](https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w).

33. Dolmatov SN, Pryanichnikova AV, Tikhonov EA, Zagidullin RR, Sabitov LS, Yumagulova VM, et al. The potential of unclaimed forest resources of the Krasnoyarsk Territory and the prospects for their use. *OP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2023;1154:012075 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1154/1/012075>.
34. Viksne G, Vamža I, Terjanika V, Bezrucko T, Pubule J, Blumberga D. CO2 Storage in logging residue products with analysis of energy production scenarios. *Environ Clim Technol.* 2022;26(1):1158–68. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0087>.
35. Viksne G, Vamža I, Terjanika V, Bezrucko T, Pubule J, Blumberga D. CO2 Storage in logging residue products with analysis of energy production scenarios. *Environ Clim Technol.* 2022;26(1):1158–68. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0087>.
36. Mustola M. Procurement of logging residues – today and in the future. Added value; 2022 [cited 2024 August 13]. Available from: <https://biofuelregion.se/projekt/added-value/info-added-value/>
37. Nance E, Roeser D, Philips CA, Dymond CC, Kurz WA. The burning question: Addressing harvest residue management in B.C. *Canadian Biomass*; 2023 [cited 2024 July 19]. Available from: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/the-burningquestion-addressing-harvest-residue-management-in-b-c/>.
38. Braghiroli FL, Passarini L. Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities. *Curr For Rep.* 2020;6:172–83. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00112-9>.
39. Pokharel R, Grala RK, Latta GS, Grebner DL, Grado SC, Poudel J. Availability of logging residues and likelihood of their utilization for electricity production in the US South. *J For.* 2019;117(6):543–59. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz047>.

40. Barrette J, Paré D, Manka F, Guindon L, Bernier P, Titus B. Maps forecasting the availability of logging residues in Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre, Quebec, Canada. 2018. [https:// doi. org/ 10. 23687/ 5072c 495- 240c- 42a3- ad55- c942a b37c3 2a](https://doi.org/10.23687/5072c495-240c42a3-ad55-c942a b37c3 2a).
41. Hope E, Gagnon B, Avdić V. Assessment of the impact of climate change policies on the market for forest industrial residues. *Sustain.* 2020;12:1787. [https:// doi. org/ 10. 3390/ su120 51787](https://doi.org/10.3390/su12051787).
42. Şahin H. The potential of using forest waste as a raw material in particleboard manufacturing. *BioResour.* 2020;15(4):7780–95.
43. Dolmatov SN, Pryanichnikova AV, Tikhonov EA, Zagidullin RR, Sabitov LS, Yumagulova VM, et al. The potential of unclaimed forest resources of the Krasnoyarsk Territory and the prospects for their use. *OP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2023;1154:012075 [https:// iopsc ience. iop. org/ artic le/ 10. 1088/ 1755- 1315/ 1154/1/ 012075](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1154/1/012075). 44. CFFC – Canadian Interagency Forest Fire Centre Inc. Current fires summary [Internet]. [Place unknown]: CFFC; 2023 [cited 2023 November 23]. Available from: [https:// cffc. net/ summa ry](https://cffc.net/summary).
45. Anttila P, Verkerk H. Forest Biomass Availability. In: Hetemäki L, Kangas J, Peltola H, editors. *Forest Bioeconomy and Climate Change. Managing Forest Ecosystems.* Switzerland: Springer; 2022. p. 91–111. [https:// doi. org/ 10. 1007/ 978-3- 030- 99206-4_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99206-4_5).
46. Moya L, Winandy JE, Tze WTY, Ramaswamy S. Use of fire-impacted trees for oriented strandboards. *For Prod J.* 2008;58(6):45–52.
47. Akgül M, Ayırlmış N, Çamlıbel O, Korkut S. Potential utilization of burned wood in manufacture of medium density fiberboard. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2013;15:195–201. [https:// doi- org. acces. bibl. ulaval. ca/ 10. 1007/ s10163- 012- 0108-3](https://doi.org/10.1007/s10163-012-0108-3).

48. ISO/DIS 17300–1 Wood residue and post-consumer wood – Classification – Part 1: Vocabulary. ISO/TC 218 Committee. [Place unknown]: ISO; 2019 [cited 2024 July 23]. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:17300:-1:dis:ed-1:v1:en>.
49. ISO/DIS 17300–1 Wood residue and post-consumer wood – Classification – Part 1: Vocabulary. ISO/TC 218 Committee. [Place unknown]: ISO; 2019 [cited 2024 July 23]. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:17300:-1:dis:ed-1:v1:en>.
50. Natalli LH, Hillig E, Souza JB, Vidal CMS, Saldanha LK. Byproducts of the timber industries as raw-material for the production of MDF (Medium Density Particleboard). *Floresta Ambiente*. 2022;29(3):e20210090. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0090>.
51. Wronka A, Kowaluk G. The influence of multiple mechanical recycling of particleboards on their selected mechanical and physical properties. *Mater*. 2022;15:8487. <https://doi.org/10.3390/ma15238487>
52. Zimmer A, Bachmann SAL. Challenges for recycling mediumdensity fiberboard (MDF). *Results Eng*. 2023;19:101277. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101277>.
53. Xu D, Yang L, Zhao M, Zhang J, Syed-Hassan SSA, Sun H, et al. Conversion and transformation of N species during pyrolysis of wood-based panels: A review. *Environ Pollut*. 2021;270:116120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116120>.
54. Lubis MAR, Manohar SY, Laksana RPB, Fatriasari W, Ismayati M, Falah F, et al. The removal of cured urea-formaldehyde adhesive towards sustainable medium density fiberboard production: a review. *J Sylva Lestari*. 2021;9(1):23–44. <https://doi.org/10.23960/jsl1923-44>.

55. Fu Q, Zhuang B, Wang X-M, Cloutier A, Roussiere F, Bouffard JF. Thermo-hydrolytically recycling of urea-formaldehyde resinbonded laminated particleboards. *BioResour.* 2022;17(4):6847–59.
56. Besserer A, Troilo S, Girods P, Rogaume Y, Brosse N. Cascading recycling of wood waste: A review. *Polym.* 2021;13:1752. [https:// doi. org/ 10. 3390/ polym 13111 752](https://doi.org/10.3390/polym13111752).
57. Lubis MAR, Manohar SY, Laksana RPB, Fatriasari W, Ismayati M, Falah F, et al. The removal of cured urea-formaldehyde adhesive towards sustainable medium density fiberboard production: a review. *J Sylva Lestari.* 2021;9(1):23–44. [https:// doi. org/ 10. 23960/ jsl19 23- 44](https://doi.org/10.23960/jsl1923-44). 52. Troilo S, Besserer A
68. Gürsoy S, Ayrilmis N. Effect of Lignin Modification of recycled and fresh wood fibers on physical, mechanical, and thermal properties of fiberboard. *For.* 2023;14:2007. [https:// doi. org/ 10. 3390/ f1410 2007](https://doi.org/10.3390/f14102007).
69. Hagel S, Saake B. Fractionation of waste MDF by steam refining. *Mol.* 2020;25:2165. [https:// doi. org/ 10. 3390/ molec ules2 50921 65](https://doi.org/10.3390/molecules25092165).
70. Hong M-K, Lubis MAR, Park B-D, Sohn CH, Roh J. Effects of surface laminate type and recycled fiber content on properties of three-layer medium density fiberboard. *Wood Mater Sci Eng.* 2020;15(3):163–71. [https:// doi. org/ 10. 1080/ 17480 272. 2018. 15284 79](https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1528479).
71. Unilin. World first: A second life for MDF and HDF panels with our brand new recycling technology [Internet]. [Place unknown]: Unilin; 2021 [cited 2024 February 02]. Available from: [https:// www. unili npane ls. com/ en/ blog/ recyc ling- mdf- hdf- new- techn ology](https://www.unilinnpanels.com/en/blog/recycling-mdf-hdf-new-technology).
72. Schild A, Cool J, Barbu MC, Smith GD Feasibility of substituting core layer strands in randomly OSB with contaminated waste wood particles. *Wood Mater Sci*

Eng. 2019;52(5):1–8. [https:// doi. org/ 10. 1080/ 17480
272. 2019. 16526 82.](https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1652682)

ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com