



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

**ORMAN YOLLARINDA FARKLI SAYISAL ARAZİ MODELİ KAYNAKLARINA
GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİNİN MODELLENMESİ**

Abdullah İlker ESİN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hüseyin YURTSEVEN

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Doktora Programı

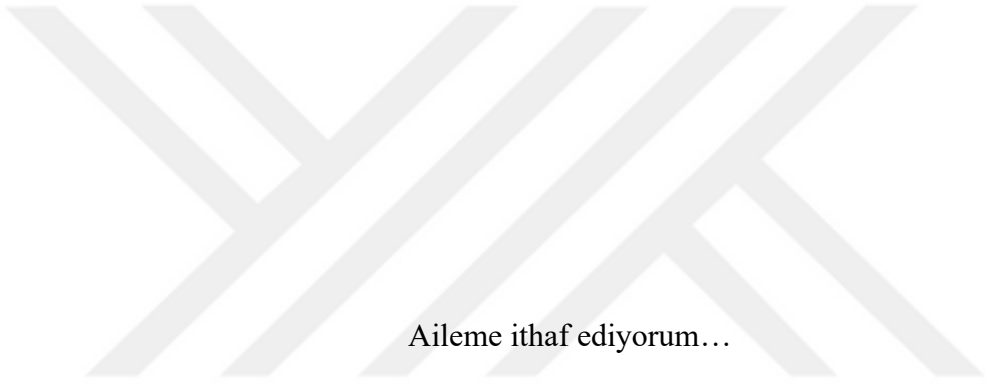
Ağustos, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah İlker ESİN tarafından, **Doç. Dr. Hüseyin YURTSEVEN** danışmanlığında hazırlanan "**ORMAN YOLLARINDA FARKLI SAYISAL ARAZİ MODELİ KAYNAKLARINA GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİNİN MODELLENMESİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **26/08/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Hüseyin YURTSEVEN İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Hafız Hulusi ACAR İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Murat DEMİR İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mustafa AKGÜL İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Doç. Dr. Ender BUĞDAY Çankırı Karatekin Üniversitesi Orman Mühendisliği Anabilim Dalı	<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret



Aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

ORMAN YOLLARINDA FARKLI SAYISAL ARAZİ MODELİ KAYNAKLARINA GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİNİN MODELLENMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
2.1. SAYISAL ARAZİ MODELİ.....	5
2.2. HİDROLİK SANAT YAPILARI	7
3. YÖNTEM	17
3.1. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL BİLGİLER	18
3.2. MEVCUT ORMAN YOLU ŞEBEKE PLANINA AİT BİLGİLER	20
3.3. SAM VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ.....	22
3.3.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Verilerinin Elde Edilmesi.....	23
3.3.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM Verilerinin Elde Edilmesi	24
3.3.3. Farklı SAM Verilerinin Karşılaştırılması.....	26
3.4. HAVZA SINIRLARININ BELİRLENMESİ.....	28
3.4.1. Akış Yönü Analizi (Flow Direction).....	29
3.4.2. Akış Birikimi Analizi (Flow Accumulation)	30
3.4.3. Akış Başlangıç Noktalarının Belirlenmesi.....	30
3.4.4. Havza Sınırlarının Çizimi ve Dönüştürülmesi:	30
3.5. HİDROLİK SANAT YAPILARININ KONUMLANDIRILMASI.....	31
3.6. HİDROLİK SANAT YAPILARININ SEÇİMİ VE BOYUTLANDIRILMASI	32

4. BULGULAR	41
4.1. FARKLI SAM VERİ SETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	41
4.2. FARKLI SAM KAYNAKLARINDAN ELDE EDİLEN DERE KOLLARI VE HAVZA SINIRLARI.....	48
4.3. FARKLI SAM KAYNAKLARINDAN ELDE EDİLEN HAVZALARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	50
4.3.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM ile Elde Edilen Havzalara Ait Bulgular	50
4.3.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM ile Elde Edilen Havzalara Ait Bulgular	52
4.4. HİDROLİK SANAT YAPILARIN KONUMLANDIRILMASI	55
4.5. HİDROLİK SANAT YAPILARIN BOYUTLANDIRILMASI.....	62
4.5.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalara Ait Maksimum Debiler	62
4.5.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalara Ait Maksimum Debiler....	64
4.5.3. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalardaki Hidrolik Sanat Yapısı Tür ve Kesitleri	66
4.5.4. Hava LiDAR Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalardaki Hidrolik Sanat Yapısı Tür ve Kesitleri.....	68
4.6. ORMAN YOLLARINA GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİ.....	72
5. TARTIŞMA.....	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR.....	81
EKLER	87
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	88
ETİK KURUL İZİN YAZISI	89
KURUM İZİN YAZILARI.....	90
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1: Tez çalışmasının iş akış şeması.....	18
Şekil 3.2: Çalışma alanı.....	19
Şekil 3.3: İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'na ait 2021 tarihli yol ağı planı.....	21
Şekil 3.4: LiDAR ve Topo SAM kaynakları.....	23
Şekil 3.5: Çalışma alanına ait LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli (SAM).....	24
Şekil 3.6: Havza parametrelerinin elde edilişindeki iş akışı.....	26
Şekil 3.7: Havza sınırın belirlenmesi süreci.....	28
Şekil 3.8: Sarıyer Yağış Şiddeti-Süre-Frekans eğrileri (1955-2020).....	35
Şekil 3.9: Genişliği 1,0 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).....	37
Şekil 3.10: Genişliği 1,5 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).....	38
Şekil 3.11: Genişliği 2,0 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).....	38
Şekil 3.12: Genişliği 2,5 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).....	39
Şekil 3.13: Kutu menfezlerde kabarmayı veren monogram (KGM, 2005).....	40
Şekil 4.1: a) Topoğrafik Harita kaynaklı SAM modeli, b) Hava LiDAR kaynaklı SAM modeli.....	41
Şekil 4.2:a)Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin hacimsel farkı, b) Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin matematiksel farkı.....	43
Şekil 4.3:Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin fark dağılımı.....	43
Şekil 4.4: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim veri setleri	45
Şekil 4.5:Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim verilerinin dağılımı.....	46
Şekil 4.6:Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı veri setleri	.47

Şekil 4.7: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı verilerinin alansal dağılımı.....	48
Şekil 4.8: a) Topoğrafik harita ve b) Hava LiDAR kaynaklı dere kolları.....	49
Şekil 4.9: Hava LiDAR ve 1/25.000 ölçekli harita kaynaklı SAM havza sınırları.....	49
Şekil 4.10: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisine göre elde edilen havzalar.....	52
Şekil 4.11: Hava LiDAR tabanlı SAM verisine göre elde edilen havzalar.....	55
Şekil 4.12: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisine göre elde belirlenen sanat yapısı konumları.....	57
Şekil 4.13: Hava LiDAR tabanlı SAM verisine göre elde belirlenen sanat yapısı konumları.....	59
Şekil 4.14: Her iki SAM modelinde birbirine 10 metreden daha yakın sanat yapılarının konumu.....	61
Şekil 4.15: Topoğrafik SAM göre Q_{25} , Q_{50} ve Q_{100} için hidrolik sanat yapısı kesit tipi dağılımı.....	68
Şekil 4.16: LiDAR tabanlı SAM göre Q_{25} , Q_{50} ve Q_{100} için hidrolik sanat yapısı kesit tipi dağılımı.....	71
Şekil 5.1: Orman Yollarında Ortalama Sanat Yapısı Aralıklarının SAM Yöntemlerine Göre Karşılaştırılması.....	77

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Dolgu durumuna göre büz ve menfez tiplerinin seçimi (Bayoğlu, 1997).....	13
Tablo 3.1: Sarıyer Meteoroloji İstasyonu'na ait bazı iklim verileri (1980-2020).	20
Tablo 3.2: İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'na ait orman yolları yapım programı cetveli.	22
Tablo 3.3: Akış katsayıları (Sonuç, 1977; Singh, 1992).	34
Tablo 4.1: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin Fark ve Mutlak Fark istatistikleri	42
Tablo 4.2: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim veri istatistikleri ve farkları.....	45
Tablo 4.3: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı verilerinin alansal dağılımı.....	47
Tablo 4.4: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden elde edilen havzaların parametreleri. ..	51
Tablo 4.5: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen havzalara parametreleri.	54
Tablo 4.6: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu.	56
Tablo 4.7: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu.	58
Tablo 4.8: Topo ve LiDAR SAM verilerine ait konumsal farklılıkların istatistiksel özeti.	60
Tablo 4.9: Farklı SAM kaynaklarında elde edilen sanat yapılarının konumsal uyumuna göre sınıflandırılması.	62
Tablo 4.10: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden elde edilen havzalara ait maksimum debiler.	63
Tablo 4.11: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen L1-L36 no'lu havzalara ait maksimum debiler.	65
Tablo 4.12: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen L37-L71 no'lu havzalara ait maksimum debiler.	66

Tablo 4.13: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen Hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri.....	67
Tablo 4.14: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri (L1-L36 no'lu havzalara ait).....	69
Tablo 4.15: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri (L37-L71 no'lu havzalara ait).....	70
Tablo 4.16: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu ve ait olduğu orman yolu.	73
Tablo 4.17: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu ve ait olduğu orman yolu.....	73
Tablo 4.18: SAM kaynağına göre yol başına düşen sanat yapısı.	74

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
ANUDEM	: Avustralya Ulusal Üniversitesi Sayısal Arazi Modeli
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BİMTAŞ	: Boğaziçi Peyzaj İnşaat Müşavirlik Teknik Hizmetler San. Tic. A.Ş
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
DSİ	: Devlet Su İşleri
GNSS	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi
HEC-HMS	: Hidrolojik Mühendislik Merkezi-Hidrolojik Modelleme Sistem (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LİDAR	: Light Detection and Ranging
MEVBİS	: Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Sistemi
MS:	: Mishra ve Singh Modeli
NDVI	: Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index)
OGM	: Orman Genel Müdürlüğü
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
SAM	: Sayısal Arazi Modeli
SCS-CN	: Toprak Koruma Hizmeti Eğri Numarası (Soil Conservation Service Curve Number)
SMA:	: Spektral Karışım Analizi (Spectral Mixture Analyze)
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TIN	: Düzensiz Üçgen Ağı (Triangulated Irregular Network)
TOPO	: 1/25.000 ölçekli Topoğrafik Harita
USGS	: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey)

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[ORMAN YOLLARINDA FARKLI SAYISAL ARAZİ MODELİ KAYNAKLARINA GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİNİN MODELLENMESİ]

[Abdullah İlker ESİN]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Mühendisliği, Doktora Programı

[Danışman : Doç. Dr. Hüseyin YURTSEVEN]

[Orman yollarının, işlevlerini öngörülen zaman içinde, kullanım amacına uygun, güvenli ve ekonomik bir şekilde yerine getirmesinde en büyük engellerden biri, yerüstü ve yeraltı sularının olumsuz etkileridir. Bu suların yol platformu ile kazı ve dolgu şevlerine zarar vermeden uzaklaştırılması için etkin drenaj sistemlerine ihtiyaç duyulur. Orman yollarındaki drenaj sistemlerinden biri olan hidrolik sanat yapıları, suların yol platformunun bir tarafından diğerine aktarılmasını sağlayan yapılardır.

Çalışmada farklı SAM kaynaklarına göre hidrolik sanat yapılarının konumlandırılması ve boyutlandırılmasında ortaya çıkabilecek farklılıkları belirlemek ve karar vericilere daha doğru altyapı planlaması için bilimsel bir zemin sunmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalardan türetilen SAM verileri ile hava kaynaklı LiDAR verisinden elde edilen SAM verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı olan İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanının her iki sayısal arazi modelinden elde edilen dere kolları, yol ağı planındaki yollarla karşılaştırılarak

ihitiyaç duyulabilecek hidrolik sanat yapılarının yerleri tespit edilmiştir. Ardından her bir deşarj noktasının havza sınırları, ArcGIS yazılımının Hydrology aracı ile sırasıyla akış yönü analizi, akış birikimi analizi ve eşik değerlerinin belirlenmesi adımlarıyla belirlenmiştir. Sonuçta, 1/25.000 tabanlı harita kaynaklı alanda 19 adet, LiDAR tabanlı olanda ise 71 adet sanat yapısı ve bunların havzaları oluşturulmuştur. Her bir sanat yapısından geçecek 25, 50 ve 100 yıllık tekerrür periyotlu maksimum debilerin hesaplanabilmesi için Rasyonel yöntem kullanılmıştır. Ardından bu debilerin taşınabileceği kesitlerin belirlenmesinde ilk yaklaşım olarak Talbot formülü kullanılmıştır. Sanat yapılarının hesaplanan debileri karşılayıp karşılayamayacağı boyut analizleri ile kontrol edilmiştir. Sonuçta üç farklı tekerrür periyodu için her bir sanat yapısının tipi ve nihai boyutları belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, LiDAR verisinin orman yolları gibi karmaşık ve eğimli arazide sanat yapısı planlaması için sadece bir alternatif değil, aynı zamanda daha yüksek doğrulukta çözüm önerileri sunan bir kaynak olduğunu göstermektedir. Özellikle taşkın riski yüksek, topoğrafik farklılıkların yoğun olduğu orman yollarında LiDAR verisine dayalı modeller, sanat yapılarının gerek konumsal gerekse hidrolik hesaplamalar açısından daha güvenilir biçimde projelendirilmesine imkân tanımıştır. |

Ağustos 2025 , [110] sayfa.

Anahtar kelimeler: | hidrolik sanat yapıları, orman yolları, LiDAR, sayısal arazi modeli |

ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

**[MODELING FOREST ROAD STRUCTURE REQUIREMENTS ACCORDING TO
DIFFERENT DIGITAL ELEVATION MODEL SOURCES]**

[Abdullah İlker ESİN]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Forest Engineering

Programme of Forest Engineering

[Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hüseyin YURTSEVEN]

[One of the biggest obstacles to forest roads fulfilling their intended functions safely and economically within the planned timeframe is the negative impact of surface runoff and groundwater. Effective drainage systems are needed to remove this water without damaging the road platform, cut and fill slopes. Hydraulic structures, one of the drainage systems on forest roads, are structures that drain water from one side of the road platform to the other.

The study aimed to identify differences that may arise in the locating and sizing of hydraulic structures based on different DEM sources, thereby providing decision-makers with a scientific basis for more accurate infrastructure planning. In this context, DEM data derived from 1/25,000 scale topographic maps were compared with SAM data obtained from airborne LiDAR data.

The locations of hydraulic structures were determined by superposing the roads of the IUC Faculty of Forestry Education and Research Forest with stream branches obtained from both digital elevation models. The basin boundaries for each discharge point were then

determined using the Hydrology tool in ArcGIS using the flow direction analysis, flow accumulation analysis, and threshold determination steps. Consequently, 19 hydraulic structures and their basins were created in the 1/25,000-based map area and 71 hydraulic structures and their basins in the LiDAR-based map. Rational method was used to calculate the maximum flow rates with 25-, 50- and 100-year recurrence periods that will pass through each hydraulic structure. The Talbot formula was then used as a first approximation to determine the cross-sections that could accommodate these flows. Dimensional analyses were conducted to verify whether the engineering structures could meet the calculated flow rates. Consequently, the type and final dimensions of each hydraulic structure were determined for three different recurrence periods.

The results demonstrate that LiDAR data is not only an alternative for engineering planning on complex and sloping terrains like forest roads, but also a resource that offers more accurate solutions. On forest roads with high flood risk and extensive topographic variation, LiDAR-based models have enabled more reliable design of hydraulic structures in terms of both spatial and hydraulic calculations. |

August 2025, |110| pages.

Keywords: |hydraulic structures, forest roads, LiDAR, digital elevation model|

1. GİRİŞ

Orman yolları, ormanın idaresi, korunması ve devamlılığın sağlanması açısından önemli altyapı elemanlarıdır. Bu nedenle, söz konusu yolların her daim kullanıma açık olması gerekmektedir. Ormanlarımızın büyük bir bölümünün dağlık arazi üzerinde yer aldığı göz önünde bulundurulursa, buradan üretilen odun hammaddesinin yollarla tüketim merkezlerine devamlı ve uygun olarak taşınması sel ve akarsuları sorunsuz olarak aşması ile mümkündür (Özcelik 1982). Orman yolları, yerüstü ve yeraltı sularından, dere geçişlerinde havzadan gelen sulardan etkilenmektedir. Bu etkilenme orman yollarının alt ve üst yapı malzemelerini tahrip edebilmektedir (Bayoğlu ve Hasdemir 1991; Çalışkan ve Acar, 2003). Orman yolları drenaj problemleri nedeniyle zamanla bozulabilmekte ve bu deformasyon ulaşımda aksaklıklara neden olabilmektedir. Orman yollarının sağlıklı bir şekilde işlev görebilmesi, suların olumsuz etkilerinin bertaraf edilmesine bağlıdır. İyi bir orman yolu, tabanından kaplamasına kadar bütünüyle kuru olan, yüzeysel ve taban sularının belirli sınırlar içinde kalmak suretiyle uzaklaştırıldığı, dere geçişlerinde havzadan gelebilecek suların ve özellikle taşkınların olumsuz etkilerinin ortadan kaldırıldığı bir yoldur (Bayoğlu ve Hasdemir 1991). Bu amaçla orman yollarının bir akarsu ile kesiştiği veya yüzeysel drenaj nedeniyle suyun yol altından yolun karşı tarafına geçirilmesi gerektiğinde yararlanılan büz, menfez, köprü gibi sanat yapılarına hidrolik sanat yapıları denilmektedir (Bayoğlu, 1997). Dolayısıyla, dere yatakları ile orman yollarının kesiştiği noktalarda drenaj açısından oluşabilecek problemleri engellemek amacıyla uygun tip ve yapıda hidrolik sanat yapıları tesis edilmesi zorunludur (Cook ve Hewlett, 1979; Gonzales, 1998; Gül, 1999).

Bu bağlamda tez kapsamında, orman yollarında sanat yapısı gereksinimlerinin modellenmesi amacıyla, farklı kaynaklardan türetilen sayısal arazi modelleri (SAM) karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Sayısal arazi modeli kaynağı olarak bir yandan hava kaynaklı LiDAR verisi, diğer yandan ise klasik topoğrafik haritalar kullanılmıştır. Her iki veri setinden elde edilen SAM'lar üzerinden, ArcGIS Pro yazılımı ortamında hidrolojik analizler gerçekleştirilmiş ve akış yönü, akış birikimi, havza sınırları gibi parametreler elde edilmiştir. Orman yolları ile akarsu ağlarının kesişim noktaları döküm noktası (pour point) olarak değerlendirilmiş ve bu noktalarda sanat yapısı gereksinimleri modellenmiştir.

Bu bağlamda, tez çalışması beş ana bölümde incelenmiştir:

Birinci bölüm: Kapsam ve Çerçeve; Bu bölümde çalışmanın temel amacı, gerekçesi ve araştırma soruları ortaya konulmuştur. Orman yollarında sanat yapısı gereksinimlerinin doğru şekilde belirlenebilmesi için SAM kaynaklarının etkisi ele alınmıştır. Ayrıca çalışmanın sınırlılıkları, kullanılan temel kavramlar ve araştırmanın uygulama alanına katkı sağlayacak yönleri detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm sonunda, çalışmanın genel yapısı okuyucuya sunulmuştur.

İkinci bölüm: Yöntem; Bu bölümde araştırmada izlenen yöntemsel yaklaşım açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan verilerin temini, ön işleme adımları ve analiz süreçleri detaylandırılmıştır. LiDAR verilerinden ve topoğrafik haritalardan türetilen sayısal arazi modelleri ile havza belirleme işlemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. ArcGIS Pro ortamında gerçekleştirilen hidrolojik analizler, akış yönü ve akış birikimi haritalarının üretimi, yol-akarsu kesişim noktalarının tespiti ve bu noktalardan hareketle sanat yapısı gereksiniminin modellenmesi açıklanmıştır.

Üçüncü bölüm: Bulgular; Bu bölümde uygulanan analizler sonucunda elde edilen bulgular sunulmuştur. LiDAR ve topoğrafik harita tabanlı SAM'ların oluşturduğu havza sınırları, akarsu ağları ve yol-derin akış kesişim noktaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İki farklı veri kaynağının sanat yapılarının konumu, sayısı ve boyutu üzerindeki etkileri görsel ve sayısal verilerle desteklenerek ortaya konulmuştur. Ayrıca farklı SAM kaynaklarının sunduğu hassasiyet düzeyine göre model sonuçları karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölüm: Tartışma; Bu bölümde elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Farklı SAM kaynaklarının sanat yapısı planlaması üzerindeki etkileri tartışılmış, her bir veri türünün avantajları ve kısıtları irdelenmiştir. Ayrıca modelleme sonuçlarının doğruluğu, uygulanabilirliği ve orman yolları planlama sürecine katkıları üzerine eleştirel bir bakış sunulmuştur.

Beşinci bölüm: Sonuç ve Öneriler; Son bölümde çalışma kapsamında ulaşılan temel sonuçlar özetlenmiş, araştırmanın orman mühendisliği ve yol planlaması açısından taşıdığı bilimsel ve uygulamalı değer vurgulanmıştır. Bununla birlikte, benzer çalışmalar için önerilerde bulunulmuş; kullanılan yöntemlerin geliştirilmesine, veri kaynaklarının çeşitlendirilmesine ve karar destek sistemlerine entegrasyonuna yönelik çıkarımlar yapılmıştır.

Tez çalışmasında farklı SAM kaynaklarına göre hidrolik sanat yapılarının yer seçiminde ve boyutlandırılmasında ortaya çıkabilecek farklılıkların belirlenmesi ve karar vericilere daha doğru altyapı planlaması için bilimsel bir zemin sunmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalardan türetilen SAM verileri ile hava kaynaklı LiDAR verisinden elde edilen SAM verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Farklı kaynaklardan elde edilen havza parametrelerinin, sanat yapılarının tasarımına etkisi analiz edilmiştir.

Bu doğrultuda çalışmanın temel hipotezleri şu şekilde ifade edilmektedir:

- **H₀ Hipotezi:** 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar ve hava kaynaklı LiDAR verilerine dayalı olarak elde edilen havza parametrelerine göre tesis edilecek hidrolik sanat yapıları arasında yer ve boyut bakımından anlamlı bir fark bulunmamaktadır.
- **H₁ (Alternatif Hipotez):** 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar ve hava kaynaklı LiDAR verilerine dayalı olarak elde edilen havza parametrelerine göre tesis edilecek hidrolik sanat yapıları arasında yer ve boyut bakımından anlamlı bir fark bulunmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Orman yolları, ormancılık faaliyetlerinin etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesi için kritik öneme sahip altyapı unsurlarıdır. Orman yolları, ormanlık alanlarda ulaşım ve nakliyat için kritik bir altyapı sağlar. Ancak, bu yolların yapım aşamasında çevresel etkilerin azaltılması, özellikle sediment yönetimi ve dere geçişlerinde uygun hidrolik sanat yapılarının kullanımı büyük önem taşır. Orman yolları doğru tasarlanmadığında, suyun doğal akış rejimi bozulabilir, sediment taşınımı artabilir ve bu durum hem çevre hem de yolun dayanıklılığı açısından ciddi sorunlara yol açabilir (Damian, 2003). Bu bağlamda, orman yollarında kullanılan hidrolik sanat yapıları, yalnızca yol ağının sürekliliğini sağlamakla kalmayıp, çevresel etkileri de minimize edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Orman yollarının işlevlerini, öngörülen zaman içinde, kullanım amacına uygun, güvenli ve ekonomik bir şekilde yerine getirmesinde en büyük engellerden biri yerüstü ve yeraltı sularının olumsuz etkileridir. Yol platformuna, şevlere ve yolun yakın çevresine düşerek akışa geçen suların zararlı etkilerini kaldırmak veya en az düzeye indirmek için söz konusu suların yol gövdesinden uzaklaştırılması gerekir. Yol yüzeyine gelen suların zemini hafif derecede nemli tutan ve ince taneler arasında kohezyon sağlayarak fayda sağlamasının yanında, belirli miktardan fazlası zararlı etkilere yol açabilmektedir. Rutubetli zeminler üzerinde inşa edilen bir yolda, taban suyu trafiğinin etkisiyle yolun üst tabakalarına doğru yükselmekte, hava sıcaklıklarına bağlı olarak donma ve çözülme olayları ile beraber yoldan geçişleri etkileyecek bozulmalara neden olmaktadır. Zemin taşıma gücünü olumsuz yönde etkileyen fazla su, yolların temel tabakası ile birlikte üst yapı malzemelerini de etkileyerek yol yapısına büyük zararlar verebilmektedir. Yüzeysel akışa geçen sular kazı ve dolgu şevlerinde erozyona sebep olmaktadır. Suyla doymuş duruma gelen zeminin iç sürtünme katsayısı azalarak kayma dayanımı düşmekte ve yolun taşıma gücünde zayıflama meydana gelmektedir. Yine yapısında killi ve siltli malzeme içeren zeminler içlerine su aldıklarında hacmen genişlemektedir. Meydana gelen kabarmalar yol üst yapısında kırılma ve dağılmalara yol açabilmektedir. Kazı ve dolgu şevlerinde yeraltı suyu akımları zeminde kayma yüzeyleri oluşturarak, şev stabilizasyonunun zayıflamasına ve sonucunda heyelana neden olmaktadır (Bayoğlu, 1997; Yayla, 2018).

Orman yollarında fazla suyun neden olabileceği bu olumsuzluklar göz önünde bulundurulduğunda, yolların kuru ve bakımlı olması, taşıyacağı ağır yüklere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu sebeple, söz konusu fazla suların yol platformu ile kazı ve dolgu şevlerine zarar vermeden uzaklaştırılması için etkin drenaj sistemlerinin uygulanması gerekir. Bu drenaj yapıları orman yol yapım maliyetinin yaklaşık %25'ini oluşturduğundan yapım ve bakım çalışmalarında önemli yer tutmaktadır (Eskandri ve Hosseini, 2013).

Orman yollarının drenajı üç ana başlıkta incelenebilir: yüzeysel suların drenajı (i), yeraltı sularının drenajı (ii) ve hidrolik sanat yapıları (iii). Yüzeysel suların uzaklaştırılması yol yüzeyine tek veya iki taraflı eğim verilmesi, kenar hendekleri, kafa hendekleri ve yüksek banket uygulamaları ile gerçekleştirilir. Yeraltı sularının uzaklaştırılmasında kör drenler, karşılama drenleri ve kemer taş drenle gibi tesisler kullanılmaktadır. Hidrolik sanat yapıları ise, suların yol platformunun bir tarafından diğerine aktarılmasını sağlayan yapılardır (Bayoğlu, 1997; Öztürk ve Hasdemir, 2021).

Dere geçişlerinde kullanılan hidrolik sanat yapıları, yağmur ve kar sularının olumsuz etkilerini önlemede hayati bir role sahiptir. Suyun doğru yönlendirilmesi hem yolların stabilitesini korur hem de doğal sucul yaşamın olumsuz etkilenmesini engeller. Örneğin, taşkın dönemlerinde doğru boyutlandırılmamış bir hidrolik yapı, suyun taşmasına ve sedimentin akarsuya taşınmasına neden olabilir. Bu nedenle, bu yapıların seçiminde ve konumlandırılmasında hidrolojik analizlerin yapılması, yerel koşullara uygun malzeme ve boyutların belirlenmesi gerekmektedir (Açıl, 2020; Öztürk ve Hasdemir, 2021).

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda sayısal arazi modelleri ve hidrolik sanat yapıları çalışmanın ana iskeletini oluşturan iki önemli parametre olarak ele alınmış ve tez çalışmasının kapsam ve hedefine yönelik literatür bilgileri verilmiştir.

2.1. SAYISAL ARAZİ MODELİ

Sayısal Arazi Modelleri (SAM), arazi yüzeyinin sayısal olarak modellenmesine olanak tanır ve özellikle mühendislik, çevresel analiz, yol planlaması ve hidrografik modelleme gibi pek çok alanda temel bir veri katmanıdır (Wilson ve Gallant, 2000; Wilson ve Fotheringham, 2008; Hutchinson ve diğ., 2011). SAM'ların üretildiği kaynak türü, modelin çözünürlüğü, detay seviyesi ve doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. Bu bağlamda, Topo (topoğrafik harita), ASTER, SRTM ve LiDAR gibi farklı veri kaynaklarından elde edilen SAM'ların

karşılaştırılması, mühendislik hassasiyeti gerektiren çalışmalarda doğru veri seçimi açısından kritik öneme sahiptir.

Topo verisi, 1:25.000 ölçekli topoğrafik haritalardan üretilen, yaygın ve düşük maliyetli geleneksel bir SAM kaynağıdır. İzohipslerden interpolasyonla elde edilen bu SAM'lar, genellikle 4 m çözünürlükle oluşturulmakta ve "Topo to Raster" fonksiyonu kullanılarak ANUDEM algoritması yardımıyla üretilmektedir (Hutchinson, 1989; Hutchinson ve diğ., 2011). Ancak bu yöntem, düşük çözünürlük nedeniyle mikro-topoğrafik detayları yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir (Li ve diğ., 2004; Ardiansyah ve Yokoyama, 2002).

Topo tabanlı SAM'lar, daha yüksek çözünürlüklü kaynaklara göre daha az doğru sonuçlar vermektedir. Esin ve diğ. (2021) çalışmasında Topo verisi ile elde edilen havza alanı ve akarsu uzunluklarının, LiDAR tabanlı veriye göre belirgin şekilde düşük olduğu gösterilmiştir. Örneğin, çalışma alanında LiDAR ile belirlenen toplam akarsu uzunluğu 8,21 km iken, aynı bölgede Topo ile bu değer yalnızca 4,75 km olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, drenaj morfometrisi sonucunda elde edilen akarsu kolu sayısı LiDAR'da 41 iken, Topo'da 19 olarak tespit edilmiştir (Esin ve diğ., 2021).

Yaygın olarak kullanılan bir diğer SAM kaynağı olan ASTER ve SRTM verileri, yaklaşık 30 m çözünürlükte olan, uydu tabanlı küresel yükseklik veri setleridir. Bu kaynaklar, geniş alanlarda yapılan analizlerde tercih edilmekte ancak düşük çözünürlükleri nedeniyle özellikle drenaj ve eğim analizlerinde doğruluk kaybına neden olabilmektedir (Thomas ve Prasannakumar, 2015; Wu ve diğ., 2017). Ayrıca çözünürlük ile doğru orantılı olarak akım birikim eşiği (flow accumulation threshold) değeri de yükselmektedir (Ariza-Villaverde ve diğ., 2015), bu da akarsu ağının seyrek modellenmesine yol açmaktadır. Esin ve diğ. (2021), çalışmasında SRTM verisi ile üretilen SAM'ın LiDAR'a göre %32 oranında daha küçük havza alanı sunduğunu ve yalnızca 3 adet akarsu kolu tespit ettiğini belirtmiştir. Bu fark, topoğrafyanın düşük çözünürlükle yeterince temsil edilemediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Son yıllarda özellikle çözünürlük ve doğruluk açısından öne çıkan bir diğer SAM kaynağı ise LiDAR'dır. LiDAR teknolojisi, lazer darbeleri kullanarak yüksek hassasiyette yüzey ölçümü yapar ve bitki örtüsünün altındaki gerçek arazi yüzeyini ortaya çıkarabilir. Bu özelliğiyle özellikle ormanlık ve engebeli arazide en güvenilir SAM kaynağı olarak kabul edilmektedir (Höfle ve Rutzinger, 2011; Polat ve Uysal, 2015). Esin ve diğ. (2021),

çalışmasında LiDAR verisini referans model olarak ele almış ve bu veriyle üretilen SAM'ın 25 cm çözünürlükte ve yaklaşık 16 nokta/m² yoğunlukta olduğunu belirtmiştir.

LiDAR ile tespit edilen eğim, uzunluk ve havza alanı gibi parametreler, Topo, ASTER ve SRTM kaynaklarına göre açık şekilde daha yüksek doğruluk göstermektedir. Özellikle akarsu ağı yoğunluğu ve eğim sınıflarının dağılımı açısından Topo verisine göre 2-3 kat daha detaylı sonuçlar elde edilmiştir (Esin ve diğ., 2021).

Benzer şekilde, Akgül ve diğ. (2018), Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) temelli geleneksel arazi ölçümleriyle üretilen SAM'lar ile karşılaştırmalı analizlerinde, SAM çözünürlüğü arttıkça kesim ve dolgu hacimlerinin daha hassas belirlendiğini ve yol projelendirme kararlarının doğrudan etkilendiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada GNSS ile elde edilen ortalama 35 nokta/ha yoğunluğa karşılık, yüksek çözünürlüklü verilerle 234.385 nokta/ha gibi değerler elde edilmiştir (Akgül ve diğ., 2018).

2.2. HİDROLİK SANAT YAPILARI

İşlevlerini sağlıklı bir şekilde sürdürebilmesi için orman yollarını yağmur ve kar sularının olumsuz etkilerinden koruyacak ve nakliyatın devamlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacak hidrolik sanat yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Orman yollarında kullanılan hidrolik sanat yapıları, yolların stabilitesini sağlamak, taşkın ve erozyonu önlemek, suyun doğru şekilde yönlendirilmesini sağlamak ve çevresel etkileri azaltmak için hayati öneme sahiptir. Yaygın olarak kullanılan yapılar arasında büzler, menfezler, kasisler ve köprüler bulunur. Bu yapılar, yol ağının devamlılığını sağlamanın yanı sıra, maliyet etkin çözümler sunarak uzun vadeli sürdürülebilirliği destekler.

Hidrolik sanat yapılarının tasarımında fonksiyonel, ekolojik ve ekonomik faktörler dikkate alınması gereken kriterlerdir:

1. **Fonksiyonel kriterler:** Dere geçişlerinde kullanılan hidrolik sanat yapıları, akarsu debisinin ve sedimentin güvenli bir şekilde taşınması için tasarlanır. Bu yapılarda maksimum debinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri, taşkın debisinin belirlenmesinde kullanılan Rasyonel Formül'dür. Küçük havzalarda (0,5-5 km²) ve yüzeysel akışın yüksek olduğu alanlarda uygulanabilirliği yüksektir (Bayoğlu, 1997; Damian, 2003).

2. Ekolojik kriterler: Sedimentin doğal filtreleme süreçleriyle tutulmasını sağlamak için sanat yapıları genellikle yolun eğimine ve akarsu yatağının topoğrafik özelliklerine göre konumlandırılır. Bununla birlikte, sedimentin birikme riskini azaltmak için yapısal enerji kırıncılar ve diğer tasarım önlemleri de kullanılabilir (Damian, 2003; Açıl, 2020).
3. Ekonomik Kriterler: Hidrolik sanat yapılarının tasarımında, maksimum debiyi geçirebilecek en ekonomik boyutların seçimi önemlidir. Bu süreçte, Talbot Formülü ve Manning Formülleri gibi hesaplama yöntemleri kullanılabilir. Ayrıca, yapının maliyet-etkinliği ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesi de dikkate alınmalıdır (OGM, 2008; Öztürk ve Hasdemir, 2021).

Orman yollarında kullanılan hidrolik sanat yapılarının sınıflandırılması Öztürk ve Hasdemir (2021)'e göre aşağıdaki şekildedir;

- A. Büzler
 1. Dairesel kesitli büzler (Hazır beton büzler)
 2. Sepet kulplu büzler
 3. Koruge borular
- B. Menfezler
 1. Yol üstü açık menfezler
 2. Kutu menfezler
 3. Tabliyeli menfezler
 4. Plak menfezler
 5. Kemer menfezler
 6. Çelik menfezler
- C. Kasisler
 1. Basit kasisler
 2. Büzlü kasisler
- D. Köprüler
 1. Ahşap köprüler
 2. Betonarme köprüler
 3. Çelik köprüler
 4. Prefabrik köprüler

Büzler, orman yollarının yolun düşük debili dereleri kestiği yerlerde, kazı seviyesindeki kenar hendeklerinde toplanan suların yolun altından diğer tarafa akıtılmasında ve ters eğimli yolların eğim değişim noktalarında kullanılmaktadır (Bayoğlu ve Hasdemir 1991). Dairesel kesitli (beton veya betonarme), yerinde dökme sepet kulplu (beton veya betonarme) ve plastik (koruge) gibi çeşitleri mevcuttur (Yayla 2018, Öztürk ve Hasdemir 2021). Büzler kırılma ve çatlamalara karşı duyarlı olduklarından fazla yüksek olmayan dolgu altında

kullanılırlar. Orman yollarında genel olarak 60 cm'den küçük büzler kullanılmazken, arazi eğiminin %15'ten düşük olduğu ve büzlerin mansap tarafının doğal zeminin altında kaldığı, sediment ve suyun uzaklaştırılması için uzun kanal açılması gereken yerlerde yüzeysel akışın izin verdiği sürece 50 cm çapında büzler kullanılabilir (OGM, 2008). Orman yollarında kullanılan büz çeşitleri hazır beton büzler, sepet kulplu büzler ve koruge borular alt başlıklarıyla incelenebilir.

Hazır beton büzler (dairesel kesitli büzler) 1 metre uzunluğunda, iç çapları 60 veya 80 cm olan (daha küçük çaplar kolay tıkanabilir) ve ölçülerin artırılması durumunda demirli beton olarak inşa edilen büzlerdir (Bayoğlu, 1997). Bu büzlere genellikle tek eğim verilir. Boyuna eğim %2'den az %15'ten fazla olmamalıdır. Eğim daha küçük olursa sediment birikebilir. İki eğim uygulanması gerekiyorsa giriş tarafı eğimi çıkış tarafından küçük olmalıdır. Kenar hendeklerinden suyun yolun diğer tarafına aktarılacağı durumlarda yol eksenine 30° – 45° açılarla yerleştirilmelidir. Dere ile kesişim noktalarında dere yatağının yol eksenine geliş durumuna göre açılı veya dik olarak tesis edilir. Büzler küçük dere geçitlerinde tek sıra olarak inşa edilebilecekleri gibi, geniş dere yataklarında daha büyük debileri karşılayabilmek için iki veya daha fazla sayıda sıralı olarak da inşa edilebilirler (Öztürk ve Hasdemir 2021). Dolgu veya kazı şevlerinden gelebilecek malzemenin büz ağzına akmasını engellemek hem de büz uzunluğunu azaltmak amacıyla büzlerin memba ve mansap taraflarına kagir veya beton malzemedeki başduvarlar tesis edilebilir. Başduvarların diğer bir işlevi de gelen suyun büzün giriş kısmına yönlendirilmesini sağlamaktır (Yayla 2018, Öztürk ve Hasdemir 2021). Büzlerin üzerindeki dolgu miktarı en az 30 cm yüksekliğinde tesis edilmelidir (Keller ve Sherar 2003). Dolgu yüksekliğinin 1,5 metreden düşük olduğu durumlarda mansapta başduvar yapılmadan, büzler dolgu seviyesi dışına doğru en az 30 cm dışarı çıkacak şekilde tesis edilebilirler. Mansap tarafında büz altının boşalmaması ve yol platformundan büz ağzına göçük olmaması için başduvar inşası ile birlikte, hassas zeminlerde mansap ağzının oyulmasının önüne geçebilmek amacıyla büyük taşlarla anroşman, prefabrik yapılar ve geotekstil malzemeler ile stabilizasyon yapılmalıdır (Yayla 2018).

Sepet kulplu büzler dolgu yüksekliğinin 3 metreden fazla olduğu durumlarda hazır beton büzler yerine kullanılırlar. Standart kesitli hazır kalıplara dökülerek 60 veya 80 cm iç çaplı olarak yapılırlar. Gerekliğinde iki veya daha fazla sıralı olarak da inşa edilebilirler (Bayoğlu, 1997).

Sepet kulpu büzlerin iç çapları hazır beton büzlerden oransal olarak az bir farkla (%2-3) daha geniştir. Örneğin, çapı 60 cm olan sepet kulplu büzlerin kesit alanı 0,291 m² iken, aynı çaptaki hazır beton büzlerin kesiti 0,283 m²'dir. Yine çapı 80cm'lik sepet kulplu yerinde dökme büzlerin kesit alanları 0.520m² iken, hazır beton büzlerinki 0.502 m²'dir (OGM, 2008).

Koruge borular (plastik büzler), yük altında esneme kabiliyetleri ile şekillerini koruyabilen çeşitli çap ve boylarda üretilen polietilen borulardır. Aşınma değerleri düşük, hafif ve nakliyesi kolay borulardır (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Menfezler, büzlerin yetersiz kaldığı durumlarda, dere veya akarsulardan gelecek her türlü suyun yol gövdesi altından geçirilerek uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla, gözlerinden herhangi birinin mesnet eksenleri arasındaki açıklığı 6m'den küçük olan hidrolik sanat yapılarıdır (Bayoğlu, 1997). Menfezlere içinden su ve suyla birlikte taşınan malzemenin birikmeyeceği seviyede eğim verilir. Menfezler inşa edilirken suyun menfeze doğru mümkün olduğu kadar doğal dere yatağı eğimiyle gelmesi sağlanmalıdır (Zwirn, 2002). Menfez iç eğimleri kenar hendeklerin mevcut eğiminden %2 daha fazla olacak şekilde tesis edilmelidir. Menfez eğimlerinin %4'ten büyük olduğu durumlarda menfez çıkış noktasına taş dolgu veya beton kaplama yaparak yol dolgusunun oyulmasına engel olunmalıdır (Fannin ve Lorbach, 2007). Kesitleri alandan gelebilecek maksimum debiye göre hesaplanan menfezlerde, hava payı mesafesi de dikkate alınarak akışın normal seyri değiştirilmemeye çalışılır. Bununla birlikte menfez girişleri kanat duvarlar ile huni şeklinde daraltılarak suyun menfez içine yönlendiği sağlanabilir (Turton ve diğ., 2009). Yol gövdesi altında kullanılacak menfezlerde genellikle 10 metre toprak dolduru yüksekliğine kadar, demirsiz veya çok az demirli betondan yapılan menfezler kullanılırken, daha yüksek dolduru olan yollarda betonarme menfezlerden yararlanır.

Menfez tiplerinin seçiminde, taşkınların yol gövdesine zarar vermeden geçebilmesinin sağlanmasına dikkat edilmeli; suyun akış hızı, suyun menfeze giriş yüksekliği, debi, eğim ve menfez boyu gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır (Öztürk ve Hasdemir 2021). Orman yollarında kullanılan belli başlı menfez türleri, yol üstü açık menfezler, kutu menfezler, tabliyeli menfezler, plak menfezler, kemer menfezler ve çelik menfezlerdir.

Yol üstü açık menfezler, yolun üst kısmından eğim yönünde akan yağmur sularını yol üstünden dolgu tarafına doğru saptıran yol yüzeyinde tesis edilmiş ahşap, beton veya plastik malzemeli menfezlerdir. Yol eksenine eğik durumda (10-30°) 15-20 cm çaplarında iki yuvarlak

ağacın 10 cm aralıkla yan yana konmasıyla en az %1-2 ve en fazla %5-6 eğimle inşa edilirler. Bazı durumlarda ahşap yerine plastik veya beton malzemeler de kullanılabilir (Öztürk ve Hasdemir, 2021). Yolda seyreden araç tekerleklerinin bu menfezlerde boşluk içine girmeden dönebilmesi için açıklığın en fazla 8-10 cm genişlikte olması gerekmektedir (Erdaş, 1997). Bu tip menfezler eğimin yüksek olduğu yollarda tercih edilen maliyeti düşük yapılardır (Sessions, 2007).

Kutu menfezler, dikdörtgen prizması şeklinde, iki ucu açık, kenar ayaklar üzerine oturtulan, mecradan akan suyun debisine bağlı olarak tek, iki veya üç gözlü olarak inşa edilebilen menfezlerdir. Menfezlerin üzerindeki toprak dolgu yüksekliği menfezlerin serbest açıklığına göre farklılık gösterir. Buna göre serbest açıklığı 1-1,5 m arasında olan kutu menfezlerde en fazla 15 m dolgu yüksekliği uygulanabilirken, 2-3 m serbest açıklık için dolgu yüksekliği en çok 9 metredir. İki ve üç gözlü menfezlerde ise toprak dolgu yüksekliği en fazla 6 m olmalıdır (Öztürk ve Hasdemir 2021). Menfez girişinde su akışı engellenmemeli, çıkış kısmında ise suyun aşındırması ile temelin oyulmasına izin verilmemelidir. Menfez giriş ve çıkışlarında kanat duvarlar yapılmalıdır (Bayoğlu, 1997). Debisi fazla olan ve suyla beraber iri boyutlu taşıntı malzemesi taşıyan dere mecralarında kutu menfez yapımından kaçınılmalıdır (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Tabliyeli menfezler, genellikle dolgu altında yapılmayan, açıklığı 0,6 - 3,0 m arasında değişen menfezlerdir. Temel ve kenar ayakları beton veya kagir, tabliyesi ise betonarme malzemeden yapılır (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Plak menfezler, boykesitte dolgu kitlesi bulunmadığı durumlarda kullanılan, 40, 60, 80 cm serbest açıklıklarda kenar ayaklar üzerine oturtulan, 50 cm genişlikte ve 0,80 – 1,00 – 1,20 m uzunluklarda betonarme plaklardan ibarettir. Bu menfezlerde araçlar doğrudan plak üzerinden geçerler (Bayoğlu, 1997; Öztürk ve Hasdemir, 2021).

Kemer menfezler, kutu menfezler için uygun olabilecek maksimum dolgu yüksekliklerinden daha derin dolguların altında, kagir veya beton kemerli olarak inşa edilen menfezlerdir. Tek veya çok gözlü olabilirler. Yol eksenine dik şekilde veya verev olarak tesis edilebilirler. Orman yollarında genellikle çok derin dolgular söz konusu olmadığından kemer menfezler nadir olarak kullanılır (Bayoğlu, 1997; Öztürk ve Hasdemir, 2021).

Çelik menfezler, yapımı diğer menfez türlerinden daha az zaman alan ve daha düşük maliyetli olan, 30-360 cm arasında çaplarda, dairesel kesitli olması yanı sıra kemer şeklinde de üretilen menfezlerdir. Yol eksenine 55°'ye kadar verev yerleştirilebilirler. Menfezin memba ve mansap taraflarına menfezi sabitleme amaçlı taş anroşmanlar, beton veya harçlıtaş malzemedan koruyucu yapılar tesis edilmelidir (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Kasisler, sağlam ve tercihen kayalık zeminlerde, yol ekseni boyunca içbükey şekilde, kuru ve harçlı pere ile kaplanarak inşa edilen basit ve ucuz hidrolik sanat yapılarıdır (Bayoğlu, 1997). Kasisler, yol geçkisi ve eğimi göz önünde bulundurularak dere yatağına oturtulur. Bu durumda yol platformu ve dere yatağı arasında büyük kot farkı oluşmaz. Kasislerde amaç küçük olan debiyi yol üzerinden uzaklaştırmak olduğundan, suyun debisi ve kabarma miktarı hidrolik açısından önemli değildir (Öztürk ve Hasdemir 2021). Basit kasisler ve büzlü kasisler olmak üzere iki çeşidi vardır.

Basit kasisler, derelerden gelen debinin düşük olduğu durumlarda, kasis orta kısmının yol kotundan yaklaşık 30 cm düşük olacak şekilde tesis edildiği kasis türüdür. Bu kasislerin duvar kısımları harçlıtaş veya beton malzemedan üretilir (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Büzlü kasisler, dere yatağından gelen suların daha yüksek debili olduğu durumlarda, kasis altına su akış yönüne paralel olarak yeterli sayıda büz yerleştirilerek inşa edilen, üst kısmı iç bükey kesitte, grobeton ile kaplanmış kasislerdir. Büz sayısının belirlenmesinde dere yatağının genişliği ve derenin debisi dikkate alınır. Bu tip kasislerin yan duvarları beton malzemedan tesis edilir. Debinin taşınamayacağı durumlarda yatağın şekli ve dolgu durumu da göz önünde bulundurularak, büzlü kasislerin dışında, menfezli kasisler de kullanılabilir (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Köprüler ise, debuşelerin büyümesi ve debilerin artmasıyla suların geçirilmesinde menfezlerin yeterli olmadığı durumlarda inşa edilen, dayanak açıklığı 6 m'den büyük olan hidrolik sanat yapılarıdır (Bayoğlu, 1997). Üretildikleri malzeme bakımından; ahşap köprüler, betonarme köprüler, çelik köprüler ve prefabrik köprüler olarak sınıflandırılabilirler. (Öztürk ve Hasdemir 2021). Yapı malzemesinin seçiminde dayanak açıklığı ve yüksekliği, beklenen dayanma süresi ve maliyet gibi faktörler göz önünde bulundurulur (Bayoğlu, 1997). Orman yollarında bunların yanı sıra, çelik veya lamine ahşap malzemedan portatif köprüler de kullanılmaktadır. Çelik portatif köprüler üzerine ahşap kaplama da yapılabilmektedir (Öztürk ve Hasdemir 2021). Yapım süresi oldukça kısa olan çelik portatif köprüler 10-15 m uzunluktaki

birkaç panelin yan yana konmasıyla üretilir (Sessions, 2007). Orman yollarında köprüler dere akış yönüne dik olmalıdır. Yol eksenine verev köprülerin hem kenar ayakları hem de taşıyıcı elemanları daha uzun olacağından inşaat masrafları yüksek olur (Erdaş, 1997). Benzer şekilde kurplarda köprü yapımından da ayak sayısının artacağından dolayı kaçınılmalıdır. Mecranın daraldığı zemin taşıma gücünün yüksek olduğu yerler tercih edilmelidir. Eğimleri %5'ten fazla olmamalıdır (Bayoğlu, 1997).

Orman yollarında hangi sanat yapısının, hangi boyutlarda ve hangi konumlarda tesis edileceği konuları önemlidir. Konumlandırmanın ve boyutlandırmanın yanı sıra, uygulanacak her bir alternatif farklı maliyetler ortaya koyacaktır. Bu durumda orman yol ağının devamlılığını sağlayacak en işlevsel ve ekonomik alternatiflerin seçilmesi söz konusudur.

Hidrolik sanat yapısı tiplerinin seçiminde öncelikle sanat yapılarının üzerinde dolgu olup olmadığı ve varsa bu dolgunun derinliği önemlidir (Tablo 2.1). Küçük derelerin geçildiği yerlerde hazır beton büzlerin kullanımı yamaç tarafındaki bankette en az 30 cm dolgu derinliği gerektirirken, 3 metreyi aşan dolgu derinliğinde kullanımları mümkün olmaz. Bu durumda, derinliği 3 – 6 metre arasındaki dolgu kitlelerinde sepet kulplu büzler kullanılabilir. Buna karşılık, dolgu kitlesi olmayan alanlarda büz kullanılamayacağından plak menfezlerden faydalanılmaktadır. Büzlerin veya plak menfezlerin kesit alanlarının yeterli olamayacağı daha büyük debili suların geçileceği mecralarda, dolgunun mevcut olduğu durumlarda kutu menfezler, aksi hallerde genellikle tabliyeli menfezler kullanılmaktadır. Dolgu derinliği kriteri kutu menfezlerin serbest açıklık miktarına da bağlıdır. Buna göre serbest açıklığı 1 - 1,5 m arasında olan kutu menfezlerde en fazla 15 m dolgu yüksekliği uygulanabilirken, 2 - 3 m serbest açıklık için dolgu yüksekliği en çok 9 metredir (Bayoğlu, 1997).

Tablo 2.1: Dolgu durumuna göre büz ve menfez tiplerinin seçimi (Bayoğlu, 1997).

Hidrolik sanat yapısı	Boyutlar	Dolgu durumu
Hazır beton büzler	60-80 cm	Dolgu gerekli (min 0,3 m, maks 3 m)
Sepet kulplu büzler	60-80 cm	Dolgu gerekli (min 3 m, maks 6 m)
Tabliyeli menfezler	0,60 x 0,50 m 1,20 x 0,50 m	Dolgu olmayan yerlerde
Kutu menfezler	s: 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0 m h: 0,6 – 1,0 m s: serbest açıklık h: yükseklik	Dolgu altında s: 1,0 – 1,5 m için maks 15 m s: 2,0 – 2,5 – 3,0 m için maks 9 m
Kemer menfezler	s: 0,7 – 1,0 – 2,0 – 3,0 – 4,0 – 5,0 – 6,0	Dolgu altında (maks 20 m)
Plak menfezler	1,2 – 5,4 m	Dolgu olmayan yerlerde

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından standartları konulmuş betonarme menfez ve köprülerin orman yollarında kullanımında 4 m genişlik ve 1,2 – 5,4 m dayanak açıklığına sahip olanların kullanılması mümkün olabilmektedir. Aynı idare tarafından özel durumlarda farklı derinliklerde dolgular altında kullanılmak üzere 0,95 – 3,3 m dayanak açıklığında plak menfez tip projeleri de düzenlenmiştir (Öztürk ve Hasdemir 2021). Kemer menfezler derin dolguların altında 20 metreye kadar uygulanabilmektedir. Orman yollarında ahşap, betonarme veya çelik köprüler dolgu altında kullanılmamaktadır.

Hidrolik sanat yapılarının seçiminde diğer bir önemli husus da sanat yapıların kesitlerinin alanda meydana gelebilecek en büyük debiyi geçirebilecek en ekonomik boyutların belirlenmesidir. Ülkemizde Karayolları İdaresi maksimum debinin bulunmasında Rasyonel formül ve bu debiye göre kesitin belirlenmesinde Talbot formülü veya Manning formüllerinden elde edilmiş abaklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların yanında maksimum debi tayininde SCS-CN modeli, Mockus yöntemi, Snyder yöntemi, sentetik birim hidrograf modelleri gibi yöntemler de mevcuttur.

Yüzeysel suların drenajında havzayı bir bütün olarak ele almak gerekmektedir. Yağış havzası içindeki yolların maruz kalacakları su yalnızca dere yataklarına rastlayan kısımları için değil, aynı zamanda yol üzerinde biriken suları da içermelidir. Bu nedenle sanat yapısı sayısının belirlenmesinde yağış miktarı ve debi önemli bir rol oynamaktadır (Kochenderfer, 1987). 292 sayılı tebliğe göre, kullanılacak hidrolik sanat yapılarının boyutlarının belirlenmesinde, akarsuyun belli bir dönem içinde (genellikle 50 yıl) taşıyabileceği en büyük debi esas alınmaktadır (OGM, 2008). Orman yollarında hidrolik sanat yapılarının boyutlandırılmasında suyla taşınarak gelen sediment miktarının da dikkate alınması gerekmektedir (Foltz ve Burrough, 1998). Eck ve Morgan (1987) orman yollarında sanat yapılarının belirlenmesinde yolun boyuna eğimi, enine eğim, yamaç eğimi, yıllık ortalama yağış miktarı ve bitki örtüsü gibi hususların etkili olduğu ortaya koymuştur.

Bayoğlu ve Hasdemir (1991) orman yolları üzerine inşa edilen büz ve menfezlerin boyutlandırılması üzerinde çalışmışlardır. Maksimum debinin bulunmasında rasyonel yöntem, hidrolik sanat yapılarının enkesitlerinin belirlenmesinde Talbot formülü ve boyutların belirlenmesinde akım abaklarını kullanmışlardır (Bayoğlu ve Hasdemir, 1991). Demir (1998) orman yollarının drenaj problemi ve çözüm önerileri üzerinde durmuş; uygulanabilecek tesisler ve önlemler hakkında bilgiler vermiştir.

Demir (1996), aynı çalışma alanı içinde 1/5.000 ölçekli ortofoto haritalardan elde ettiği SAM üzerinden yaptığı planlamada, İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanının hem kuzey hem de güney parselinde rasyonel yöntem ve Talbot formülünü kullanarak alanın hidrolik sanat yapısı ihtiyaçlarını tespit etmiştir.

Çalışkan (2003) çalışmasında orman yollarındaki hidrolik sanat yapılarını tanımlamış; dere-yol kesişimlerini CBS yazılımı kullanarak tespit etmiş, arazide de yaptığı çalışmalarda sanat yapısı mevcut olan ve eksikliği görülen noktaları GPS kullanarak sayısal haritalara aktarmış ve bu noktalara uygun yapıları önermiştir. Ayrıca mevcut yapıları değerlendirmiş uygun olmayan yapıların yerine inşa edilmesi gereken yapılarını belirtmiştir. Çalışkan çalışmasında Talbot Formülünü kullanarak boyutlandırma ve kıyaslama yapmıştır.

Reddy ve diğ. (2004) Hindistan'daki Vena nehir havzasındaki yaptıklarında çalışmalarında morfometrik parametrelerin ve toprak türlerinin, arazinin drenaj ve erozyon özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir.

Jain, Mishra ve Singh. (2006) yaptıkları çalışmada maksimum debinin belirlenmesinde kullanılan SCS-CN modelini ve bu modelin modifiye edilmiş versiyonu Mishra ve Singh (MS) modellerinin karışık arazi kullanım tipinde yüksek ve düşük akıntı veren havzalar için uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Ludlow (2009) yaptığı çalışmada alt havzalarda bitki örtüsü, geçirimsiz yüzey ve bitki örtüsü kapallılığını sınıflandırmak için SMA (Spectral Mixture Analyze) ve NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) yöntemlerini kullanmıştır. Akışların hacminin ve olası taşmaların gözlemlenmesinde HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System) kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar zaman içinde meydana gelen afet raporlarıyla karşılaştırılmış, mevcut sel risk verisine yardımcı bilgiler sağladığı sonucuna varmıştır.

Döner (2010) Vezirköprü Orman İşletme Müdürlüğüne bağlı Sarıçiçek Orman İşletme Şefliğindeki çalışmasında CBS yazılımı ve Talbot formülünü kullanarak hidrolik sanat yapılarının boyut ve konumlarının uygunluğunu araştırmıştır.

Çitgez (2011) Düzce'nin Kaynaşlı ilçesinde yaptığı çalışmada Kaynaşlı dere havzasında, havzanın morfometrik özelliklerine göre sel üretme potansiyelini incelemiş, havzada yağış akış ilişkisi kurarak farklı tekerrür sürelerindeki maksimum akımları elde

etmiştir. Bu akımları HEC-RAS yazılımı ile kullanarak taşkın analizi yapmıştır. Ayrıca Kaynaşlı deresinin kesitinin geçirebileceği maksimum debiyi Toprak Koruma Servisi Eğri Numarası (SCS-CN) modeli kullanarak hesaplamıştır.

Görmez (2012) Kırklareli Dereköy Orman İşletme Şefliğindeki çalışmasında CBS yazılımı kullanarak yol üzerindeki sanat yapılarını haritalandırmıştır. Mevcut drenaj yapılarının tiplerini ve deformasyon durumlarını inceleyerek önerilerde bulunmuştur.

Demir (2019)'in Artvin Tütüncüler Orman İşletme Şefliğindeki çalışmasında mevcut sanat yapıları taşkın riskine göre değerlendirilmiştir. Oluşturduğu SAM ile orman yolu sanat yapılarının kuru ve sulu dere, eğim sınıfları, bakılar ve yükseklik kademeleri açısından dağılımını incelemiştir. İşletme Şefliğine ait alanın hidrolik modelini oluşturarak, HEC-RAS yazılımı ile DSİ akım istasyonlarına ait 50 yıllık debiyi kullanarak 9 adet yapıda kararlı akım analizleri yapmıştır. Bölgedeki 59 yapıyı yeterlilik bakımından incelemiş ve bunların 50 adedinin yeterli 9 adedinin yetersiz olduğunu tespit etmiştir.

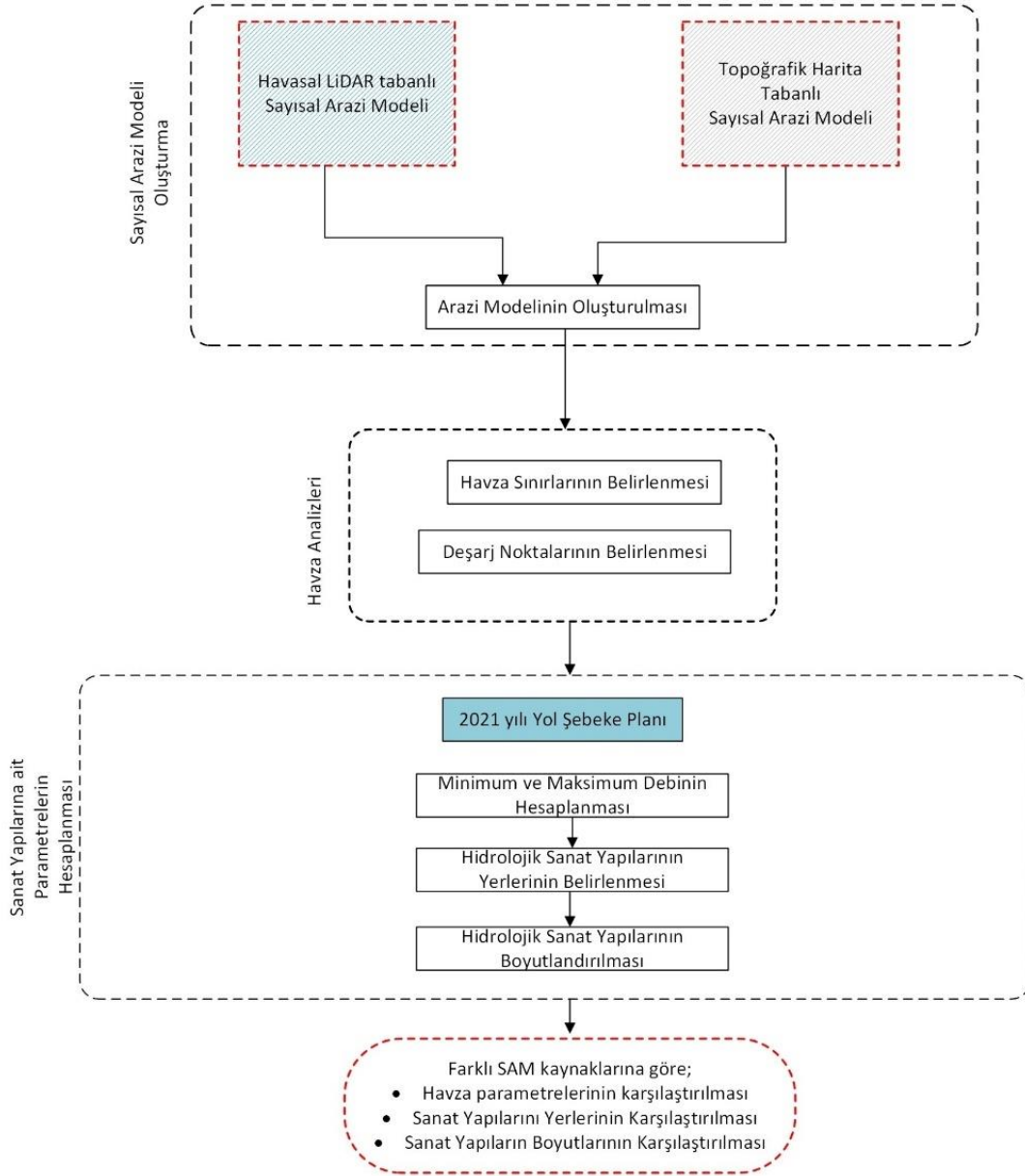
Açıl (2020), Bolu'da yaptığı çalışmasında İnsansız Hava Aracı sistemlerini kullanarak sayısal arazi modeli verilerini oluşturmuştur. Çalışma alanındaki mevcut yapıların kesit alanlarını, aynı yapıların Talbot Formülü ve debilere göre HEC-RAS kullanılarak bulunan kesit alanları ile kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda Talbot Formülüne göre bulunan kesitlerin de HEC-RAS ile bulunan kesit alanlarına göre dar olduğu görülmüştür.

3. YÖNTEM

Tezin çalışma alanı İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın kuzey parselidir. Çalışmaya konu olan hidrolik sanat yapıları bu alandaki mevcut orman yolları esas alınarak irdelenmiştir. Söz konusu alana ait 1/25.000 ölçekli memleket haritası tabanlı sayısal arazi modeli ve hava kaynaklı alınan LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli temel alınmıştır. Her iki sayısal arazi modelinden elde edilen alt havza sayıları, havza sınırları ve dere ağları, bunlara bağlı olarak oluşan maksimum debi ve yol şebeke planları dikkate alınarak hidrolik sanat yapılarının ve çeşitli strüktürel yapıların konumlandırılması ve boyutlandırılması yapılmıştır (Şekil 3.1).

Gerek sayısal arazi modellerinden gerekse arazide gerçekleştirilen etütlerden dere – yol kesişim noktalarındaki dolgu durumu incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre alanda dolgu altında kullanılmayan sanat yapıları (tabliyeli menfezler, plak menfezler) ile dolgu derinliği en az 3 metre olması gereken sepet kulpu büzler ve en fazla 20 metrelik dolgu altına tesis edilebilen kemer menfezler çalışma kapsamı dışında kalmıştır. Dayanak açıklığı için 6 metre genişlik gerektiren köprüler de çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Tez kapsamında öncelikli olarak farklı SAM kaynaklarına göre ihtiyaç duyulan sanat yapılarının konumları ve geometrik gereksinimleri kıyaslanmıştır. Ayrıca altlıklarda konumlandırılmasına gerek duyulan ve saha kontrollerinde gerekli görülen hidrolik sanat yapılarının konumsal farklılıkların sayısal arazi modeline göre ne gibi farklılıklar yarattığı ortaya konmuştur. Söz konusu değerlendirmelerde maliyet farklılıkları dikkate alınmamıştır.

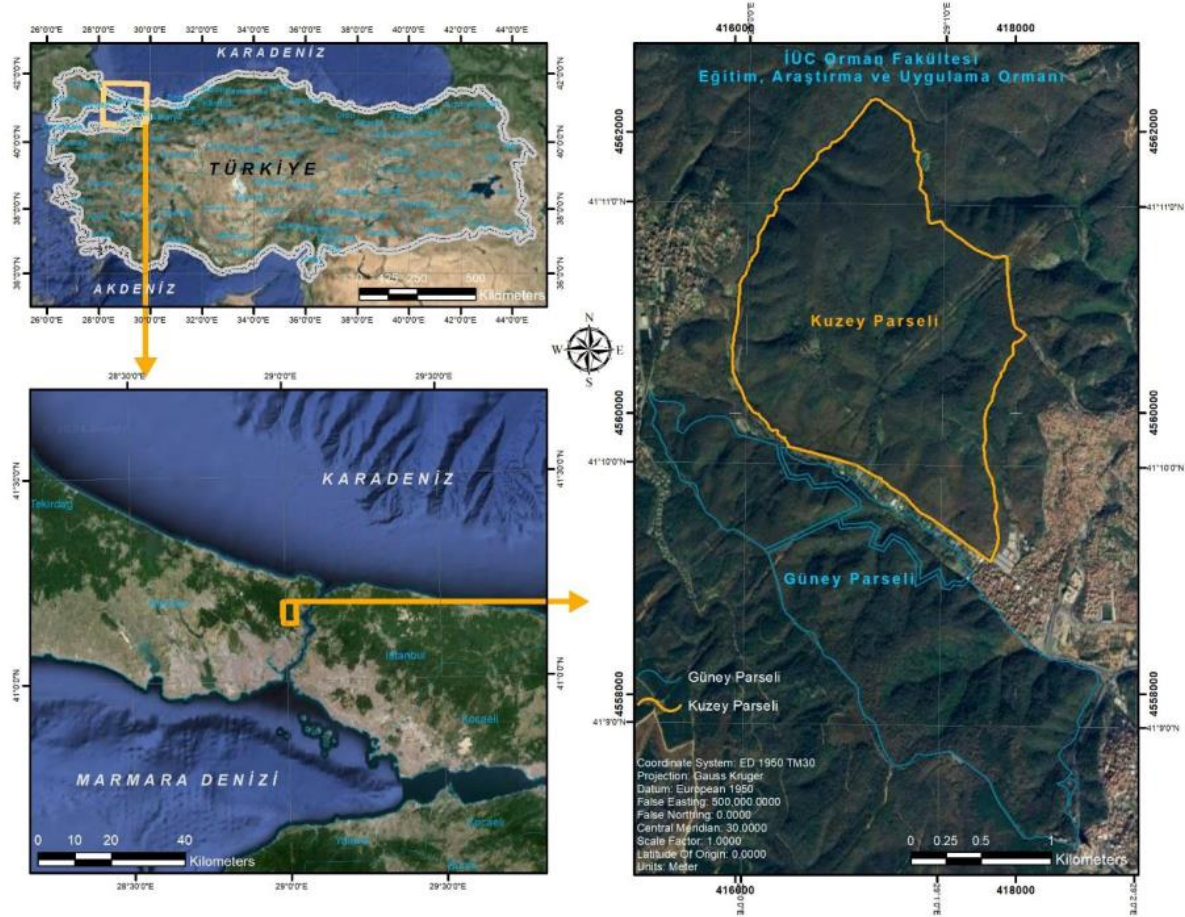


Şekil 3.1: Tez çalışmasının iş akış şeması.

3.1. ÇALIŞMA ALANINA AİT GENEL BİLGİLER

Tezin çalışma alanı İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın kuzey parseli içerisinde, Marmara Bölgesi'nin Trakya yarımadasında, Greenwich'e göre $28^{\circ} 59' 17'' - 29^{\circ} 32' 25''$ doğu boylamları ile; $41^{\circ} 09' 15'' - 41^{\circ} 11' 01''$ kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 3.2). Orman kuzeyden güneye ve doğudan batıya doğru alçalmaktadır. Bu bölgede topoğrafik yapıyı oluşturan önemli yükseltiler arasında en yüksek nokta kuzeyde Büyükdoğan Tepesi 236,19 m, en alçak nokta ise güneyde Fındıksuyu 20,0 m yüksekliğindedir. İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın jeolojik temelinin, paleozoik

taşlar (Devon) oluşturmaktadır. Ayrıca neojen, kuvarterner ve eruptif kayalardan oluşmuş formasyonlar bulunmaktadır (Demir, 1996). Alanda 2021 yılında orman yol şebeke planı güncellenmiştir. Tez çalışmasında konu olan hidrolik sanat yapıları bu plan esas alınarak irdelenmiştir.



Şekil 3.2: Çalışma alanı.

IÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı, Kuzey Trakya meşe, gürgen ormanının bir parçasını oluşturmaktadır. Eğimin fazla olduğu yamaçlarda *Quercus cerris* (Saçlı Meşe), eğimin az olduğu yerlerde ise *Quercus petrea ssp. iberica* (Sapsız Meşe) ormanları bulunmaktadır. Meşeler, *Castanea sativa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Tilia argentea*, *Tilia tomentosa*, *Corylus avellana* türleri ile karışık olarak ormanın doğu-batı yönünde bir kavşak şeklinde görülmektedir (Demir, 1996).

Araştırma alanına ait 1980-2020 yılları arasındaki iklim verileri, en yakın konumda olan Sarıyer meteoroloji istasyonundan alınmıştır (Tablo 3.1). Ağustos ayı aylık ortalama sıcaklık verilerine göre 23,7 C ile en yüksek; ocak ve şubat ayları ise 5,8 C ile en düşük sıcaklık

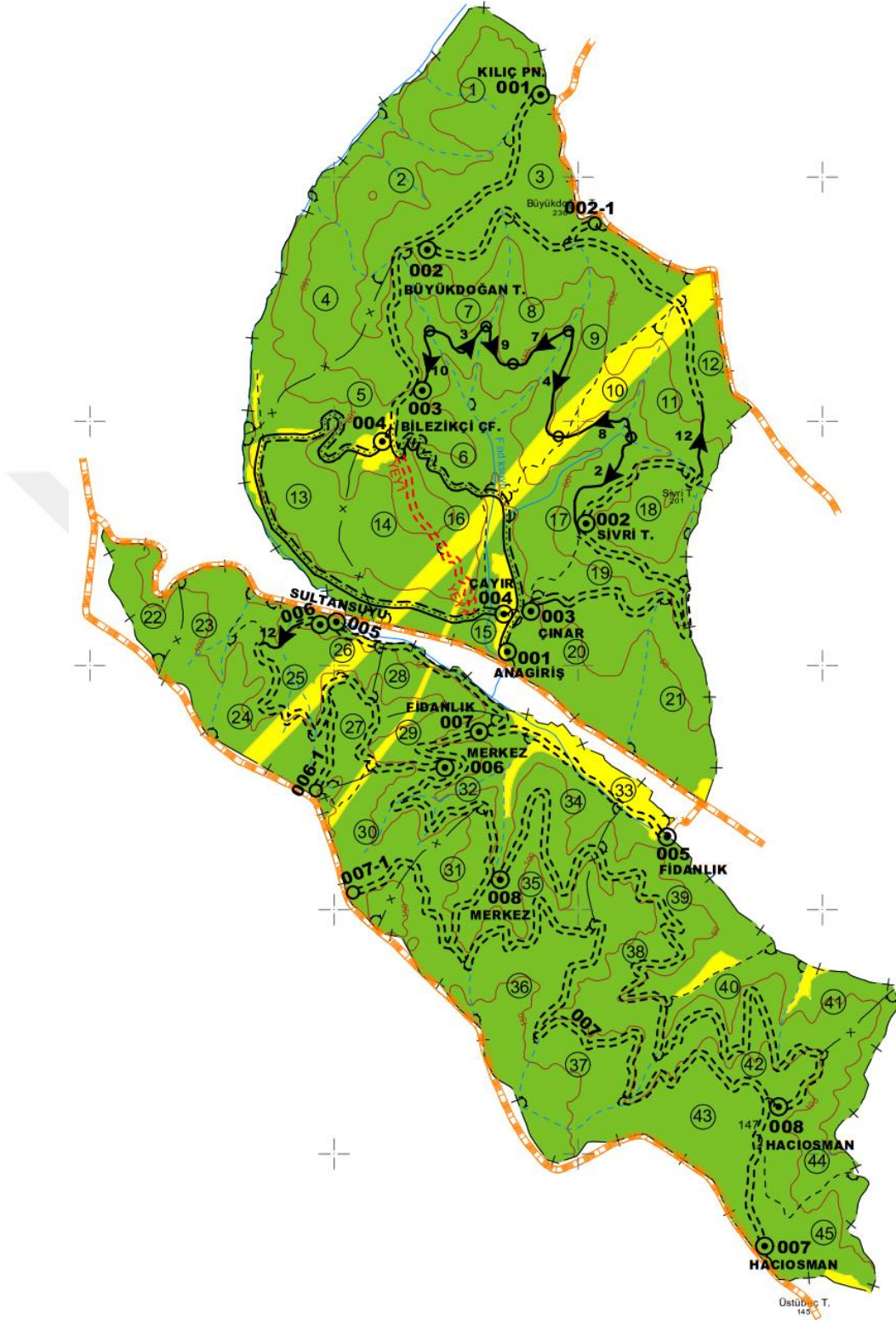
değerlerine sahiptir. En yüksek sıcaklık 27,3 C ile ağustos ayında ölçülmüşken, en düşük sıcaklık 3,3 C ile şubat ayında ölçülmüştür. 41 yıllık verilere göre aylık bazda en yüksek yağış miktarına Aralık (125,2 mm), en düşük yağış miktarına ise, mayıs ayında (36,3 mm) ulaşılmıştır. Yıllık ortalama toplam yağış ise, 858,1 m'dir. Bağıl nem %79,1 ile ocak ayında en yüksek değerdeyken, en düşük oran %75 ile eylül ayında kaydedilmiştir.

Tablo 3.1: Sarıyer Meteoroloji İstasyonu'na ait bazı iklim verileri (1980-2020).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama sıcaklık (°C)	5,8	5,8	7,6	11,4	16,0	20,8	23,3	23,7	20,3	16,0	11,5	7,9	14,2
En yüksek sıcaklık (°C)	8,6	9,0	11,5	15,8	20,6	25,3	27,3	27,5	24,3	19,6	14,6	10,7	17,9
En düşük sıcaklık (°C)	3,5	3,3	4,6	7,9	12,5	17,1	20,0	20,8	17,2	13,3	9,0	5,6	11,2
Toplam yağış (mm)	105,0	83,5	69,8	43,3	36,3	40,7	40,2	42,9	67,8	97,8	105,6	125,2	858,1
Bağıl nem (%)	79,1	78,0	75,9	75,3	76,5	75,2	75,7	75,8	75,0	77,9	78,3	78,0	76,7

3.2. MEVCUT ORMAN YOLU ŞEBEKE PLANINA AİT BİLGİLER

İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanına ait 2021 tarihli taslak yol ağı planı (Şekil 3.3) incelendiğinde; ormanın 21,6 km ham yol ve 4,0 km stabilize yol olmak üzere toplam 25,6 km yolu olduğu ve bunların 21,3 km'sinin büyük onarıma tabi tutulacağı görülmektedir (Tablo 3.2). Bunun yanında söz konusu ormanda 3,0 km uzunluğunda yeni yol yapılması planlanmaktadır. Buna göre Orman yolları yapım programı cetveline göre, ormanın 004 kodlu Bilezikçi Çiftliği – Çayırılık arasındaki yolda 100. metresinde bir sanat yapısı bulunduğu, bunun yanında diğer yollarda toplam 24,7 km'lik yol üzerinde sanat yapısı planlandığı görülmektedir (Tablo 3.2). Yine aynı yolun üzerinde bir adet menfez (1,5 x 6 x 1,5m) bulunmaktadır.



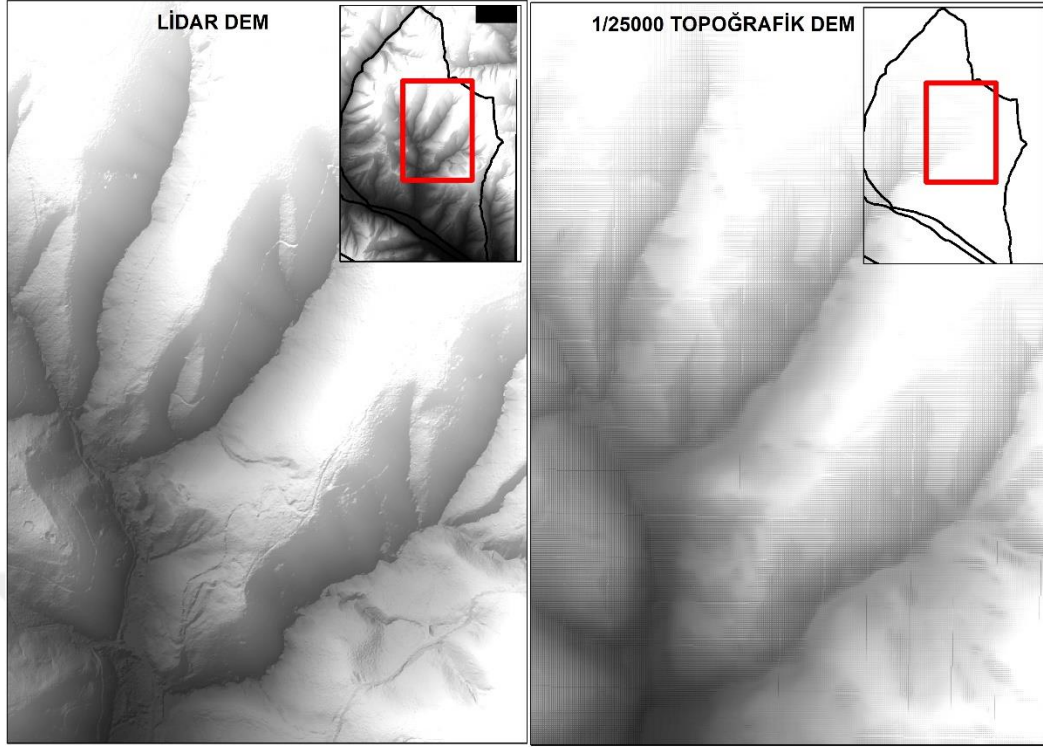
Şekil 3.3: İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'na ait 2021 tarihli yol ağı planı.

Tablo 3.2: İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'na ait orman yolları yapım programı cetveli.

Yol kod no	Yolun başlangıcı ve sonu	Tip	Yapım ön sırası	Yolun tülü			Büyük onarım tülü	Sanat yapısı		Köprü durumu		Üst yapı tülü		Orman içi tülü
				TÜM KM	MEV KM	YAP KM	YAP KM	MEV KM	YAP KM	MEV KM	YAP KM	MEV KM	YAP KM	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
001	ANAGIRIŞ - KILIÇ PN.	3	2	3+310	3+310		1+740		1+740			1+570	1+740	1+810
002	BÜYÜKDOĞAN T. - SIVRI T.	3	2	2+815	2+505	0+310	2+505		2+815				2+505	1+500
002-1	002 KODLU YOLUN SAPLAMASI	3	2	0+185	0+185		0+185		0+185					0+185
003	ÇINAR - BİLEZİKÇİ ÇF.	3	2	4+195	1+650	2+545	1+390		4+195				1+650	1+960
004	BİLEZİKÇİ ÇF. - ÇAYIR	3	3	2+390	2+390			0+100				2+390		1+000
005	SULTANSUYU - FİDANLIK	3	1	1+885	1+885		1+885		1+885				1+885	0+500
006	SULTANSUYU - MERKEZ	3	2	2+155	1+920	0+235	1+920		2+155				1+920	1+200
006-1	006 KODLU YOLUN SAPLAMASI	3	1	0+480	0+480		0+480		0+480				0+480	0+280
007	FİDANLIK - HACIOSMAN	3	1	5+975	5+975		5+975		5+975				5+975	3+075
007-1	007 KODLU YOLUN SAPLAMASI	3	2	0+735	0+735		0+735		0+735				0+735	0+335
008	MERKEZ - HACIOSMAN	3	1	4+555	4+555		4+555		4+555				4+555	2+055
				28+680	25+590	3+090	21+370	0+100	24+720			3+960	21+445	13+900

3.3. SAM VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Tez kapsamında İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanına ait 1/25.000 ölçekli memleket haritası tabanlı sayısal arazi modeli ve Hava LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli temel alınmıştır (Şekil 3.4). Alanın her iki kaynağa (Topo ve LiDAR) göre sayısal arazi modelleri oluşturulmuş ve her iki SAM kaynağı için tez alanını alt havzaların oluşturulması aşamasına kadar analiz edilmiştir.



Şekil 3.4: LiDAR ve Topo SAM kaynakları.

3.3.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Verilerinin Elde Edilmesi

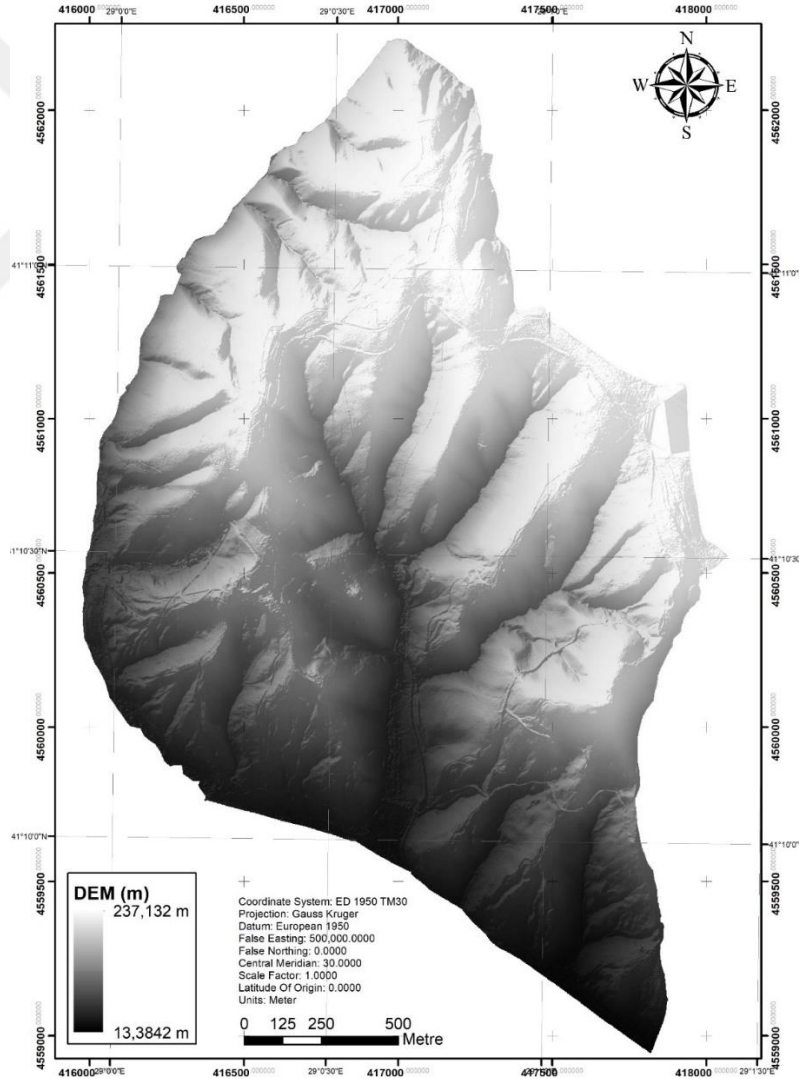
Topoğrafik haritalar, genellikle geniş alanları kapsayan ekonomik ve kolay erişilebilir veri kaynaklarıdır. Harita Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan 1/25.000 ölçekli standart topoğrafik haritalar, 10 metre aralıklarla eş yükseklik eğrileri içerir. Bu eğrilerden, ArcGIS yazılımındaki "Topo to Raster" fonksiyonu kullanılarak sürekli bir yüzey modeli oluşturulmuştur. Bu yöntem, doğal drenaj özelliklerini koruyarak arazi eğimi ve yükselti verilerini doğru bir şekilde temsil eder (Hutchinson, 1989; Esin ve diğ., 2021). Ancak, bu yöntemin çözünürlüğü sınırlıdır ve özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir.

Çalışmada topoğrafik harita tabanlı SAM verisinin üretilmesi aşamasında F21C2 pafta kodlu 1:25.000 ölçekli standart topoğrafik haritalardan yararlanılmıştır. Topo SAM için çözünürlük, Nyquist frekans konsepti kullanılarak topoğrafik harita 10 m aralıklı eş yükselti eğrilerinden belirlenmiştir. Bu konseptte göre, grid çözünürlüğü en yakın nokta çiftleri arasındaki ortalama mesafenin en fazla yarısı kadar olmalıdır (Hengl 2006; Shannon 1984). Çalışma alanındaki en yakın kontur çizgileri arasındaki ortalama mesafe 5,6 m olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda ArcGIS 10.4'te "Topo to Raster" fonksiyonu kullanılarak 2,5 m grid çözünürlüğünde Topo SAM üretilmiştir. Temelinde, Avustralya Ulusal Üniversitesi DEM

(ANUDEM) algoritmasını kullanan “Topo to Raster” fonksiyonu için detayları Hutchinson (1989) ve Hutchinson ve diğ. (2011) tarafından açıklanan algoritmada nokta, çizgi ve alan geometrisine sahip girdiler doğala yakın drenaj özellikleri gösteren raster tabanlı SAM’lar oluşturmak için kullanılmaktadır.

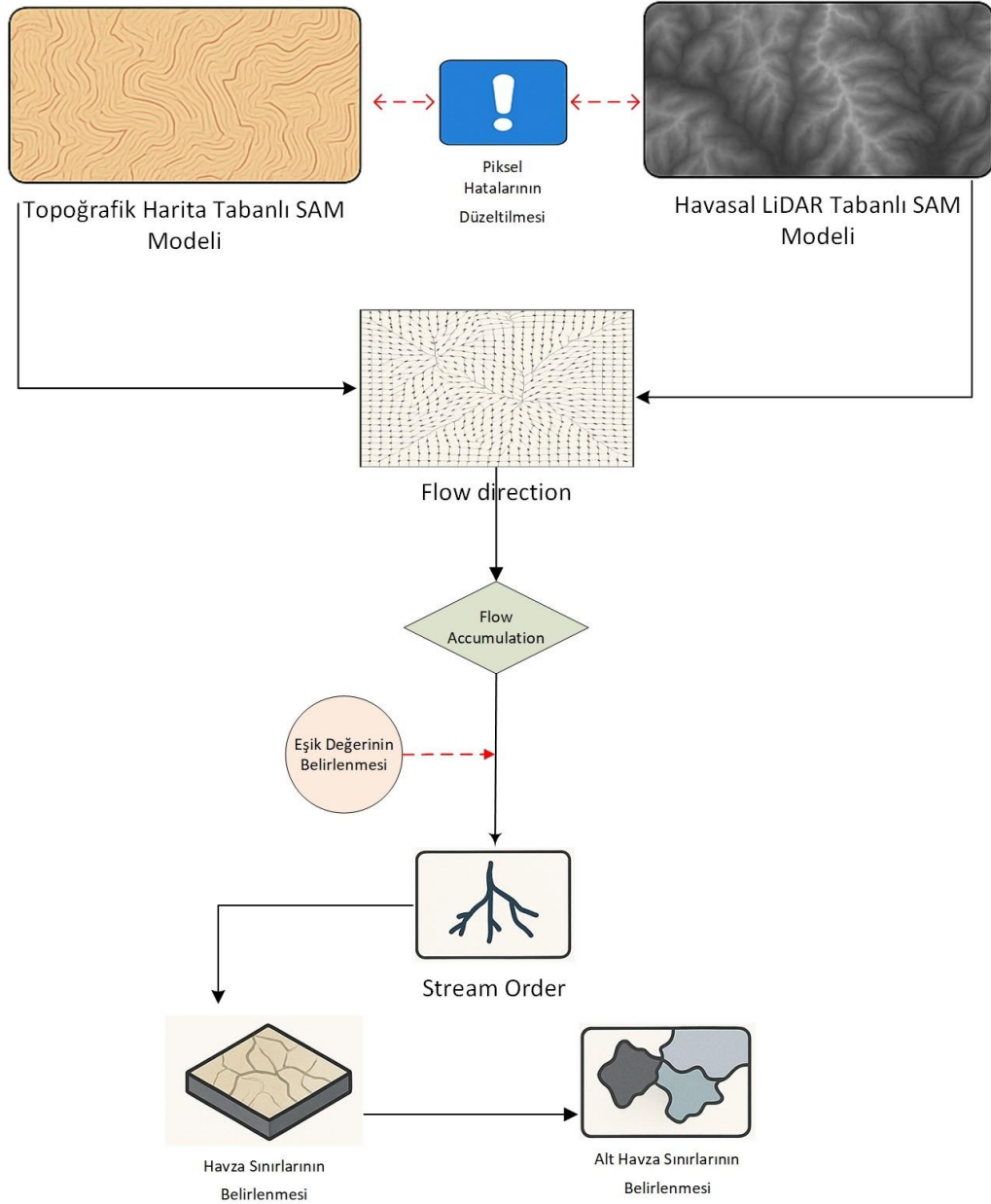
3.3.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM Verilerinin Elde Edilmesi

LiDAR (Light Detection and Ranging), havadan lazer taraması ile yüksek doğrulukta ve detaylı arazi modeli oluşturulmasını sağlar. Bununla birlikte, bu yöntem maliyetli olması nedeniyle her zaman tercih edilemeyebilir. LiDAR tabanlı SAM verisine göre, yükseklikler deniz seviyesinden 13,38 m ile 237,13 m arasında değişmektedir (Şekil 3.5). Topoğrafik olarak incelendiğinde alansal olarak homojen bir yükselti dağılımı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5: Çalışma alanına ait LiDAR tabanlı sayısal arazi modeli (SAM).

Riegl LMS Q680 LiDAR sistemi kullanılarak, İstanbul Büyükşehir Belediyesi için alımları gerçekleştirilen hava LiDAR verilerinin nokta yoğunluğu yaklaşık 16 nokta/m²'dir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi iştiraki olan BİMTAŞ (Boğaziçi Peyzaj İnşaat Müşavirlik Teknik Hizmetler San. Tic. A.Ş.) tarafından işlenerek 25 cm çözünürlüğe sahip olan LiDAR SAM verileri üretilmiştir. Yaklaşık 0,25 metre çözünürlüğe sahip SAM, çıplak zemin (bare-earth) modeli oluşturmak amacıyla noktaların filtrelenmesi ve interpolasyon teknikleri ile işlenmiştir. Bu işlemde, ANUDEM algoritması kullanılmıştır (Hutchinson ve diğ., 2011). LiDAR verileri, özellikle ormanlık alanlarda ağaç örtüsünün altındaki arazi yüzeyini doğru bir şekilde temsil edebilmesi açısından önemli bir avantaja sahiptir (Murphy ve diğ., 2008). Hava LiDAR kaynaklı nokta bulutlarından elde edilen çıplak zeminin SAM üretilmesi filtreleme ve filtrelenmiş zemin noktalarının enterpolasyon yöntemiyle işlenmesi olmak üzere iki aşamadan meydana gelir (Aryal ve diğ., 2017). Çalışmada, nokta bulutu verilerine kombine bir filtreleme işlemi uygulanmış ve görsel yorumlama kullanılarak veri doğrulaması yapılmıştır. Filtrelenmiş nokta bulutu verilerinden SAM üretimi aşamasında TIN (Triangulated Irregular Network-Düzensiz Üçgen Ağı) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın bu aşamadaki iş akışı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Havza parametrelerinin elde edilmişindeki iş akışı.

3.3.3. Farklı SAM Verilerinin Karşılaştırılması

Elde edilen iki SAM veri seti arasındaki farklılıklar incelenerek, ilerleyen bölümlerde de değinilecek olan veriler arası temel farklılıkların sayısal olarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda iki farklı teknikte üretilmiş iki veri seti arasındaki en büyük fark çözünürlük, hassasiyet (precision) ve doğruluk olarak sıralanabilir. Çözünürlük ve hassasiyet ile doğruluk ve hassasiyet kavramları genellikle birbirleri ile karıştırılmaktadır. Çözünürlük raster verilerde bir pikselin bir kenarının uzunluğu olarak tanımlanabilir. Doğruluk ise

genellikle daha üstün teknikler ile elde edilmiş değerler ile hedef teknik kullanılarak elde edilmiş değerlerin kıyas edilmesi ile ölçülmektedir. Tematik ve mekânsal doğruluk olarak iki kısımda incelenmektedir (Vieira ve diğ., 2004). Hassasiyet kavramı ise verideki ayrıntıları veya ölçümlerdeki tekrarlanabilirliğini ölçmek için kullanılan bir terminolojidir (Franzinger, 2004). Bu kapsamıyla incelendiğinde sayısal arazi modelleri için mekânsal doğruluk ve çözünürlük kavramları üzerinden veriler ile ilgili değerlendirilmelerde bulunulabilir. Ayrıca türetilen niteliksel verilerin yine birbirleri ile kıyas edilmesiyle bu iki veri seti değerlendirilebilir.

Yapılan birçok çalışmada LiDAR teknolojisi mekânsal bilgi elde edilmesi aşamasında en modern ve doğru teknoloji olarak kabul edilmektedir (Esin ve diğ., 2004). Bu kapsamıyla değerlendirildiğinde çalışmada kullanılan LiDAR verisi tabanlı sayısal arazi modelinin Topoğrafik harita tabanlı sayısal arazi modeline göre üstün olduğu varsayılabilir. Ancak gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında her iki veri seti bağımsız olarak değerlendirilerek üstünlükleri veya zayıflıkları araştırılmıştır. Her iki veri seti arasındaki farklılıklar, farklı metrikler üzerinden değerlendirilerek ortaya konulmuştur.

İlk olarak her iki veri seti arasındaki temel farklılıklar mekânsal olarak araştırılmıştır. Bu aşamada iki veri setinin birbirinden farkı alınarak oluşturulan fark verisi ($Fark_{(Z)}$), farkların mutlak değeri üzerinden elde edilen mutlak fark verisi ($Mutlak Fark_{(Z)}$), farkların ortalaması alınarak elde edilen ortalama fark verisi ($Ort. Fark_{(Z)}$) ve mutlak farkların ortalamasının alınması ile elde edilen ortalama mutlak fark verileri ($Ort. Mutlak Fark_{(Z)}$) ve bu verilere ait istatistikler üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her iki SAM veri seti arasındaki hacimsel farklar da yine modellenerek ortaya konulmuştur. Fark verilerinin elde edilmesi aşamasında kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir.

$$Fark_{(Z)} = Z_{Topo-SAM} - Z_{LiDAR-SAM} \quad (3.1)$$

$$Mutlak Fark_{(Z)} = |Z_{Topo-SAM} - Z_{LiDAR-SAM}| \quad (3.2)$$

$$Ort. Fark_{(Z)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{Topo-SAM(i)} - Z_{LiDAR-SAM(i)}) \quad (3.3)$$

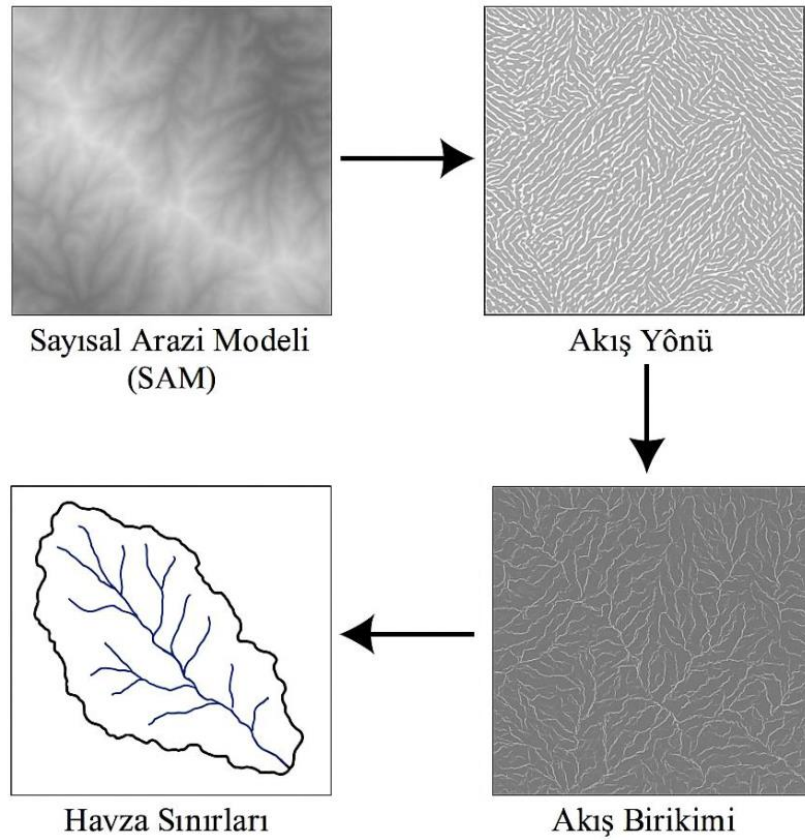
$$Ort. Mutlak Fark_{(Z)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|Z_{Topo-SAM(i)} - Z_{LiDAR-SAM(i)}|) \quad (3.4)$$

Fark verisi temelde her iki sayısal arazi modelinin birbirinden çıkarılması ile elde edilebilir. Ancak genellikle değerlendirilen veriden referans veri çıkartılarak sonuç elde

edilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden LiDAR tabanlı SAM verisi çıkartılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur. Benzer şekilde Ortalama Fark verilerinin elde edilmesinde de aynı sıra tercih edilmiştir. Mutlak farkların bulunmasında ise sıraya gereksinim duyulmadan değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ardından, iki farklı veri setinden türetilmiş ve arazinin havza yapısının ortaya koyulmasında büyük önem taşıyan eğim ve bakı değişkenleri açısından karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.4. HAVZA SINIRLARININ BELİRLENMESİ

Çalışmada kullanılan iki farklı SAM kaynağı, yüksek doğrulukta hidrolojik modelleme ve havza sınırlarının belirlenmesi açısından temel veri setlerini oluşturmaktadır. CBS ve SAM kullanılarak yürütülen analizler, havza yönetimi ve su kaynakları planlaması için kritik bilgiler sağlamaktadır. Bu bağlamda, akış yönü ve akış birikimi analizleri ArcGIS 10.4 yazılımı üzerinde yer alan hidrolojik modelleme araçları ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Bu analizler, suyun arazi üzerindeki yönünü ve toplandığı noktaları belirleyerek hem doğal hem de yapay drenaj sistemlerinin modellenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.7: Havza sınırın belirlenmesi süreci.

Akış birikimi katmanı, her bir hücrenin yukarı havzasından gelen potansiyel yüzey akışını hesaplayarak, suyun birikme eğilimi gösterdiği alanları ortaya koyar. Bu yaklaşım, Horton (1945) tarafından tanımlanan drenaj yoğunluğu ve su toplama süreçlerinin temel prensiplerine dayanmaktadır. Özellikle taşkın riski analizlerinde, bu tür birikim değerleri karar vericiler için kritik öneme sahiptir.

Akış yönü katmanı, SAM verileri kullanılarak her hücrenin en düşük yükseklik değerine sahip komşu hücreye yönlendirilmesiyle oluşturulur. Bu analizde çeşitli algoritmalar kullanılabilirlikle birlikte, bu çalışmada basitliği ve hızı nedeniyle CBS yazılımlarının büyük bir çoğunluğunda kullanılan D8 algoritması tercih edilmiştir (Tarboton, 1997). Akış birikimi analizi ise bu yönlendirme doğrultusunda, her hücreden geçen toplam yüzey akışını hesaplayarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, suyun doğal olarak biriktiği alanlar ve olası yüzey drenaj hatları tespit edilmiştir (Quinn ve diğ., 1991).

Havza sınırlarının belirlenmesi, söz konusu akış analizlerine dayalı olarak yapılmıştır. Akış birikimi değerleri belirli bir eşik değer üzerinde olan hücrelerde yoğunlaştığında, bu noktalar potansiyel akarsu kanalları olarak kabul edilmiştir. Bu kanalların birleşim noktaları ise havzanın çıkış (pour point) noktaları olarak belirlenmiş ve akış yönü verileriyle geriye doğru izlenerek havza sınırları ortaya konulmuştur. Bu yöntem, su kaynaklarının yönetimi, taşkın kontrolü ve kentsel altyapı planlaması gibi alanlarda güvenilir bir temel sağlar (Maidment, 2002).

3.4.1. Akış Yönü Analizi (Flow Direction)

Akış yönü analizi, suyun topoğrafya üzerinde hangi yöne hareket edeceğini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu analizde de, D8 algoritması kullanılmıştır; bu yöntem, her hücredeki suyun en dik eğim doğrultusundaki komşu hücreye aktığını varsayar (O'Callaghan ve Mark, 1984). SAM üzerinde depresyonlar ve düz alanlar bulunması, bu süreçte ek zorluklar yaratır. Özellikle düz alanlarda paralel akış çizgilerinin oluşmasını önlemek için gelişmiş algoritmalar uygulanmıştır (Garbrecht ve Martz, 1997; Zhang ve Huang, 2009; Zhang ve diğ., 2017).

Akış yönü analizi, doğru drenaj ağlarının ve havza sınırlarının çıkarılması için kritik bir adımdır. Bu analiz sonucunda her hücredeki suyun hareket yönü belirlenmiş ve drenaj ağlarının genel geometrisi oluşturulmuştur. Bu süreç, özellikle topoğrafik düz alanlarda doğru akış

yollarını tanımlamak için optimize edilmiş algoritmaların kullanılmasını gerektirmektedir (Barnes ve diğ., 2014).

3.4.2. Akış Birikimi Analizi (Flow Accumulation)

Akış birikimi analizi, akış yönü analizinin sonuçları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir hücreye ulaşan toplam su miktarını hesaplamıştır (Şekil 3.7). Akış birikimi, drenaj ağlarının başlangıç noktalarını belirlemek için kullanılan temel bir metriktir. Tarboton (1997) tarafından geliştirilen yöntemlere dayalı olarak, suyun yüksek eğimli bölgelerden akarak birikim oluşturduğu hücreler belirlenmiştir.

Bu adımda, akış birikimi eşik değerlerinin seçimi oldukça önemlidir. Düşük eşik değerleri daha yoğun bir drenaj ağı oluştururken, yüksek eşik değerleri yalnızca ana akış hatlarını ortaya çıkarır (Wu ve diğ., 2017). Düz alanların işlenmesi, birikim analizi sırasında çözülmesi gereken bir diğer önemli konudur; bu alanlarda doğru akış yollarını tanımlamak için optimize edilmiş algoritmalar uygulanmıştır (Barnes ve diğ., 2014).

3.4.3. Akış Başlangıç Noktalarının Belirlenmesi

Akış birikimi analizinden elde edilen verilere dayanarak, drenaj ağlarının başlatılacağı noktalar tanımlanmıştır. Bu noktalar, akış birikim katmanında belirlenen eşik değeri aşan hücrelerdir. Eşik değerlerin seçiminde kullanılan SAM'ın çözünürlüğü büyük önem taşımaktadır. LiDAR tabanlı yüksek çözünürlüklü SAM'larda daha yüksek eşik değerleri kullanılmış, buna karşın topoğrafik harita tabanlı düşük çözünürlüklü modellerde daha düşük eşik değerleri tercih edilmiştir (Wu ve diğ., 2017; Ariza-Villaverde ve diğ., 2015).

Operatör deneyimi ve alanın topoğrafik özellikleri de eşik değeri seçiminde belirleyici olmuştur (Hancock ve diğ., 2006; Moussa, 2009). Yapılan testler sonucunda, çalışma alanını ve drenaj ağını en iyi temsil eden eşik değerler belirlenerek kullanılmıştır (Esin ve diğ., 2021).

3.4.4. Havza Sınırlarının Çizimi ve Dönüştürülmesi:

Akış yönü ve akış başlangıç noktalarından hareketle, her bir drenaj havzası sınırı otomatik olarak belirlenmiştir. Bu sınırlar, suyun hangi alanlardan toplandığını ve hangi çıkış noktasına yöneldiğini göstermektedir (Strahler, 1964). Raster formatında oluşturulan havza sınırları, analizlerde ve haritalamalarda daha esnek kullanım sağlamak amacıyla vektör formatına dönüştürülmüştür (Hutchinson, 1989; Martz ve Garbrecht, 1992). Bu dönüşüm, sınırların görselleştirilmesini ve topolojik analizlerde kullanılmasını kolaylaştırmıştır.

3.5. HİDROLİK SANAT YAPILARININ KONUMLANDIRILMASI

Dereler ve yolların kesişim noktalarındaki hidrolik sanat yapılarını doğru bir şekilde konumlandırmak hem çevresel etkileri azaltmak hem de suyun doğal akışını sürdürmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu süreçte, drenaj ağlarının ve havzaların analizi sırasında, yollar ile derelerin kesişim noktaları tespit edilmiştir. Bu işlem, raster tabanlı drenaj verilerinin vektör formatına dönüştürülmesinin ardından, ArcGIS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akış yönü ve akış birikimi katmanları ile oluşturulan drenaj ağları, derelerin yollara en yakın kesişim noktalarını belirlemek için temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır (Damian, 2003; Açıl, 2020). Her iki kaynak için de dere kolları yağış zamanında akış meydana getirebileceği için kuru dere, geçici dere veya devamlı dere olarak ayırt etmeksizin değerlendirmeye alınmıştır. Dereler ve yollar arasındaki kesişim noktaları belirlendikten sonra, bu noktalarda uygun hidrolik sanat yapısı yerlerinin seçimi yapılmıştır.

Farklı sayısal arazi modeli kaynaklarına göre belirlenen sanat yapılarından her iki kaynak üzerinde de aynı kesişim noktalarına denk gelen sanat yapılarının konumları (X, Y ve Z eksenlerinde) da incelenmiş, konumsal farklılıklar karesel ortalama hata yöntemiyle belirlenmiştir. Bu analizde kullanılan üç temel istatistiksel ölçüt aşağı belirtildiği gibi:

- **Ortalama fark (μ)**, iki veri kümesi arasındaki sistematik sapmayı gösterir;

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Li - Ti) \quad (3.5)$$

- **Standart sapma (σ)**, verilerin ortalamadan ne kadar saptığını belirtir;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((Li - Ti) - \mu)^2} \quad (3.6)$$

- **Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)**, genel hata büyüklüğünü ölçmek için kullanılır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Li - Ti)^2} \quad (3.7)$$

Bunların yanı sıra, hidrolik sanat yapılarının konumsal ilişkilerini değerlendirmek amacıyla, aynı kodlu yollar üzerinde bulunan yapıların birbiri arasındaki ortalama mesafeleri (aralıkları) de hesaplanmış; böylece her iki kaynak için de bir yol üzerindeki sanat yapısı sıklığı karşılaştırılmıştır. Söz konusu hesaplamalar, CBS ortamında gerçekleştirilmiş ve Denklem 3.8'de gösterilen formül aracılığıyla ortalama aralık değeri elde edilmiştir (Longley ve diğ., 2015; Demers, 2008).

$$\text{Ortalama Mesafe} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \text{Mesafe}(N_i, N_{i+1})}{n-1} \quad (3.8)$$

N_i : ilk sanat yapısının konumu

N_{i+1} : bir sonraki sanat yapısının konumu

n : yol üzerindeki toplam sanat yapısı sayısını ifade eder.

Sonrasında havza üzerinde oluşabilecek maksimum debilerin tespiti için gerekli olan havza alanı, en uzun dere uzunlukları ve eğim değerleri çıkarılmıştır. Ardından seçilen noktalarda dolgu derinliği ve maksimum debiler dikkate alınarak sanat yapısı tasarımı yapılmıştır.

3.6. HİDROLİK SANAT YAPILARININ SEÇİMİ VE BOYUTLANDIRILMASI

Hidrolik sanat yapılarının seçimi aşamasında öncelikle tasarlanacak yapının üzerindeki dolgu derinliği dikkate alınmıştır (Tablo 2.1). Diğer bir önemli tasarım kriteri olan maksimum debiler göz önünde bulundurulduğunda sanat yapılarının seçimine en küçük debiyi karşılayabilecek hazır beton büzlerden başlanarak, debiler yükseldikçe daha büyük çaplardaki büzler ve farklı genişliklerdeki kutu menfezlere doğru devam edilmiştir.

Sanat yapılarının kesitlerinin alanda meydana gelebilecek en büyük debiyi, en ekonomik şartlardaki boyutlarla geçirebilmesi hidrolik sanat yapılarının seçimindeki önemli hususlardan biridir. Hidrolik sanat yapılarının tasarlanan ömürlerine göre belirli tekerrür aralıklarına bağlı olarak ampirik formüller, yağış akış ilişkilerinin kullanıldığı hesaplamalar ve birtakım istatistiki yöntemlerle bu debiler tahmin edilebilmektedir (Gül, 1999; Çalışkan ve Acar, 2003). Bazı havzalarda önceden tesis edilmiş akım istasyonlarının verileri o alanda meydana gelebilecek maksimum debinin tayininde kullanılabilirken her hidrolik sanat yapısı için bir akım istasyonunun inşası mümkün olmayacağından bu debilerin hesaplamaya dayalı yöntemlerle tespit edilmesini gerektirir. Ülkemizde Karayolları İdaresi maksimum debinin bulunmasında Rasyonel formül ve bu debiye göre kesitin belirlemede Manning formüllerinden elde edilmiş abaklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Orman yollarında debuşelerin belirlenmesinde ise, Talbot formülü de kullanılabilir (OGM, 2008). Tez çalışmada yağış süresinin havzanın geçiş süresinden büyük veya eşit olduğu küçük havzalarda (0.5-5 km²) tercih edilen bir yöntem olması dolaylı Rasyonel yöntem tercih edilmiştir.

Rasyonel yöntemde, yağışın toplanma süresi içinde ve havzanın tamamına homojen bir şekilde yağdığı kabul edilir. Geçirimsiz alanların yüzdesi büyük olan yerlerde ve yağış süresinin havzanın geçiş süresinden büyük veya eşit olduğu küçük havzalarda (0,5-5 km²) uygulanabilmektedir.

$$Q = (c i A)/360 \quad (3.9)$$

Formülde;

Q: Maksimum debi (m³/sn)

c: Yüzeysel akış katsayısı (yüzeysel akış miktarının toplam yağış miktarına yüzde olarak oranı)

i: Toplanma süresine eşit süredeki yağış şiddeti (mm/sa)

A: Havza alanı (ha)

Akış katsayısı (c), havzanın topoğrafyasına, yüzey pürüzlülüğüne ve bitki örtüsü durumuna göre değişiklik göstermektedir 100 sene tekerrürlü taşkınlar için C₁₀₀ değerleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Herhangi bir tekerrür süresi için C_T değerleri ise aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır (Kızılkaya, 1988). Rasyonel formül için gerekli olan akış katsayısı değerleri, yağış şiddetinin tekerrür aralığında karar verildiği gibi 25, 50 ve 100 yıllık olacak şekilde hesaplanmıştır.

$$C_T = C_{100} \left(\frac{T}{100} \right)^{0,19} \quad (3.10)$$

Formülde;

C: Yüzeysel akış katsayısı (yüzeysel akış miktarının toplam yağış miktarına yüzde olarak oranı)

T: tekerrür süresi (yıl)

Toplanma (konsantrasyon) süresi: havzanın en uzak noktasına düşen yağışın mansaba gelmesine kadar geçen süre olarak ifade edilir. Toplanma süresi arazinin bitki örtüsüne, eğime, havzanın büyüklüğüne ve dere sıklığına bağlı olarak değişmektedir. Hesaplamalarda Kirpich'in (1940) formülünden yararlanılmıştır.

$$T_c = 0,0653 L^{0,77} S^{-0,385} \quad (3.11)$$

Formülde;

T_c : Toplanma süresi (sa)

L : ana derenin uzunluğu (km)

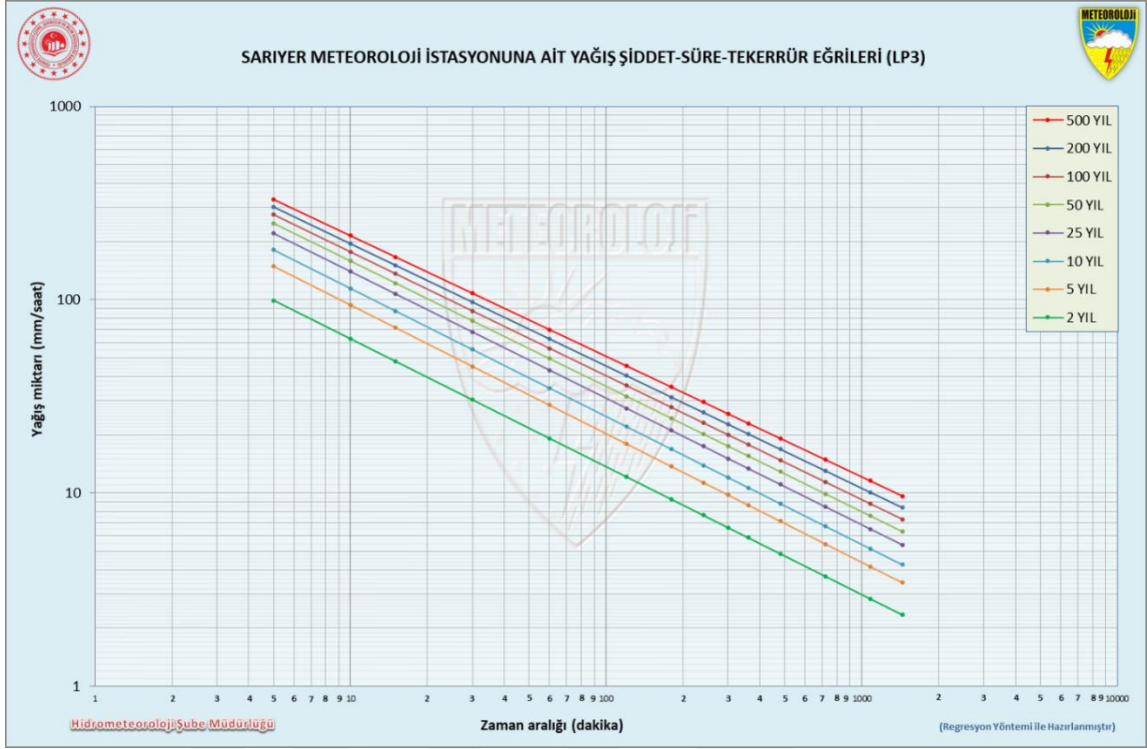
S : ana derenin eğimi (m/m)

Tablo 3.3: Akış katsayıları (Sonuç, 1977; Singh, 1992).

Alan Özellikleri	Akış Katsayısı (C_{100})
Su sızdırmaz yüzeyler	0,90-0,95
Dik ve çıplak yüzeyler	0,80-0,90
Dalgali ve çıplak yüzeyler	0,60-0,80
Düz ve çıplak yüzeyler	0,50-0,70
Dalgali meralar	0,40-0,65
Yaprak döken ormanlar	0,35-0,60
İğne yapraklı ormanlar	0,25-0,50
Meyve bahçeleri	0,15-0,40
Vadi içi tarım alanları	0,10-0,30

Yağış şiddetinin tekerrür aralığına kararı yapının maliyeti alanın korunma durumu hassasiyeti ile ilişkilidir. 292 sayılı tebliğe göre, hidrolik sanat yapıları için genellikle 50 yıl tekerrürlü taşıyabileceği en büyük debi esas alınmaktadır (OGM, 2008). Tez çalışmasında bu değerlerin bir üst ve bir alt kademeleri de hesaba katılarak 25 ve 100 yıl tekerrürlü yağışlar da dahil edilmiştir.

Rasyonel yöntemin bir diğer parametresi olan yağış şiddeti değerlerinin tespit edilmesi için Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Sistemi'nden (MEVBİS) elde edilen Sarıyer Meteoroloji İstasyonuna ait 1955-2020 yılları arasındaki yağış şiddet süre tekerrür eğrilerinden faydalanılmıştır (Şekil 3.8). Bu bağlamda, Sarıyer'in 1955-2020 seneleri arasındaki 25, 50 ve 100 yıl dönüş aralıklı 24 saatlik yıllık maksimum yağış yükseklik değerlerinin dağılımlarından kullanılmıştır (Şen ve Aksu, 2021). Hesaplanan toplanma sürelerinin ilgili eğrilerle keşitirilmesiyle 25, 50 ve 100 yıllık yağış şiddeti değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.8: Sarıyer Yağış Şiddeti-Süre-Frekans eğrileri (1955-2020).

Yol ağlarının dere kolları ile kesiştirilmesi ile elde edilen her bir deşarj noktasının oluşturduğu alt havzalara ait yüzeysel akış katsayılarının, toplanma süresine eşit süredeki yağış şiddeti değerlerinin ve havza alanlarının hesaplanmalarının ardından her bir alt havza veya başka bir deyişle sanat yapısı kesit alanından geçmesi muhtemel maksimum debiler belirlenmiştir.

Muhtemel maksimum debilerin hesaplanmasının ardından bu debileri karşılayabilecek hidrolik sanat yapılarının kesitlerinin işlevsel ve ekonomik olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. İlk yaklaşım olarak Talbot formülü ile muhtemel kesit alanları hesaplanmıştır.

$$S = 5,791 \cdot C \cdot \sqrt[4]{A^3} \quad (3.12)$$

S : Hidrolik sanat yapısının enkesit alanı (m^2)

C : Talbot katsayısı

A : Havza alanı (km^2)

Ardından ilk yaklaşım ile tespit edilen kesitlerin hesaplanan debileri karşılayıp karşılayamayacağı boyut analizi ile kontrol edilmiştir. Bunlar içinde büzlerin kesit boyutlarını

aşan değerler için en ekonomik kesitli kutu menfezler belirlenmiştir. En küçük kesitli kutu menfez boyutlarından başlanarak ve boyut analizindeki aşamalara göre menfez genişlikleri belirlenmiştir.

Tasarlanacak menfez içinde normal su yüksekliği kritik akım yüksekliğinden küçük ise ($D_n < D_k$) menfez girişinde kabarmaya karşı önlem alınmalıdır. Normal su yüksekliği kritik akım yüksekliğinden büyük ise ($D_n > D_k$) menfezin çıkışında kabarmaya karşı önlem alınmalıdır. Minimum akım hızının sağlanabilmesi için menfez eğiminin en az %0,5 olması gerekmektedir. Aşırı akım hızlarının önüne geçmek içinse maksimum menfez eğimi %10 olmalıdır (KGM, 2005).

$$D_k = \sqrt[3]{Q^2 / (9,81 * B^2)} \quad (3.13)$$

Denklemden;

D_k : Kritik derinlik (m)

Q : Menfez debisi (m^3/sn)

B : Menfez genişliği (m)

Kritik eğim, hidrolik sanata yapısındaki debiyi maksimum yapan eğimdir. Bu şartlarda sanat yapısı içinden geçen suyun akım hızı da kritik hız (V_k) denir.

$$V_k = \frac{Q}{(B * D_k)} \quad (3.14)$$

Denklemden;

V_k : Kritik hız (m/sn)

D_k : Kritik derinlik (m)

B : Menfez genişliği (m)

$$V_n = \frac{Q}{(B * D_n)} \quad (3.15)$$

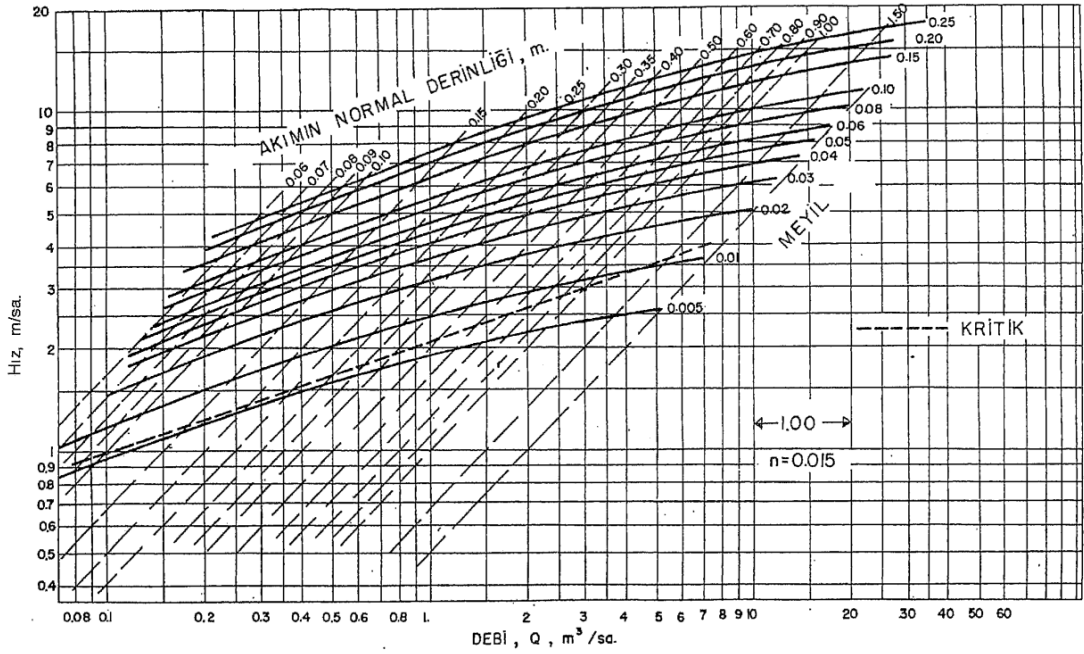
Denklemdede;

V_n : Normal hız (m/sn)

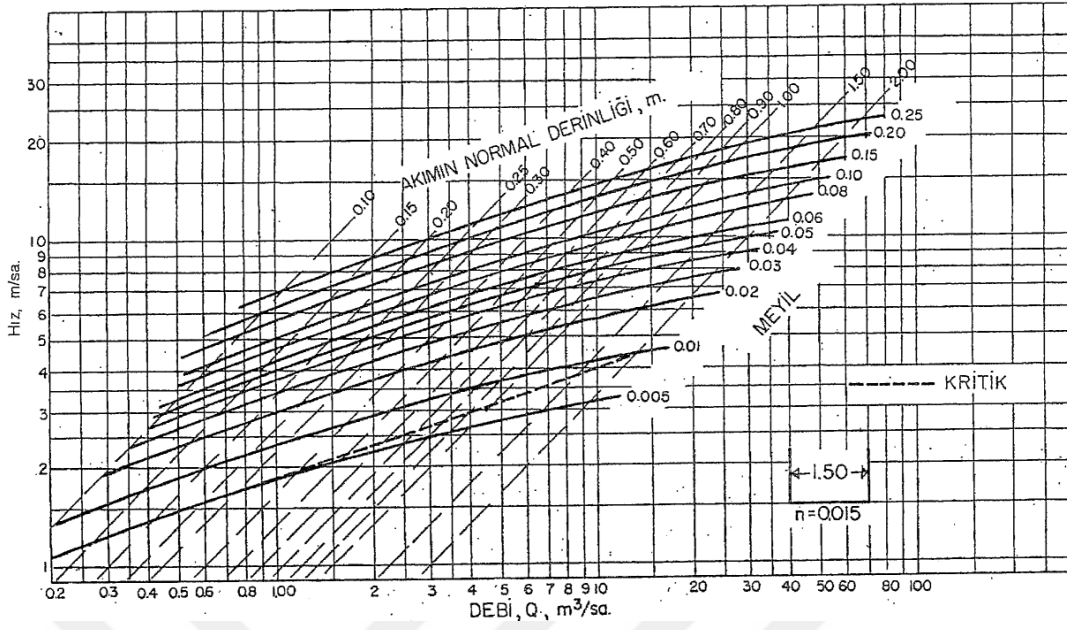
D_n : Normal derinlik (m)

B : Menfez genişliği (m)

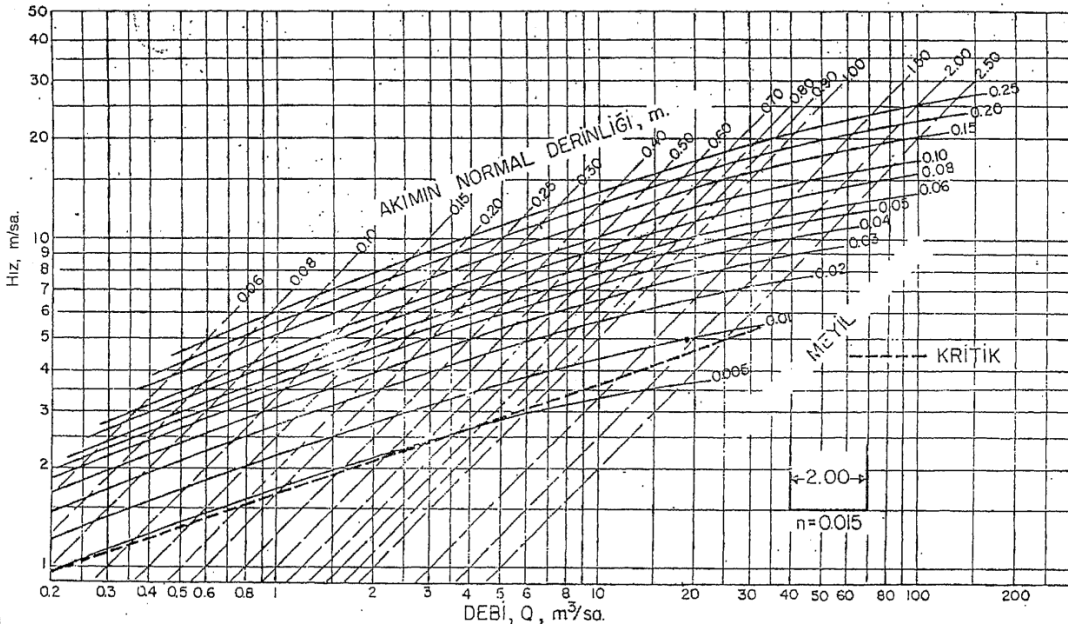
Bu aşamada akının normal derinliğinin (D_n) bulunması için çeşitli kutu menfez boyutları için hazırlanmış abaklardan yararlanılmaktadır (Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12).



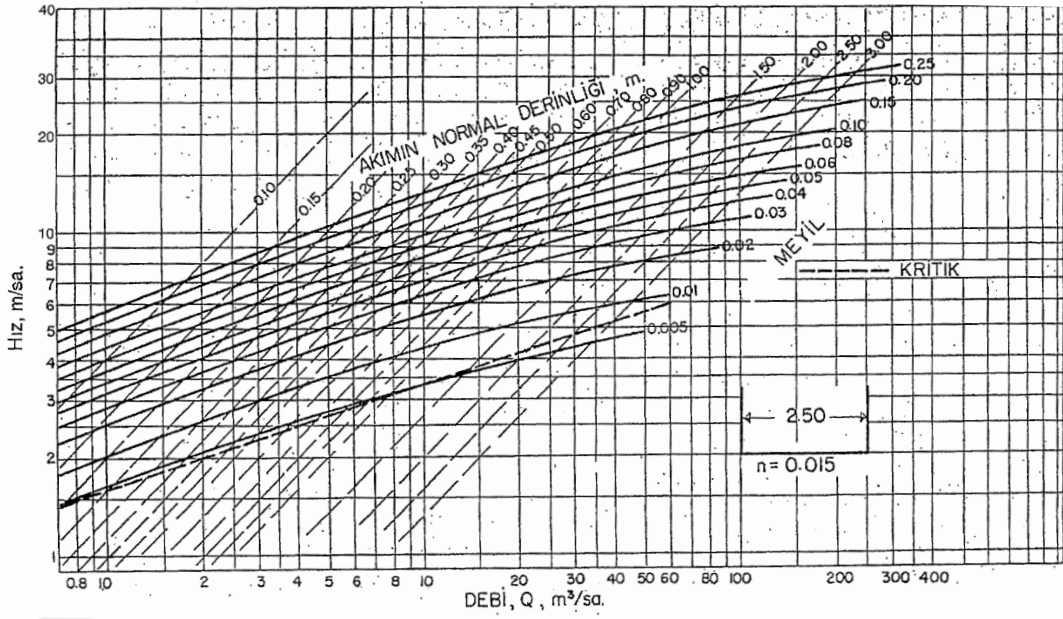
Şekil 3.9: Genişliği 1,0 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).



Şekil 3.10: Genişliği 1,5 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).



Şekil 3.11: Genişliği 2,0 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).



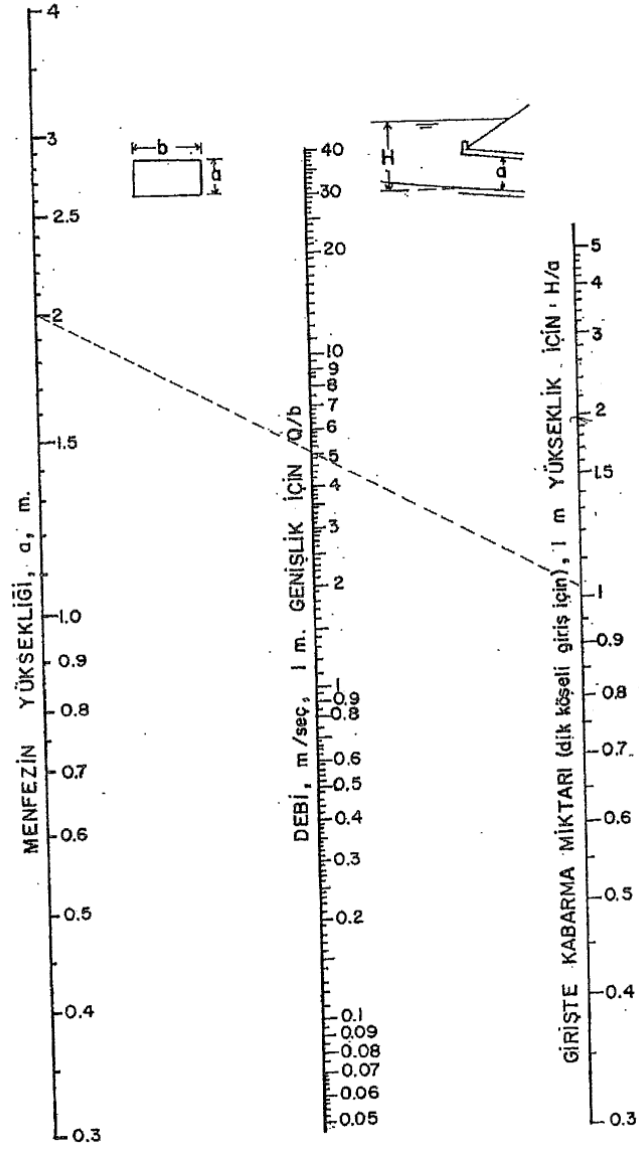
Şekil 3.12: Genişliği 2,5 metre olan menfezler için akım abağı (KGM, 2005).

Akımın normal derinliği kritik derinlikten küçükse ($D_n < D_k$) normal hız kritik hızdan büyük olmakta ve kabarma kontrolü memba tarafında yapılmaktadır. Akımın normal derinliği hidrolik yapının yüksekliğini aşıyorsa hidrolik sanat yapısı dolu akmaktadır. Bu durumda kabarma kontrolü mansapta yapılmaktadır (Öztürk ve Hasdemir 2021).

Hava payı (H_p), normal akım hızı ve normal su yüksekliğine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır (KGM, 2005).

$$H_p = 0,6 + 0,036 * V_n * D_n^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

Boyut analizi yapılan kontroller sonunda bütün hidrolik sanat yapılarında akımın normal derinliği kritik derinlikten küçük olduğundan ($D_n < D_k$) veya normal hız kritik hızdan büyük olduğundan kabarma kontrolleri memba tarafında yapılmıştır. Giriş kontrollü menfezlerde kabarma tayini menfez genişliği, yüksekliği ve beklenen maksimum debilerden yararlanılarak kutu menfezlerde kabarmayı veren monogram kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.13). Girişteki su yüksekliği (H) menfez yüksekliğini aşmıyorsa ve dolguyu tehdit etmiyorsa önerilen boyutlar yeterli kabul edilmiştir.

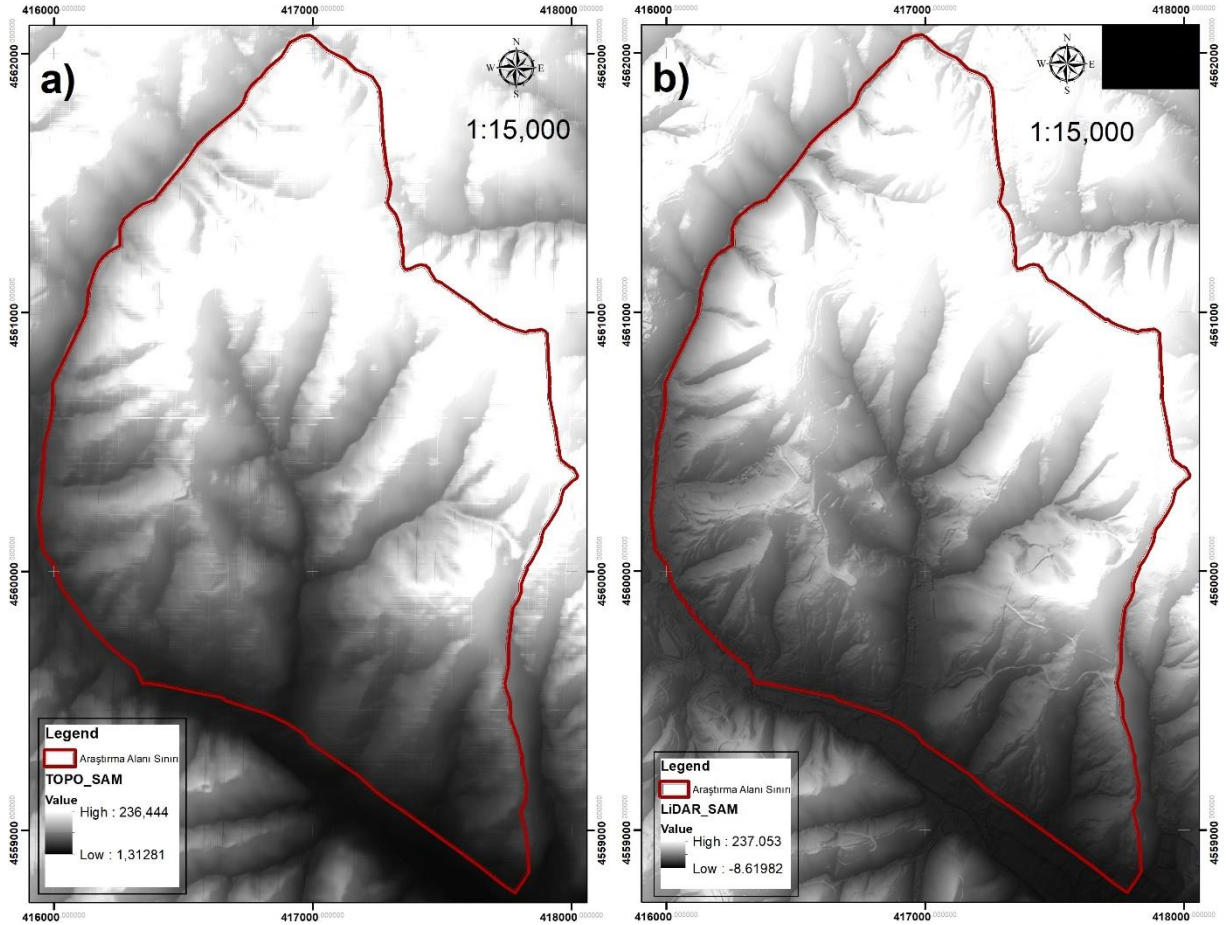


Şekil 3.13: Kutu menfezlerde kabarmayı veren monogram (KGM, 2005).

4. BULGULAR

4.1. FARKLI SAM VERİ SETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmada kullanılan hava LiDAR tabanlı 25 cm çözünürlüklü SAM ve 2,5 m çözünürlüklü 1/25.000 ölçekli topoğrafik harita tabanlı SAM verileri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Çalışma alanı olarak seçilen İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın kuzey parseli alanı 395,16 ha olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: a) Topoğrafik Harita kaynaklı SAM modeli, b) Hava LiDAR kaynaklı SAM modeli.

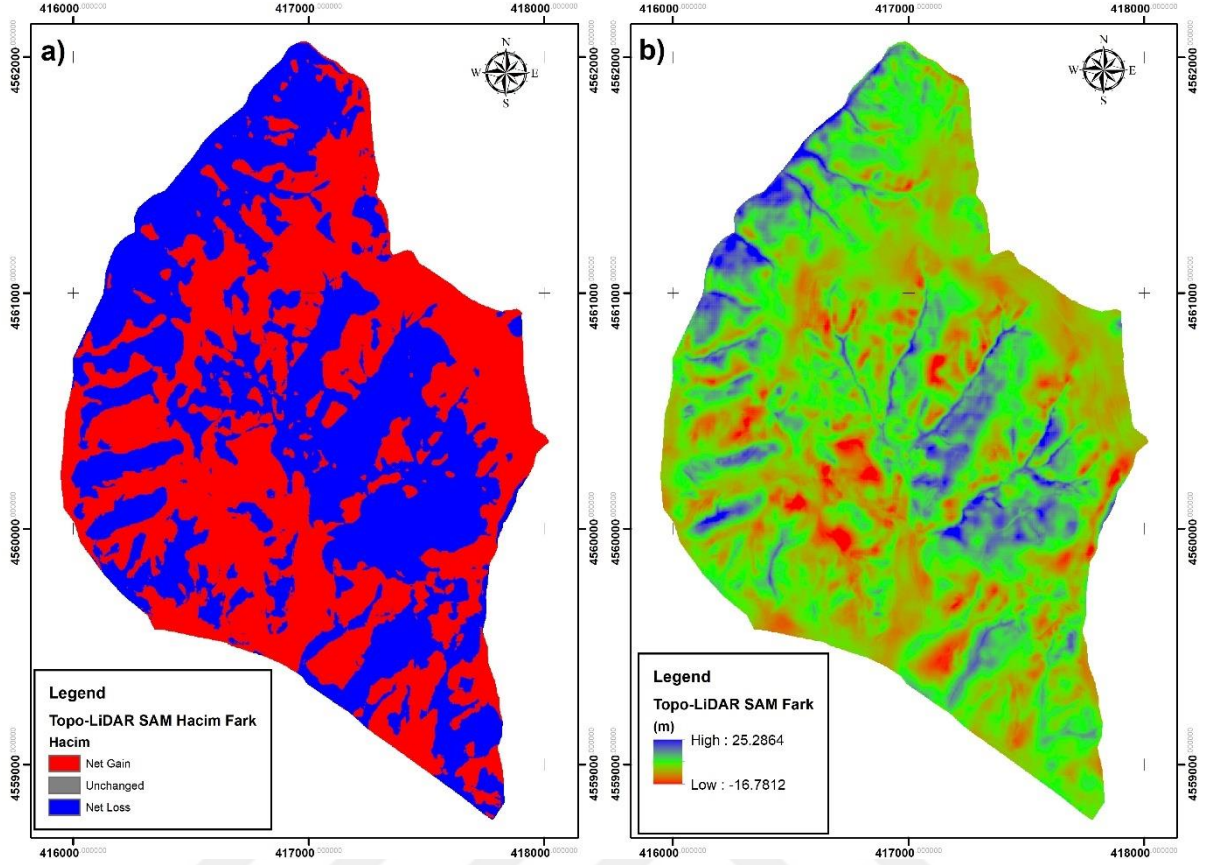
İki SAM veri seti arasındaki mekânsal farklılıkların ortaya konması amacıyla, ilk olarak Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden LiDAR tabanlı SAM verisi çıkartılarak fark verisi ($Fark_{(Z)}$), mutlak fark verisi ($Mutlak\ Fark_{(Z)}$), ortalama fark verisi ($Ort.Fark_{(Z)}$) ve

ortalama mutlak fark verileri (*Ort. Mutlak Fark*_(Z)) elde edilmiştir (Şekil 4.2.b, Şekil 4.3, Tablo 4.1).

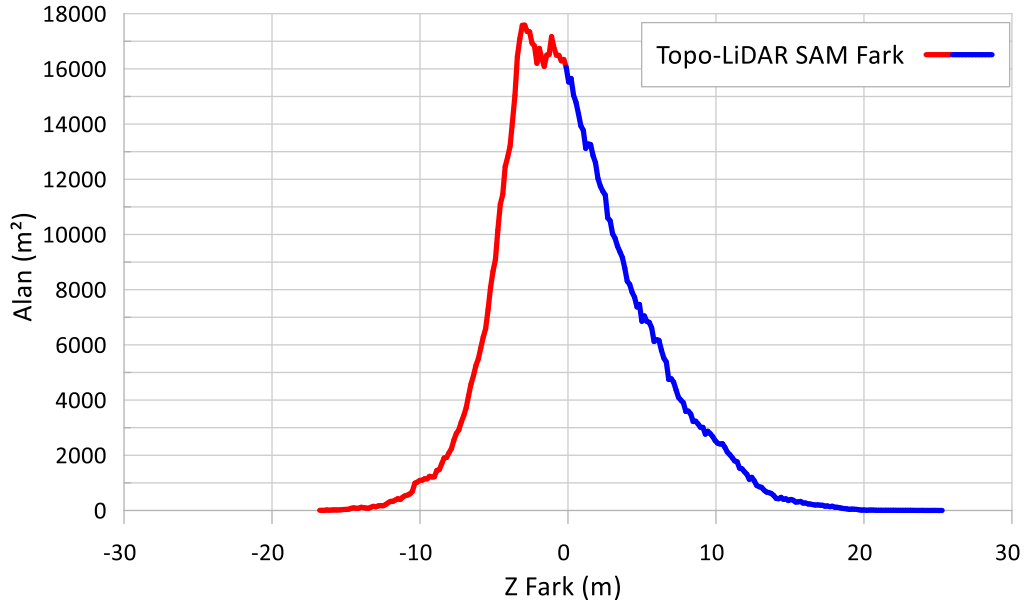
Tablo 4.1: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin Fark ve Mutlak Fark istatistikleri

	Topo-LiDAR Fark (m)	Topo-LiDAR Mutlak Fark (m)
Min	-16,78	0,00
Max	25,29	25,29
Ortalama	0,37	3,74
Min-Max Fark	42,07	25,29
Std. Sap.	4,80	3,03

Elde edilen bulgular incelendiğinde özellikle LiDAR ve Topoğrafik harita tabanlı veriler arasındaki minimum ve maksimum fark değerleri arasındaki fark dikkat çekicidir (42,07 m). Veriler arasındaki maksimum fark ise 25,29 m olarak tespit edilmiştir. Önemli değişkenlerden biri olan Ortalama Mutlak Fark değeri ise 3,74 m olarak bulunurken veriler arasındaki fark ise sıfıra oldukça yakın bir değer olarak pozitif bir değer olmuştur. Farkların dağılımı, hacimsel ve alansal dağılımlar yine incelendiğinde ise negatif ve pozitif değerlerin birbirlerine yakın değerler olduğu görülmektedir (Şekil 4.2.a, Şekil 4.3). Kazı-dolgu yani negatif ve pozitif değerler açısından bakıldığında negatif değere sahip alanların büyüklüğü 203,38 ha, hacimsel olarak ise 6.373.001,85 m³ olduğu tespit edilmiştir. Pozitif değere sahip alanların büyüklüğü 191,78 ha, hacimsel olarak ise 7.823.634,87 m³ olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak bu değerler üzerinden sayısal arazi modellerini değerlendirecek olursak farklılıkların oldukça fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 4.2:a) Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin hacimsel farkı, b) Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin matematiksel farkı



Şekil 4.3: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinin fark dağılımı

İki veri setinden elde edilen eğim ve bakı verileri arasındaki farklılıkların da mekânsal olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Doğal olarak türetilen veri setlerinin mekânsal çözünürlükleri kaynak veri setleri ile aynı olmaktadır.

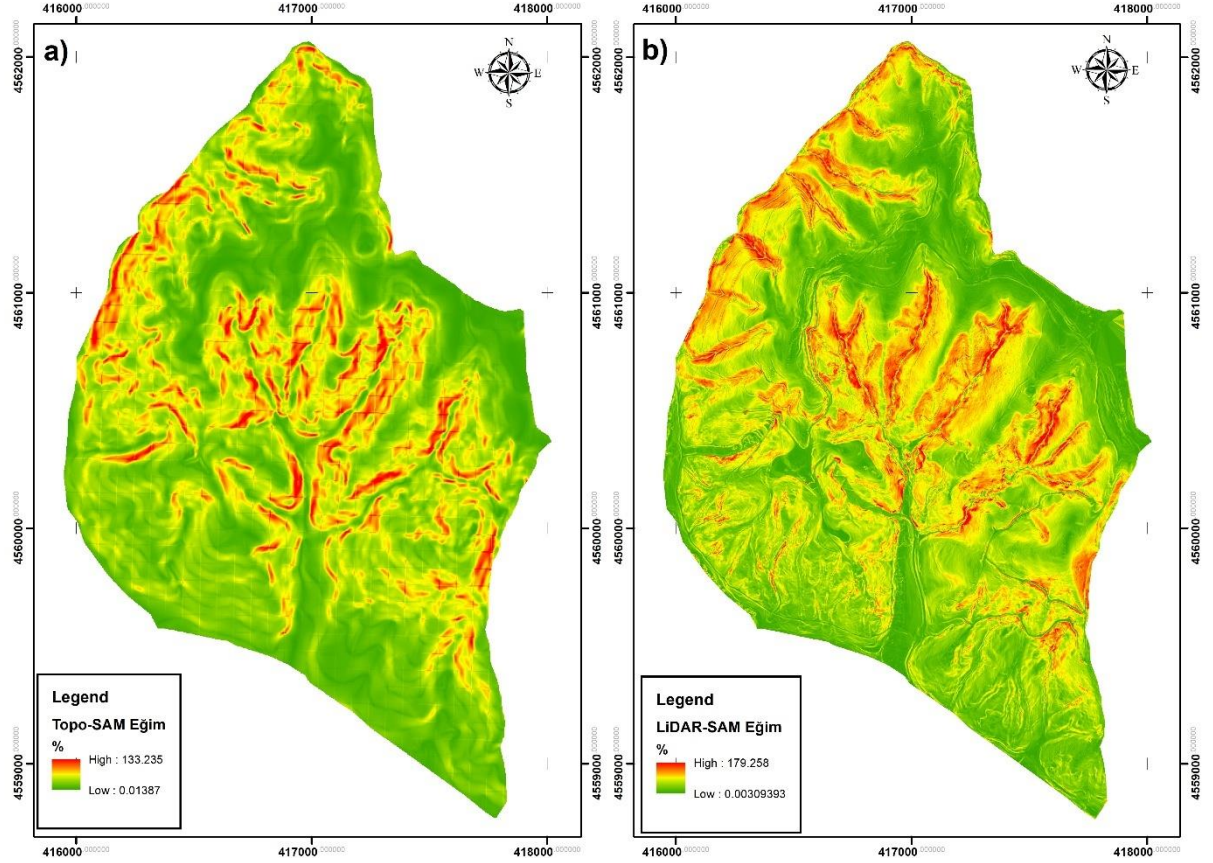
Eğim verilerinin karşılaştırılması sonucunda, hem topoğrafik harita tabanlı sayısal arazi modeli hem de LiDAR tabanlı SAM için elde edilen ortalama eğim değerlerinin birbirine kabul edilebilir düzeyde yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki verinin genel eğim karakteristiğini benzer şekilde yansıttığını ortaya koymakla birlikte, çözünürlük farkından kaynaklanan detay seviyeleri açısından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. LiDAR tabanlı model, daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle mikrotopoğrafik farklılıkları da algılayabilmekte ve bu da özellikle maksimum eğim ve standart sapma gibi istatistiksel değerlerde artışa neden olmaktadır. Özellikle LiDAR tabanlı SAM verisinden türetilen eğim veri setindeki maksimum eğim değerinin topoğrafik harita tabanlı eğim verisine kıyasla yaklaşık %46 daha yüksek olması, bu farkın veri kaynağına özgü ölçüm duyarlılığına bağlı olduğunu göstermektedir (Tablo 4.2). Benzer şekilde, standart sapma değerinin daha yüksek olması da eğim verilerindeki çeşitliliğin ve ayrıntı seviyesinin arttığını işaret etmektedir. Bu durum, topoğrafik karmaşıklığın daha iyi temsil edilebilmesi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Minimum eğim değerlerindeki küçük fark ise, her iki verinin de düz alanları başarıyla temsil edebildiğini göstermektedir. Ancak LiDAR verisinin 0,003 gibi çok düşük eğim değerlerini dahi algılayabilmesi, bu yöntemin özellikle küçük ölçekli yüzey değişimlerinin incelenmesinde daha güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

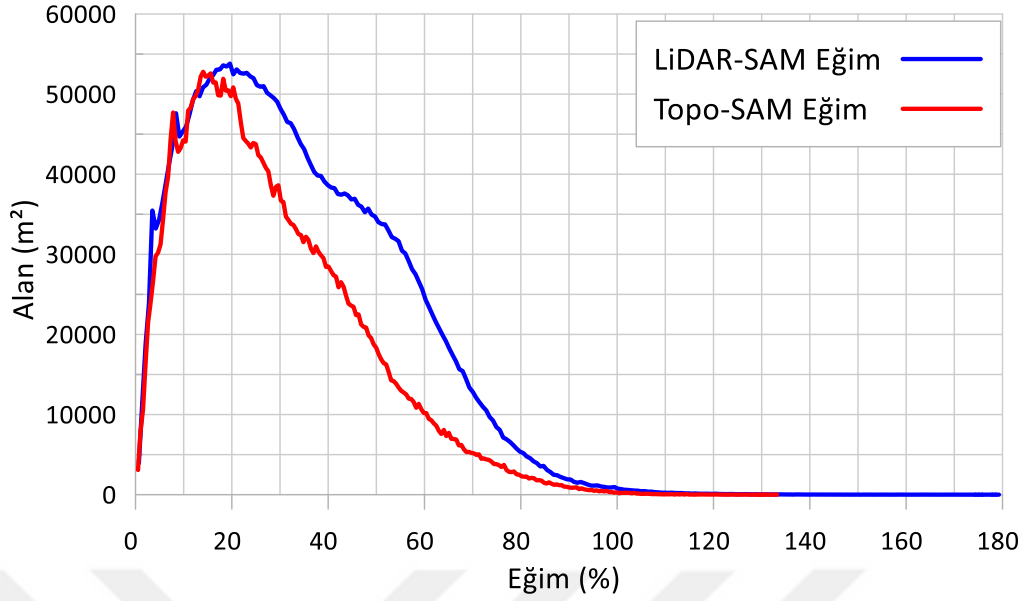
Sonuç olarak, eğim analizlerinde kullanılacak verinin amaca uygun olarak seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Eğer hedef, genel arazi eğimi hakkında fikir edinmekse her iki yöntem de yeterli düzeyde bilgi sunabilirken, gerçekleştirilen bu çalışmada olduğu gibi detaylı mikrotopoğrafik analizler, heyelan riski, yüzey akışı ya da arazi şekillenme süreçlerinin değerlendirilmesi gibi daha hassas uygulamalarda LiDAR tabanlı SAM verisinin tercih edilmesi daha uygun olacaktır (Tablo 4.2, Şekil 4.4, Şekil 4.5).

Tablo 4.2: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim veri istatistikleri ve farkları

	Topo-SAM Eğim	LiDAR-SAM Eğim	Mutlak Fark
Ortalama % Eğim	28,478	33,706	5,228
Min % Eğim	0,013	0,003	0,010
Max % Eğim	133,235	179,258	46,022
Std. Sap. % Eğim	18,320	20,474	2,153

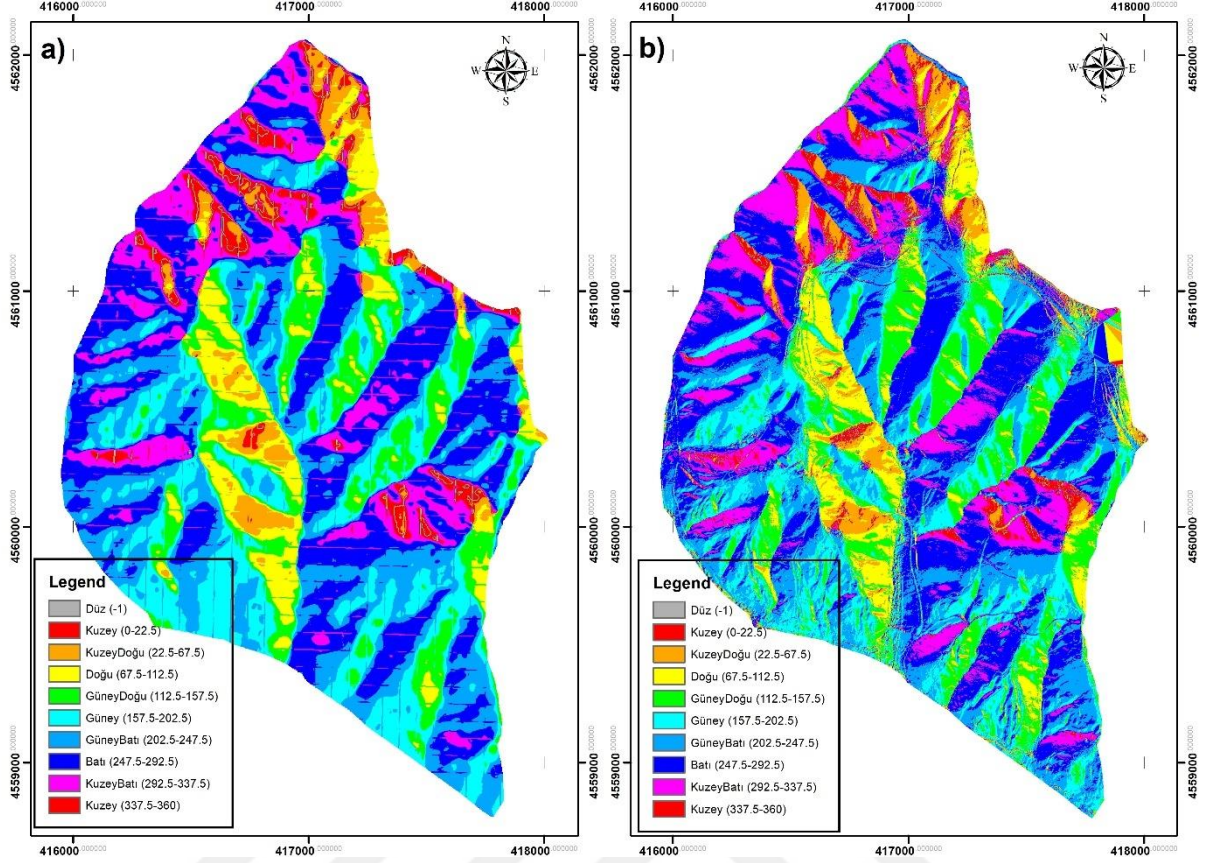


Şekil 4.4: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim veri setleri



Şekil 4.5: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Eğim verilerinin dağılımı

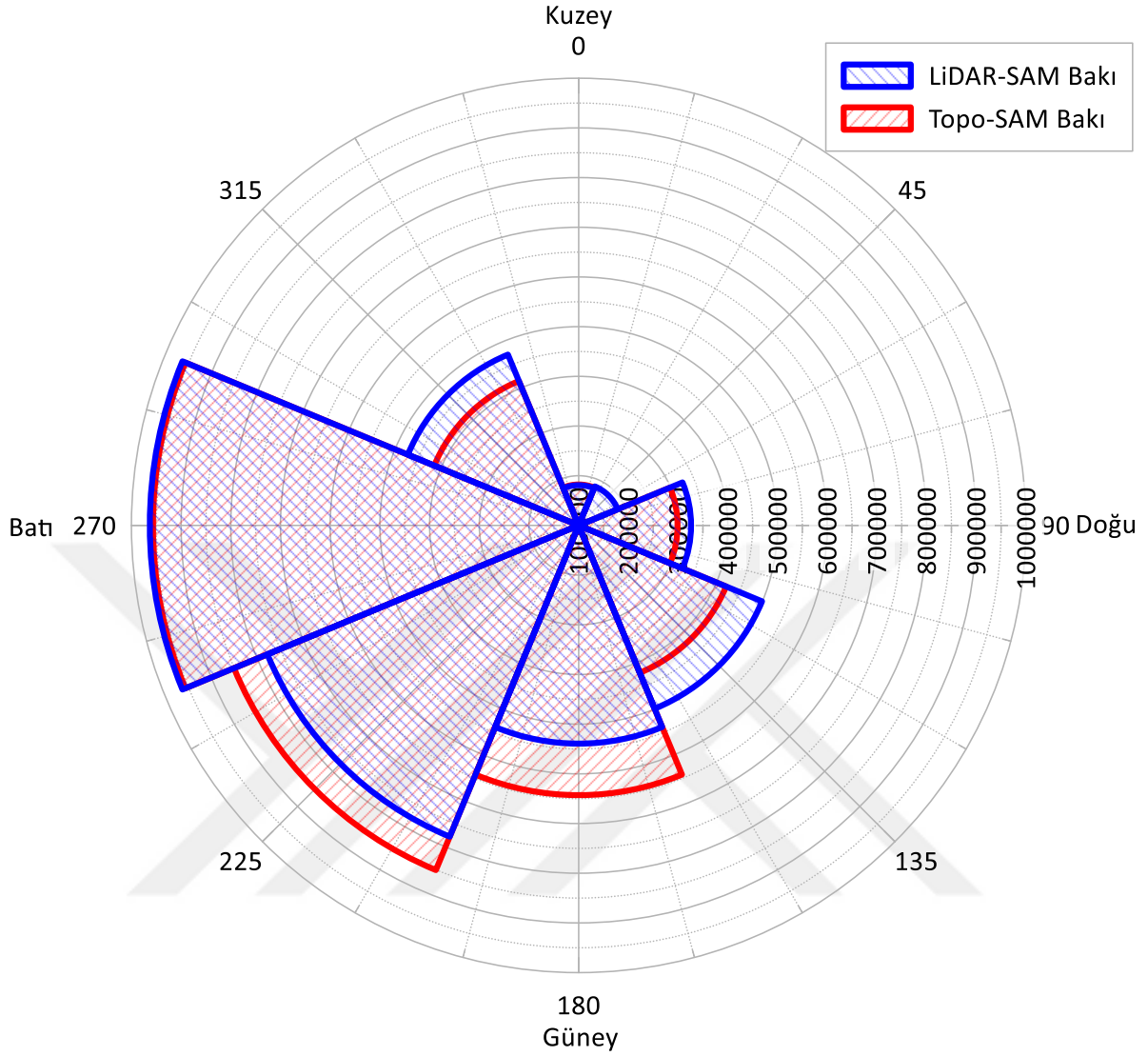
Bakı verilerinin karşılaştırmalı incelenmesi sonucunda, Topoğrafik harita tabanlı ve LiDAR tabanlı sayısal arazi modellerinden türetilen veriler arasında genel olarak yüksek düzeyde benzerlik olduğu görülmüştür. Özellikle alan dağılımları incelendiğinde, her iki veri setinin yaklaşık %91 oranında örtüştüğü hesaplanmıştır. Bu yüksek benzerlik oranı, bakı sınıflandırmasının her iki modelde de büyük ölçüde tutarlı şekilde üretilebildiğini ortaya koymaktadır. Ancak çözünürlük farkı nedeniyle bazı yönlerde belirgin sapmalar da dikkat çekmektedir. Detaylı analizler, çalışma alanında baskın bakı yönlerinin Batı ve Güneybatı olduğunu göstermektedir. Bu yönlerde her iki veride de yüksek alan değerleri elde edilmiştir. Ancak özellikle Kuzeybatı ve Güneydoğu yönlerinde LiDAR tabanlı veriler, topoğrafik harita tabanlı verilere kıyasla daha yüksek alan değerleri üretmiştir. Bu farkların temel nedeni, LiDAR verisinin daha yüksek çözünürlükte olması nedeniyle özellikle ara geçiş alanlarını daha duyarlı biçimde sınıflandırabilmesi olarak yorumlanabilir. Benzer şekilde, Kuzeydoğu ve Doğu yönlerinde de dikkat çeken farklılıklar, küçük eğim kırıklıklarının yön tayininde önemli rol oynadığını göstermektedir (Tablo 4.3, Şekil 4.6, Şekil 4.7).



Şekil 4.6: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı veri setleri

Tablo 4.3: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı verilerinin alansal dağılımı

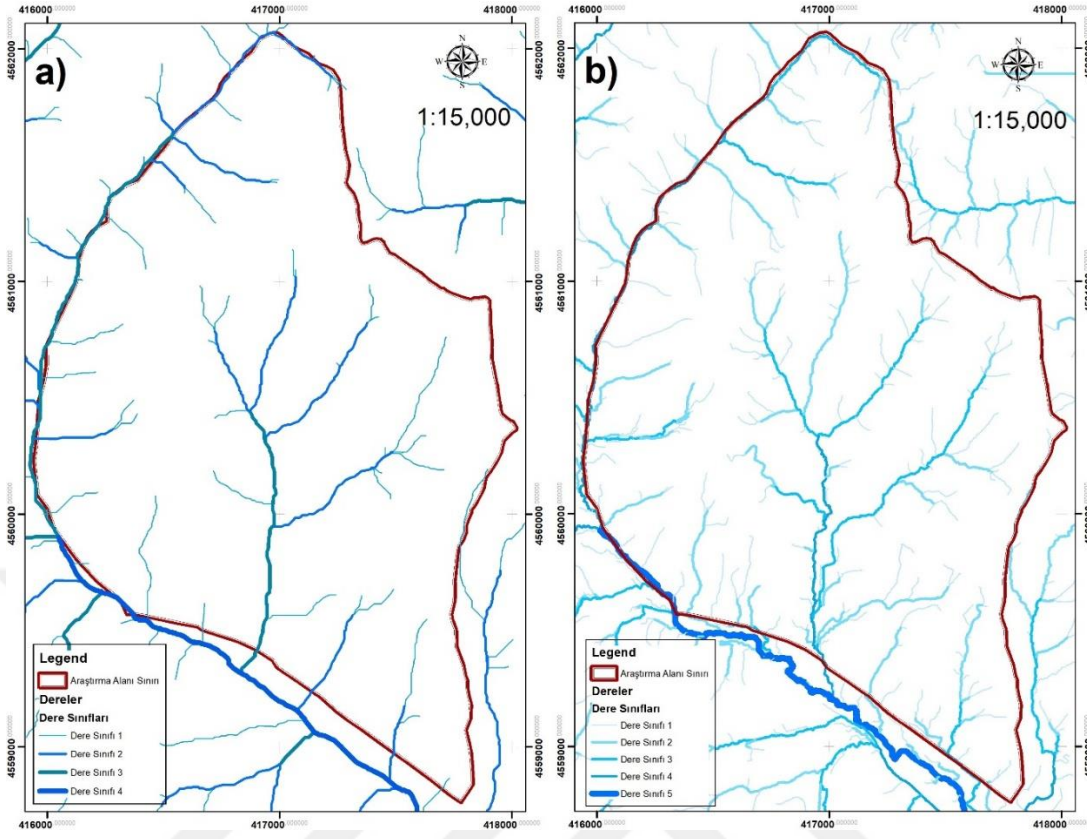
	Topo-SAM Bakı Alan (m ²)	LiDAR-SAM Bakı Alan (m ²)	Mutlak Fark (m ²)
Kuzey	182325	180922	1403,0
Kuzey Doğu	164612,5	184961	20348,5
Doğu	298975	326068	27093,0
Güney Doğu	421093,75	499287	78193,3
Güney	642862,5	539157	103705,5
Güney Batı	850781,3	778033	72748,3
Batı	956675	962996	6321,0
Kuzey Batı	414562,5	472082	57519,5



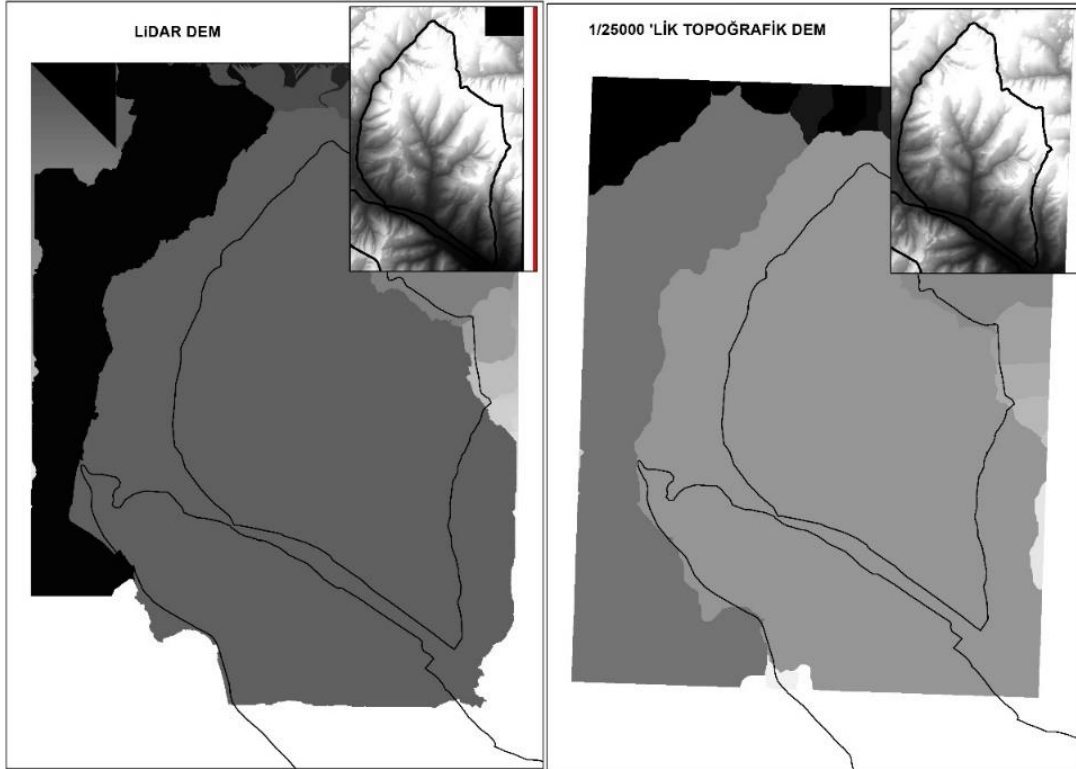
Şekil 4.7: Topoğrafik Harita ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden türetilen Bakı verilerinin alansal dağılımı

4.2. FARKLI SAM KAYNAKLARINDAN ELDE EDİLEN DERE KOLLARI VE HAVZA SINIRLARI

Çalışmada belirlenen İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanına ait 1/25.000 ölçekli memleket haritası ve hava LiDAR tabanlı sayısal arazi modellerinin Şekil 3.6'teki iş akış şeması takip edilerek işlenmesiyle iki farklı kaynak için dere kolları ve havza sınırları elde edilmiştir (Şekil 4.8 ve 4.9).



Şekil 4.8: a) Topoğrafik harita ve b) Hava LiDAR kaynaklı dere kolları.



Şekil 4.9: Hava LiDAR ve 1/25.000 ölçekli harita kaynaklı SAM havza sınırları.

4.3. FARKLI SAM KAYNAKLARINDAN ELDE EDİLEN HAVZALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

İki farklı kaynaktan oluşturulan dere kolları 2021 tarihli yol ağı planındaki yollarla karşılaştırılarak ihtiyaç duyulabilecek hidrolik sanat yapılarının yerleri tespit edilmiştir. Ardından her bir deşarj noktasının havza sınırları yine ArcGIS yazılımının *Hydrology* aracı ile Şekil 3.6'daki iş akış şeması takip edilerek belirlenmiştir. Buna göre, 1/25.000 tabanlı harita kaynaklı alanda 19 adet (Şekil 4.10), LiDAR tabanlı olanda ise 71 adet (Şekil 4.11), sanat yapısı ve bunların havzaları oluşmuştur.

4.3.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM ile Elde Edilen Havzalara Ait Bulgular

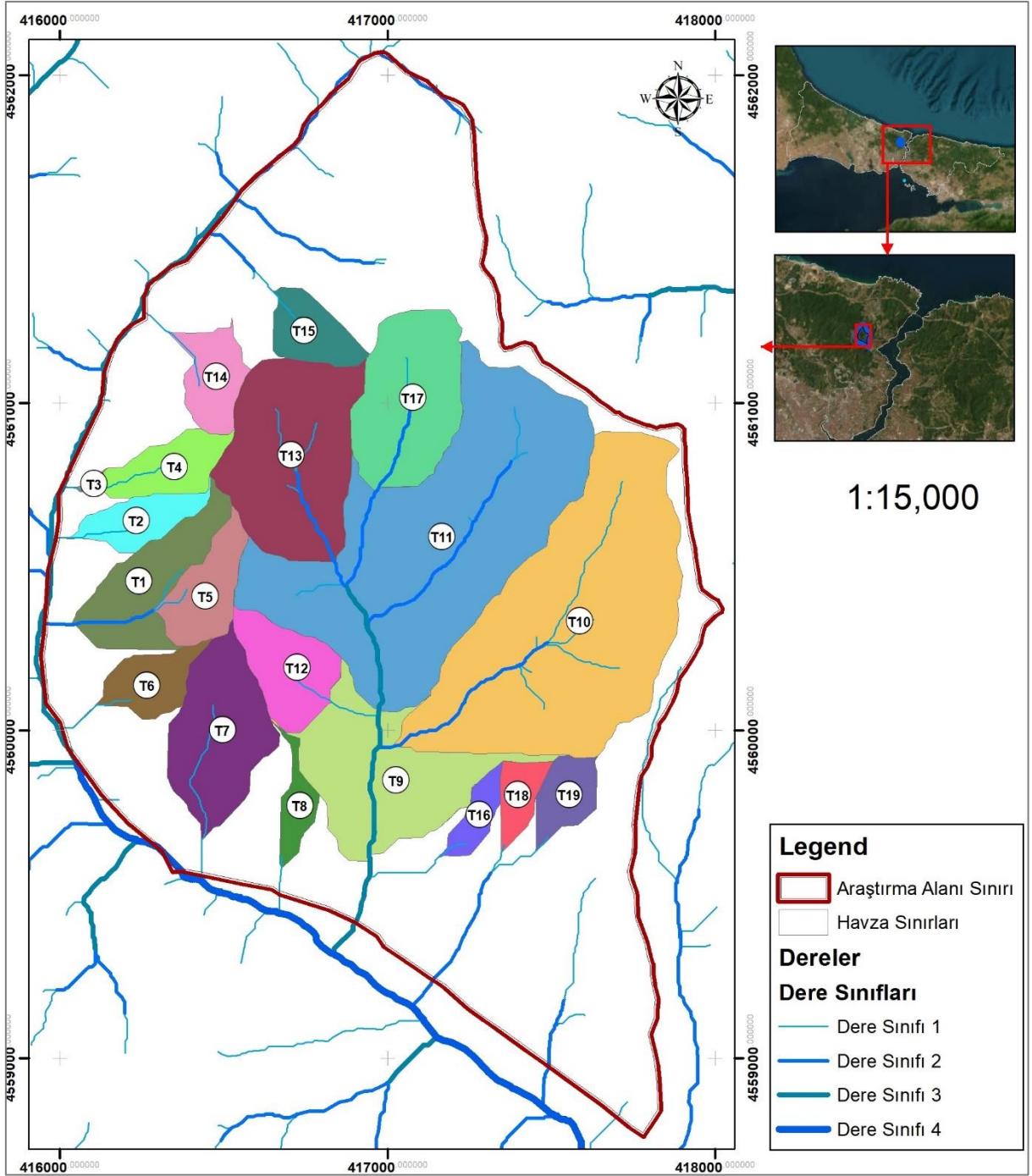
1/25.000 ölçekli topoğrafik harita tabanlı SAM kullanılarak elde edilen havzalara (Şekil 4.11) ait temel özellikler Tablo 4.4'te belirtilmiştir. Her bir havza için alan (ha), ana akarsu uzunluğu L(m), en yüksek kot (H_{maks}), en düşük kot (H_{min}) ve eğim (S) değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde, çeşitli havza özellikleri arasında dikkate değer ilişkiler tespit edilmiştir. Havza alanlarının 0,20 ha ile 53,22 ha arasında değiştiği görülmektedir. Alan büyüklüğü arttıkça, eğim oranı genellikle azalma eğilimindedir. Örneğin, T11 ve T10 havzalarının büyük alanlarına (sırasıyla 53,22 ha ve 49,23 ha) karşılık, eğim oranları sırasıyla %11,8 ve %14,9 olarak düşük seviyelerdedir. Diğer taraftan, küçük alanlara sahip havzalar, örneğin T3 (0,20 ha) ve T8 (2,54 ha), daha yüksek eğim oranlarına sahiptir; T3 için bu oran %42,8, T8 için ise %16,9'dur.

Havzaların en yüksek kotları 236,39 m ile T11'de, en düşük kotları ise 172,11 m ile T15'te gözlemlenmiştir. Yüksek kot farklarının, havzaların yüzeysel akış ve toplanma süresi üzerine belirgin bir etkisi olabilir.

Eğim oranları (S) dikkate alındığında ise, küçük alanlı havzalarda daha yüksek eğim oranlarının bulunduğunu ve bu durumun potansiyel olarak erozyon, su akış hızı ve toprak kaymaları gibi hidrolojik ve çevresel faktörleri etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, havzaların topoğrafik özellikleri arasında belirgin farklılıklar olduğu ve bu farklılıkların hidrolojik analizlerde göz önünde bulundurulması gerektiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.4: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden elde edilen havzaların parametreleri.

Havzaya ait parametreler					
Havza No	Alan (ha)	L (m)	H_{maks} (m)	H_{min} (m)	S (m/m)
T1	9,63	626,31	202,95	54,54	0,237
T2	4,36	479,81	203,10	59,02	0,300
T3	0,20	138,82	127,07	67,71	0,427
T4	5,26	465,34	207,22	95,75	0,239
T5	6,00	402,73	198,34	75,06	0,306
T6	4,45	501,01	130,94	44,61	0,172
T7	13,22	712,79	139,10	32,22	0,149
T8	2,54	446,29	111,67	36,47	0,168
T9	18,45	657,59	180,02	25,63	0,234
T10	49,23	1264,23	231,24	42,89	0,149
T11	53,22	1611,04	236,39	46,63	0,117
T12	7,29	418,98	143,96	62,47	0,194
T13	21,21	662,39	220,90	85,54	0,204
T14	4,95	359,74	207,97	126,94	0,225
T15	4,54	359,10	220,97	172,11	0,136
T16	2,34	356,57	143,43	52,44	0,255
T17	14,84	602,79	236,44	128,85	0,178
T18	2,64	281,40	168,23	65,18	0,366
T19	3,70	352,17	194,63	79,46	0,327



Şekil 4.10: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisine göre elde edilen havzalar.

4.3.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM ile Elde Edilen Havzalara Ait Bulgular

Hava LiDAR tabanlı SAM dikkate alınarak elde edilen 71 adet havzaya ait (Şekil 4.11) parametreler Tablo 4.5'te belirtilmiştir. Tablo incelendiğinde, farklı havzaların alan, uzunluk, en yüksek ve en düşük kot değerleri ile eğim oranları arasında belirgin farklılıklar olduğu

gözlemlenmiştir. Havzaların alanları 0,08 ha ile 48,74 ha arasında değişmektedir ve bu alan farkları, eğim oranları üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Havzaların uzunlukları ise 12,80 m ile 1312,23 m arasında değişmekte olup, bu uzunluk farkı da eğim oranları ve havza şekil katsayısı üzerinde etkili olmuştur.

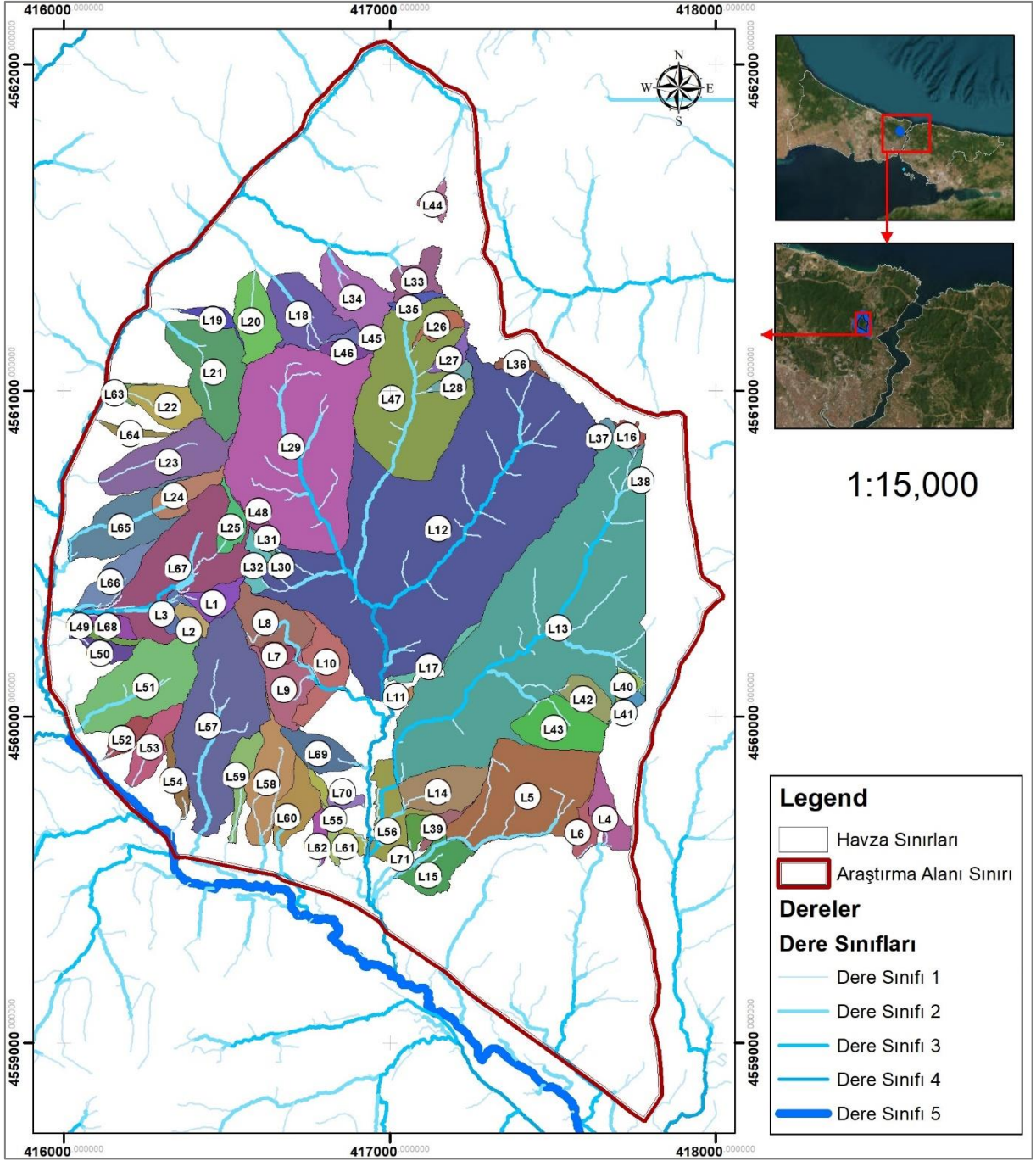
Büyük alanlara sahip havzalar genellikle daha düşük eğim oranlarına sahipken, küçük alanlı havzalar daha yüksek eğim oranlarına sahiptir. Örneğin, L12 havzası 48,74 ha ile en büyük alana sahipken, eğim oranı %13,8 gibi düşük bir değere sahiptir. Aynı şekilde, L13 havzası da 37,90 ha büyüklüğünde olup, eğim oranı %14,1'dir. Diğer taraftan, küçük alanlı havzalar, örneğin L36 (0.52 ha) ve L30 (0.08 ha), daha yüksek eğim oranlarına sahip olup, sırasıyla %1,9 ve %43,5 gibi düşük ve yüksek eğim oranlarına sahip olduğu görülmektedir.

Eğim oranları genel olarak %5 ile %54,1 arasında değişmektedir. L36 havzası, %01,9 gibi çok düşük bir eğim oranına sahipken, L63 havzası %54,1 gibi dikkat çekici yüksek bir eğim oranına sahiptir. Ortalama eğim oranı ise %24,3 olarak hesaplanmıştır. Bu tür yüksek eğim oranları, özellikle erozyon ve toprak kaymaları gibi hidrolojik olaylar üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Ayrıca, kot farkları da önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır; örneğin L16 havzasında en yüksek kot değeri 230,43 m, en düşük kot değeri ise 226,11 m olarak kaydedilmiştir. Buna karşın L51 havzasında en düşük kot değeri 44,45 m olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.5'te en büyük alanlı havza olan L12 (48,74 ha) ile en küçük alanlı havza olan L30 (0,08 ha) arasındaki farklar, havzaların eğim oranları ve kot değerlerine yansımaktadır. Büyük alanlara sahip havzalar genellikle daha düz eğimlere sahipken, küçük alanlı havzalarda eğim oranları daha yüksek ve kot farkları daha belirgindir. Ortalama eğim oranı ise %24,3 olarak belirlenmiştir, bu da çoğu havzada eğim oranlarının ortalama bir düzeyde olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.5: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen havzalara parametreleri.

Havzaya ait parametreler											
Havza No	Alan (ha)	L (m)	H _{maks} (m)	H _{min} (m)	S (m/m)	Havza No	Alan (ha)	L (m)	H _{maks} (m)	H _{min} (m)	S (m/m)
L1	1,30	212,87	146,87	87,99	0,277	L37	0,48	150,45	230,43	225,98	0,03
L2	0,66	141,48	130,61	89,03	0,294	L38	0,00	12,80	224,90	223,63	0,099
L3	0,72	134,44	123,05	75,91	0,351	L39	0,67	232,31	98,65	44,49	0,233
L4	1,67	271,15	194,03	94,48	0,367	L40	0,57	124,63	188,89	156,07	0,263
L5	9,96	545,83	195,21	55,48	0,256	L41	0,50	154,5	193,78	169,98	0,154
L6	0,91	220,09	162,53	90,47	0,327	L42	1,39	199,76	193,85	127,60	0,332
L7	0,64	114,23	129,78	86,48	0,379	L43	3,47	254,23	195,31	126,30	0,271
L8	3,06	308,2	145,35	84,17	0,199	L44	0,60	138,17	231,25	219,98	0,082
L9	2,41	245,74	132,51	73,02	0,242	L45	0,48	163,50	224,74	211,98	0,078
L10	2,81	287,29	124,32	61,63	0,218	L46	0,66	183,10	224,76	210,94	0,075
L11	0,31	94,85	83,54	52,88	0,323	L47	12,65	565,28	237,10	126,34	0,196
L12	48,74	1312,23	234,49	53,13	0,138	L48	0,47	214,71	198,06	157,80	0,188
L13	37,90	1286,86	227,59	45,86	0,141	L49	0,48	232,58	106,35	57,49	0,21
L14	3,01	305,07	120,19	43,84	0,25	L50	0,95	209,45	101,52	55,22	0,221
L15	2,35	264,32	64,17	33,52	0,116	L51	6,8	466,27	129,83	44,45	0,183
L16	0,50	111,93	230,43	226,11	0,039	L52	0,94	207,89	89,41	39,98	0,238
L17	0,55	337,66	153,82	55,01	0,293	L53	1,94	301,53	105,55	42,51	0,209
L18	3,9	312,23	220,86	162,72	0,186	L54	0,83	284,07	87,11	39,09	0,169
L19	0,71	258,73	208,22	129,23	0,305	L55	0,84	348,27	100,38	31,62	0,197
L20	2,69	294,38	212,78	152,68	0,204	L56	2,76	308,62	67,60	31,89	0,116
L21	5,51	405,29	214,00	107,53	0,263	L57	11,79	700,23	135,92	37,17	0,141
L22	2,17	255,09	198,23	102,59	0,375	L58	3,71	477,30	120,95	37,13	0,176
L23	5,03	450,01	209,78	85,55	0,276	L59	1,51	354,80	110,56	39,65	0,200
L24	1,61	263,88	204,72	126,95	0,295	L60	2,17	306,15	104,93	36,90	0,222
L25	1,07	234,89	203,45	135,08	0,291	L61	0,51	213,64	82,14	39,05	0,202
L26	0,81	180,69	237,17	208,29	0,16	L62	0,57	199,03	81,23	40,24	0,206
L27	0,75	201,72	237,15	202,17	0,173	L63	0,25	151,10	162,71	80,90	0,541
L28	0,60	162,87	230,33	188,69	0,256	L64	0,48	254,23	189,43	77,88	0,439
L29	20,61	656,51	224,40	80,13	0,22	L65	4,16	300,89	191,84	57,18	0,448
L30	0,08	76,25	158,40	125,20	0,435	L66	1,93	346,03	139,28	56,74	0,239
L31	0,57	178,05	182,96	119,45	0,357	L67	9,03	598,58	202,99	56,62	0,245
L32	0,93	201,08	183,99	124,67	0,295	L68	0,80	213,64	102,84	56,54	0,217
L33	1,59	157,95	232,28	206,29	0,165	L69	1,84	279,67	120,70	44,54	0,272
L34	3,31	316,94	224,72	169,53	0,174	L70	0,48	133,90	84,54	39,74	0,335
L35	0,52	148,08	233,18	220,78	0,084	L71	0,56	119,22	67,11	39,97	0,228
L36	0,52	123,34	225,79	223,39	0,019						



Şekil 4.11: Hava LiDAR tabanlı SAM verisine göre elde edilen havzalar.

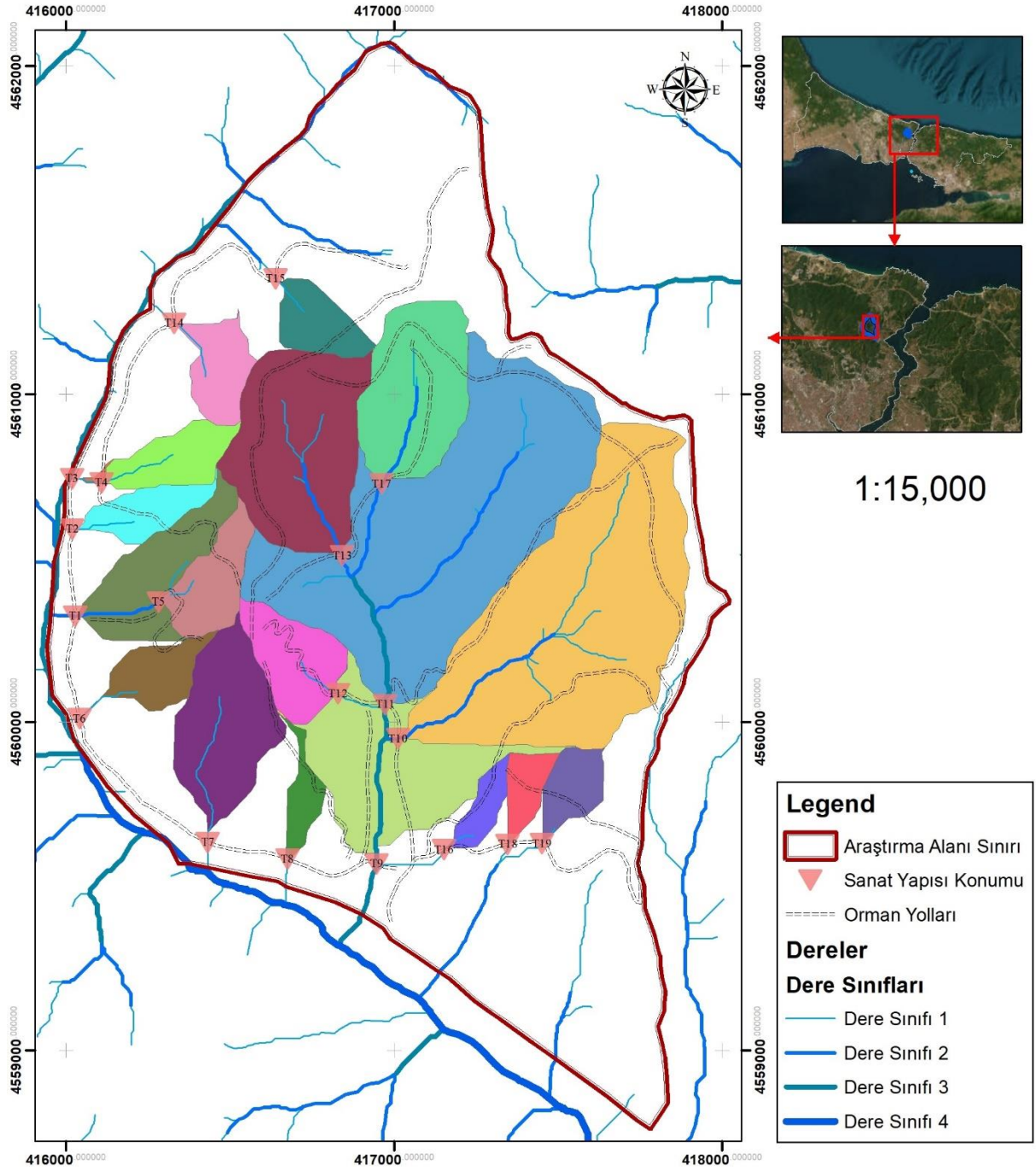
4.4. HİDROLİK SANAT YAPILARIN KONUMLANDIRILMASI

Çalışma alanı içerisinde farklı Sayısal Arazi Modeli (SAM) kaynaklarına göre yapılan hidrolojik analizler sonucunda belirlenen hidrolik sanat yapısı gereksinimleri, model kaynaklarının çözünürlük ve detay seviyesiyle doğrudan ilişkili olarak önemli farklılıklar göstermiştir. Topoğrafik harita tabanlı SAM kullanılarak yapılan analizlerde toplam 19 adet

hidrolik sanat yapısı ihtiyacı belirlenmiş olup, bunların konum bilgileri ITRF 96 koordinat sisteminde (X, Y, Z) Tablo 4.6'da sunulmuştur. Bu model, 1/25.000 ölçekli haritalardan türetilmiş olup sınırlı detay içerdiğinden, özellikle küçük akış yolları ve alt havzaları tanımlamada yetersiz kalabilmektedir (Şekil 4.12).

Tablo 4.6: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu.

Sanat Yapısı Numarası	Sanat Yapısının Konumu		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
T1	416028.614	4560323.190	54.449
T2	416019.115	4560588.237	59.017
T3	416018.578	4560742.444	67.607
T4	416108.016	4560730.343	95.521
T5	416282.001	4560365.575	75.081
T6	416041.588	4560010.303	44.570
T7	416431.857	4559632.567	32.174
T8	416675.333	4559581.962	36.421
T9	416946.834	4559567.819	25.635
T10	417012.111	4559949.371	42.886
T11	416972.948	4560053.253	46.700
T12	416828.612	4560086.015	62.161
T13	416842.000	4560506.667	85.258
T14	416329.400	4561216.112	126.830
T15	416638.236	4561351.391	171.649
T16	417152.090	4559610.581	52.029
T17	416962.009	4560726.260	129.010
T18	417346.515	4559626.599	65.564
T19	417450.482	4559629.307	79.208



Şekil 4.12: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisine göre elde belirlenen sanat yapısı konumları.

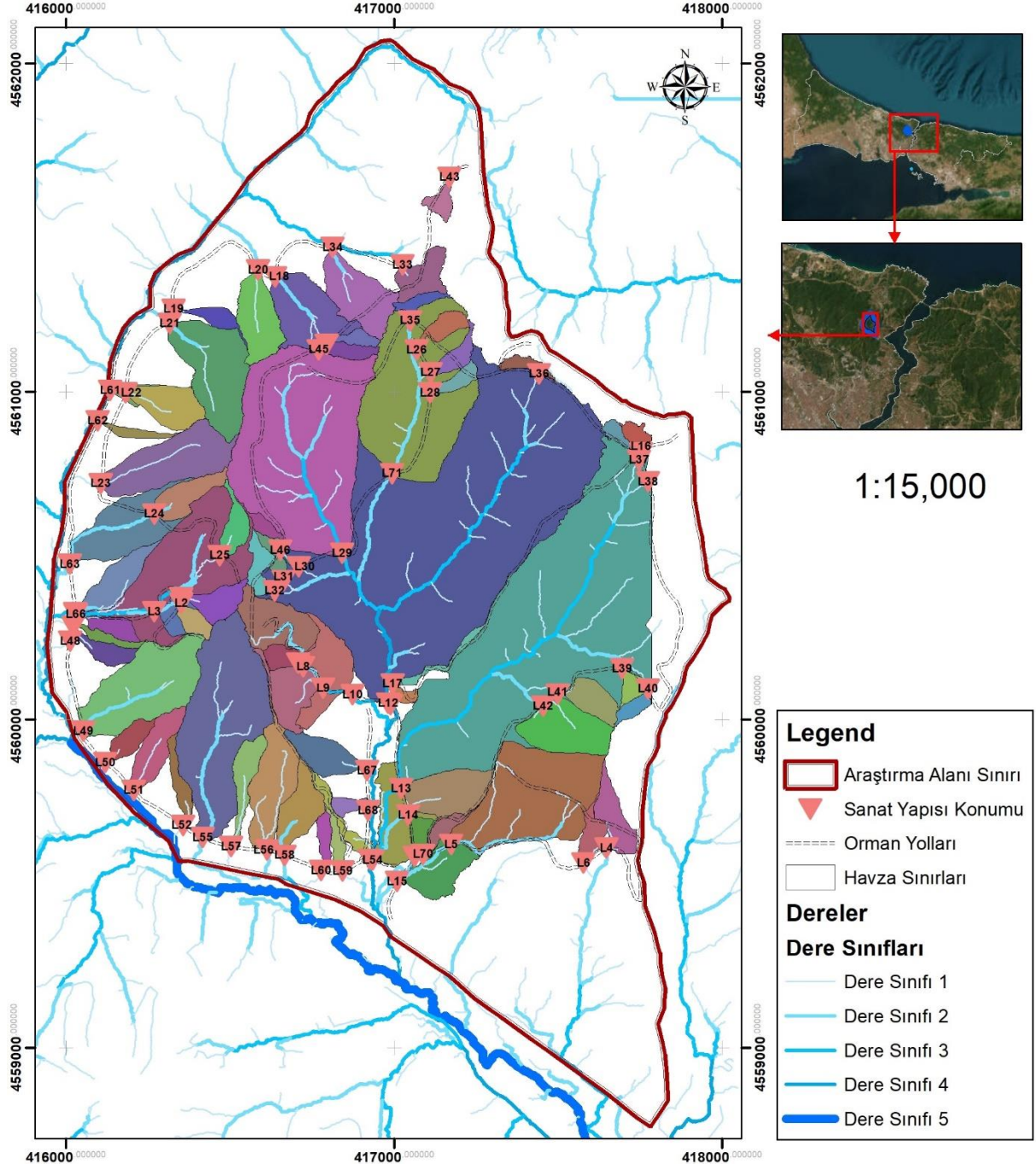
Buna karşın, hava LiDAR tabanlı SAM verileri ile yapılan detaylı hidrolojik analizlerde toplam 71 adet hidrolik sanat yapısı ihtiyacı tespit edilmiştir (Şekil 4.13) (Tablo 4.7). Yüksek çözünürlüklü LiDAR verisi (yaklaşık 25 cm grid aralığı), topoğrafyanın ince detaylarını daha hassas bir şekilde yansıttığından, küçük çaplı yüzey drenaj yolları ve alt havzalar daha net bir şekilde ayrıştırılabilmiş ve buna bağlı olarak daha fazla sayıda sanat yapısı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Her bir sanat yapısına ait konum bilgileri yine ITRF 96 koordinat sisteminde (X, Y,

Z) formatında tablo halinde verilmiş olup, bu veriler sonraki aşamalarda konumsal kayma analizleri ve boyutlandırma işlemlerine temel teşkil etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, SAM kaynağı seçiminde çözünürlüğün ve doğruluğun, hidrolik yapı planlamasında doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. LiDAR tabanlı modelin sunduğu detaylar sayesinde, orman yollarının su ile kesişim noktaları daha hassas biçimde belirlenmiş ve hidrolik sanat yapılarının yerlerinin daha güvenilir şekilde konumlandırılması mümkün olmuştur.

Tablo 4.7: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu.

Sanat Yapısı No	Sanat Yapısının Konumu			Sanat Yapısı No	Sanat Yapısının Konumu		
	X (m)	Y (m)	Z (m)		X (m)	Y (m)	Z (m)
L1	416350.515	4560371.515	88.004	L36	417442.466	4561053.870	224.144
L2	416350.293	4560354.697	89.099	L37	417747.295	4560790.870	226.035
L3	416267.906	4560328.367	75.798	L38	417774.178	4560724.747	223.633
L4	417647.730	4559607.760	94.471	L39	417087.971	4559588.571	44.489
L5	417173.870	4559618.179	55.472	L40	417694.120	4560155.128	156.034
L6	417577.516	4559562.140	90.476	L41	417774.524	4560093.041	170.005
L7	416706.990	4560171.373	86.441	L42	417497.896	4560076.932	127.587
L8	416722.662	4560160.953	84.108	L43	417453.647	4560040.978	127.177
L9	416784.161	4560095.370	73.055	L44	417168.392	4561653.316	219.984
L10	416872.935	4560075.805	61.632	L45	416793.575	4561144.381	211.938
L11	416989.370	4560045.356	53.030	L46	416770.114	4561127.468	210.936
L12	416981.754	4560049.736	53.220	L47	416994.539	4560749.584	126.337
L13	417021.189	4559789.543	45.852	L48	416652.501	4560515.811	157.785
L14	417041.939	4559708.620	43.840	L49	416021.525	4560285.370	57.490
L15	417009.006	4559506.009	33.525	L50	416012.893	4560238.656	55.229
L16	417752.870	4560813.424	226.124	L51	416052.910	4559964.570	44.494
L17	416995.889	4560108.389	55.110	L52	416118.625	4559868.561	39.976
L18	416636.794	4561350.007	162.708	L53	416206.352	4559783.602	42.690
L19	416327.614	4561250.870	128.167	L54	416356.620	4559677.226	39.136
L20	416586.239	4561370.336	152.711	L55	416926.177	4559573.785	32.296
L21	416316.123	4561207.414	107.534	L56	416934.779	4559571.529	32.270
L22	416181.629	4560996.219	102.447	L57	416415.895	4559640.145	37.773
L23	416105.365	4560719.365	85.521	L58	416612.870	4559601.901	37.515
L24	416268.266	4560626.513	126.903	L59	416503.254	4559612.381	39.495
L25	416468.682	4560500.073	135.083	L60	416666.066	4559585.877	37.112
L26	417068.906	4561127.154	208.297	L61	416842.870	4559537.686	39.084
L27	417111.033	4561057.620	202.146	L62	416778.139	4559539.523	40.167
L28	417109.255	4560996.085	188.577	L63	416134.784	4561003.370	80.713
L29	416841.053	4560506.937	80.573	L64	416096.771	4560910.620	77.829
L30	416709.549	4560465.870	125.145	L65	416011.181	4560473.120	56.782
L31	416663.778	4560422.661	119.399	L66	416028.395	4560326.145	57.099
L32	416635.980	4560392.940	124.688	L67	416028.768	4560323.370	57.014
L33	417026.620	4561385.975	206.266	L68	416029.101	4560320.889	57.032
L34	416812.370	4561438.899	169.527	L69	416917.711	4559843.750	44.538
L35	417048.190	4561215.981	221.128	L70	416920.906	4559722.120	39.661
				L71	417063.120	4559582.275	39.940



Şekil 4.13: Hava LiDAR tabanlı SAM verisine göre elde belirlenen sanat yapısı konumları.

Bu istatistiksel göstergeler, farklı veri kaynaklarının konumsal doğruluk düzeylerini değerlendirmek amacıyla kullanılmakta olup, SAM modelinin seçiminde hassas mühendislik uygulamaları açısından önemli farklar doğurabileceğini ortaya koymaktadır.

Topo ve LiDAR tabanlı SAM verilerinden elde edilen ve aynı kesişim noktalarına denk gelen hidrolik sanat yapılarının konum bilgileri kullanılarak yapılan karşılaştırma sonucunda (Şekil 4.14), her bir koordinat eksenini (X, Y ve Z) için hesaplanan ortalama fark, standart sapma ve kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri Tablo 4.9’da sunulmuştur. Bu istatistiksel göstergeler, farklı veri kaynaklarının konumsal doğruluk düzeylerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda;

- X ekseninde ortalama fark +1,64 m,
- Y ekseninde -1,11 m,
- Z ekseninde ise -1,14 m olarak bulunmuştur.

Tablo 4.8: Topo ve LiDAR SAM verilerine ait konumsal farklılıkların istatistiksel özeti.

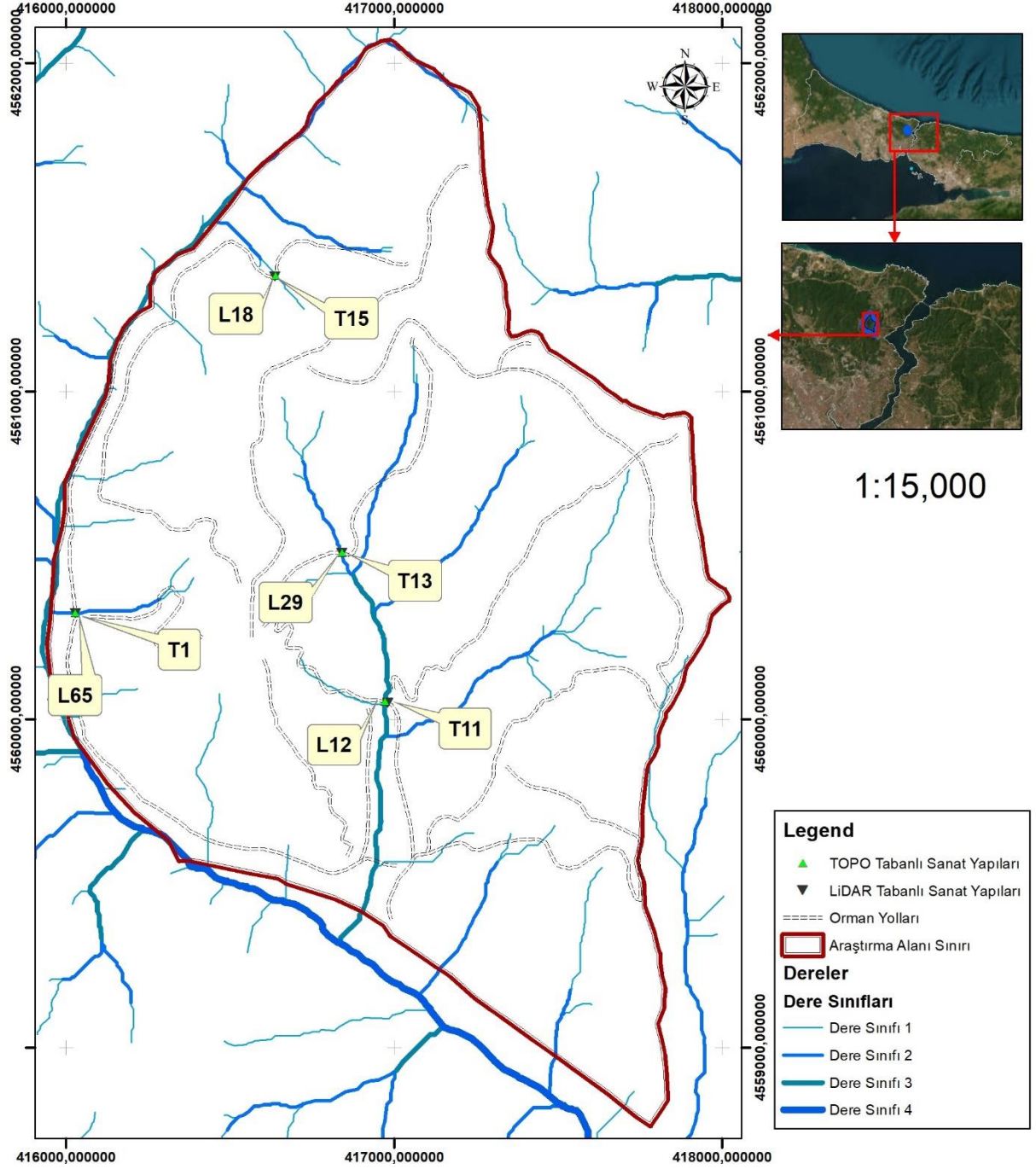
Koordinat Ekseni	Ortalama Fark (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
X	+1,64	4,18	4,49
Y	-1,11	1,54	1,90
Z	-1,14	6,04	6,14

Bu farklar, LiDAR verisinin Topo tabanlı modele göre ortalama olarak doğuya ve hafif güney yönüne kayma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca yükseklik bileşeninde TOPO verisinin LiDAR’a kıyasla sistematik olarak daha yüksek değerler içerdiği gözlemlenmiştir.

Her bir eksenindeki konumsal farklılıklara ait RMSE değerleri sırasıyla X: 4,49 m, Y: 1,90 m, Z: 6,14 m olarak hesaplanmıştır. Özellikle Z ekseninde görece yüksek olan RMSE değeri, LiDAR tabanlı modelin yükseklik bileşeninde daha yüksek doğruluk sunduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde literatürde de LiDAR’ın topoğrafik detayları ve mikro yüzey eğimlerini daha hassas temsil ettiği birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Anderson ve diğ., 2006; Liu, 2008).

Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de, Topo ve LiDAR tabanlı SAM verileri kullanılarak belirlenen hidrolik sanat yapılarının koordinat bilgileri sunulmuştur. Bu tablolarda yer alan konum verileri, CBS ortamında analiz edilerek, birbirine 0–5 metre ve 5–10 metre mesafe aralığında yakın konumlanan sanat yapıları eşleştirilmiştir (Şekil 4.14). Elde edilen bu eşleşmelere ait bilgiler Tablo 4.9’da verilmiş olup, bu verilere dayanarak her bir koordinat eksenini (X, Y ve Z)

için ortalama fark (μ), standart sapma (σ) ve kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.14: Her iki SAM modelinde birbirine 10 metreden daha yakın sanat yapılarının konumu.

Tablo 4.9: Farklı SAM kaynaklarında elde edilen sanat yapılarının konumsal uyumuna göre sınıflandırılması.

Mesafe Aralığı Grubu (m)	Arahk (m)	Sanat Yapısı No	X (m)	Y (m)	Z (m)	Sanat Yapısı No	X (m)	Y (m)	Z (m)
0-5	0.24	T1	416028.614	4560323.190	54.449	L67	416028.768	4560323.370	57.014
0-5	0.98	T13	416842.000	4560506.667	85.258	L29	416841.053	4560506.937	80.573
0-5	2.00	T15	416638.236	4561351.391	171.649	L18	416636.794	4561350.007	162.708
5-10	9.48	T11	416972.948	4560053.253	46.700	L12	416981.754	4560049.736	53.220

Bu bulgular, farklı SAM kaynaklarının mühendislik uygulamalarındaki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymakta; hidrolik sanat yapılarının hem konumlandırılması hem de boyutlandırılması süreçlerinde veri kaynağı seçiminin kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

4.5. HİDROLİK SANAT YAPILARIN BOYUTLANDIRILMASI

4.5.1. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalara Ait Maksimum Debiler

Belirlenen sanat yapılarının konumları ve bu yapıların arkasında oluşturdukları su toplama havzalarında 25, 50 ve 100 yıllık yağış tekerrürlerine göre meydana gelebilecek maksimum debiler, Rasyonel Yöntem ile hesaplanmıştır. 1/25.000 ölçekli topoğrafik harita tabanlı SAM verileri kullanılarak yapılan bu analiz, 19 farklı havza için alan büyüklüğü, yağış şiddetleri (i_{25} , i_{50} , i_{100}), akış katsayıları (C_{25} , C_{50} , C_{100}) ve taşkın debilerini ortaya koymuştur. Çalışma, taşkın periyotlarına göre havzaların hidrolojik davranışlarını ve taşkın debilerindeki değişimi anlamaya yönelik kapsamlı veriler sağlamaktadır. (Tablo 4.10).

Topoğrafik harita tabanlı SAM verisine dikkate alınarak üretilen havzalara ait Tablo 4.10 dikkate alındığında, havza alanı ve maksimum debi açısından; daha büyük alanlara sahip havzalarda maksimum debilerin daha yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin, **T10** (49,23 ha) ve **T11** (53,22 ha) havzalarında Q_{100} periyodu için sırasıyla 12,31 m³/sn ve 11,46 m³/sn maksimum debiler hesaplanmıştır. Küçük havzalarda ise debi değerleri daha düşüktür. Örneğin, sadece 0,20 ha alana sahip **T3** havzasında Q_{100} periyodunda maksimum debi 0,19 m³/sn olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.10: Topoğrafik harita tabanlı SAM verisinden elde edilen havzalara ait maksimum debiler.

SAM Kaynağı	Havza No	Alan (ha)	Yağış şiddeti (mm/sa)			Akış Katsayıları			Maksimum Debi (m ³ /sn)		
			i ₂₅	i ₅₀	i ₁₀₀	C ₂₅	C ₅₀	C ₁₀₀	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀
1/25.000 Ölçekli topoğrafik harita	T1	9,63	230,0	250,0	280,0	0,38	0,44	0,50	2,36	2,93	3,75
	T2	4,36	270,0	310,0	340,0	0,38	0,44	0,50	1,26	1,64	2,06
	T3	0,20	580,0	630,0	700,0	0,38	0,44	0,50	0,12	0,15	0,19
	T4	5,26	260,0	290,0	325,0	0,38	0,44	0,50	1,46	1,86	2,37
	T5	6,00	300,0	337,0	375,0	0,38	0,44	0,50	1,92	2,46	3,12
	T6	4,45	235,0	260,0	290,0	0,38	0,44	0,50	1,12	1,41	1,79
	T7	13,22	190,0	210,0	240,0	0,38	0,44	0,50	2,68	3,38	4,41
	T8	2,54	250,0	280,0	310,0	0,38	0,44	0,50	0,68	0,87	1,1
	T9	18,45	230,0	250,0	280,0	0,38	0,44	0,50	4,53	5,62	7,18
	T10	49,23	140,0	160,0	180,0	0,38	0,44	0,50	7,36	9,59	12,31
	T11	53,22	130,0	140,0	155,0	0,38	0,44	0,50	7,38	9,07	11,46
	T12	7,29	260,0	290,0	325,0	0,38	0,44	0,50	2,02	2,57	3,29
	T13	21,21	210,0	235,0	260,0	0,38	0,44	0,50	4,75	6,07	7,66
	T14	4,95	295,0	330,0	360,0	0,38	0,44	0,50	1,56	1,99	2,47
	T15	4,54	260,0	290,0	325,0	0,38	0,44	0,50	1,26	1,6	2,05
	T16	2,34	310,0	340,0	380,0	0,38	0,44	0,50	0,78	0,97	1,24
	T17	14,84	215,0	240,0	265,0	0,38	0,44	0,50	3,4	4,34	5,46
	T18	2,64	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	1,07	1,35	1,72
	T19	3,70	330,0	370,0	410,0	0,38	0,44	0,50	1,3	1,67	2,11

Yağış şiddetinin etkisi dikkate alındığında ise; yüksek yağış şiddetlerine sahip havzalar, maksimum debilerde belirgin artış göstermiştir. Örneğin: T18 havzasında Q₁₀₀ periyodunda yağış şiddeti 470 mm/sa olarak belirlenmiş ve bu değer 1,72 m³/sn maksimum debiye neden olmuştur. Düşük yağış şiddetine sahip T10 havzasında ise Q₁₀₀ periyodu için yağış şiddeti 180 mm/sa iken maksimum debi 12,31 m³/sn olarak hesaplanmıştır.

Akış Katsayıları (C) ise; taşkın debilerinin hesaplanmasında kritik bir role sahiptir. Tüm havzalarda (T1-T19) C katsayısı taşkın periyoduna bağlı olarak artış göstermiştir (Q₂₅: 0,38; Q₅₀: 0,44; Q₁₀₀: 0,5). Bu durum, taşkın riskinin daha yüksek olduğu periyotlarda akış miktarının arttığını ortaya koymaktadır.

Taşkın periyotlarına göre incelendiğinde, tüm havzalarda (T1-T19) taşkın periyotları arasında maksimum debilerde düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin: T9 havzasında Q₂₅ için 4,53 m³/sn olarak hesaplanan maksimum debi, Q₅₀'de 5,62 m³/sn, Q₁₀₀'de ise 7,18 m³/sn'ye yükselmiştir. Benzer şekilde, T5 havzasında Q₂₅'te 1,92 m³/sn olan debi, Q₁₀₀ periyodunda 3,12 m³/sn'ye ulaşmıştır.

4.5.2. Hava LiDAR Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalara Ait Maksimum Debiler

Hava LiDAR tabanlı SAM verisine dikkate alınarak üretilen havzalara ait Tablo 4.11 ve Tablo 4.12 incelendiğinde,

Havza Alanı ve Maksimum Debi İlişkisi: LiDAR tabanlı hesaplanan havzalar incelendiğinde, daha büyük alanlara sahip havzaların maksimum debilerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, L12 havzası (48,74 ha) için Q_{100} periyodu kapsamında 11,51 m^3/sn , L29 havzası (20,61 ha) için ise 7,58 m^3/sn maksimum debiler hesaplanmıştır. Diğer taraftan, daha küçük havzalar, daha düşük debi değerlerine sahiptir. Örneğin, sadece 0,08 ha alana sahip L38 havzasında Q_{100} periyodunda maksimum debi 0,09 m^3/sn olarak hesaplanmıştır.

Yağış Şiddetinin Etkisi: Yağış şiddetinin etkisi de belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Yüksek yağış şiddetlerine sahip havzalar, maksimum debilerde belirgin bir artış göstermektedir. Örneğin, L11 havzasında yağış şiddeti 760 mm/sa ve Q_{100} periyodunda 0,33 m^3/sn debi hesaplanırken, L36 havzasında yağış şiddeti 340 mm/sa olup, Q_{100} periyodu için hesaplanan maksimum debi 0,25 m^3/sn 'dir.

Akış Katsayılarının Rolü: Tüm havzalarda (L1-L71) akış katsayıları (C_{25} , C_{50} , C_{100}) taşkın periyoduna bağlı olarak artış göstermektedir. Akış katsayısının Q_{25} , Q_{50} ve Q_{100} için sırasıyla 0,38, 0,44 ve 0,50 olması, taşkın periyotlarında akış miktarının arttığını göstermektedir. Bu, taşkın riskinin daha yüksek olduğu periyotlarda suyun daha fazla aktığını ve dolayısıyla daha büyük debilerin hesaplandığını ortaya koymaktadır.

Taşkın Periyotları ve Debi Artışı: Taşkın periyotlarına göre incelendiğinde, tüm havzalarda (L1-L71) maksimum debilerde düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin, L9 havzasında Q_{25} için 0,95 m^3/sn olan maksimum debi, Q_{50} 'de 1,20 m^3/sn 'ye, Q_{100} 'de ise 1,54 m^3/sn 'ye yükselmiştir. Benzer şekilde, L53 havzasında Q_{25} 'te 0,65 m^3/sn olan debi, Q_{100} periyodunda 1,05 m^3/sn 'ye çıkmıştır. Bu artış, taşkın periyotlarının uzunluğu ile doğru orantılı olarak debinin arttığını göstermektedir.

Tablo 4.11: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen L1-L36 no'lu havzalara ait maksimum debiler.

SAM Kaynağı	Havza No	Alan (ha)	Yağış şiddeti (mm/sa)			Akış Katsayıları			Maksimum Debi (m ³ /sn)		
			i ₂₅	i ₅₀	i ₁₀₀	C ₂₅	C ₅₀	C ₁₀₀	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀
LiDAR	L1	1,3	400,0	450,0	490,0	0,38	0,44	0,50	0,55	0,71	0,88
	L2	0,66	530,0	590,0	650,0	0,38	0,44	0,50	0,37	0,48	0,60
	L3	0,72	555,0	610,0	675,0	0,38	0,44	0,50	0,43	0,54	0,68
	L4	1,67	390,0	435,0	480,0	0,38	0,44	0,50	0,69	0,88	1,11
	L5	9,96	250,0	280,0	310,0	0,38	0,44	0,50	2,66	3,39	4,29
	L6	0,91	420,0	470,0	520,0	0,38	0,44	0,50	0,41	0,52	0,66
	L7	0,64	600,0	670,0	740,0	0,38	0,44	0,50	0,41	0,52	0,66
	L8	3,06	310,0	340,0	380,0	0,38	0,44	0,50	1,01	1,27	1,61
	L9	2,41	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,95	1,20	1,54
	L10	2,81	330,0	370,0	410,0	0,38	0,44	0,50	0,99	1,27	1,60
	L11	0,31	640,0	700,0	760,0	0,38	0,44	0,50	0,21	0,26	0,33
	L12	48,74	130,0	155,0	170,0	0,38	0,44	0,50	6,76	9,20	11,51
	L13	37,9	140,0	160,0	180,0	0,38	0,44	0,50	5,66	7,38	9,47
	L14	3,01	330,0	370,0	410,0	0,38	0,44	0,50	1,06	1,35	1,71
	L15	2,35	290,0	330,0	370,0	0,38	0,44	0,50	0,73	0,94	1,21
	L16	0,50	340,0	375,0	420,0	0,38	0,44	0,50	0,18	0,23	0,29
	L17	0,55	325,0	360,0	400,0	0,38	0,44	0,50	0,19	0,24	0,30
	L18	3,90	300,0	337,0	375,0	0,38	0,44	0,50	1,25	1,60	2,03
	L19	0,71	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	0,29	0,36	0,46
	L20	2,69	315,0	350,0	390,0	0,38	0,44	0,50	0,90	1,15	1,46
	L21	5,51	290,0	330,0	360,0	0,38	0,44	0,50	1,70	2,21	2,75
	L22	2,17	400,0	450,0	490,0	0,38	0,44	0,50	0,93	1,19	1,48
	L23	5,03	280,0	320,0	350,0	0,38	0,44	0,50	1,50	1,96	2,45
	L24	1,61	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,64	0,80	1,03
	L25	1,07	390,0	435,0	480,0	0,38	0,44	0,50	0,44	0,57	0,71
	L26	0,81	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	0,33	0,42	0,53
	L27	0,75	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,30	0,38	0,48
	L28	0,60	480,0	510,0	565,0	0,38	0,44	0,50	0,31	0,37	0,47
	L29	20,61	215,0	240,0	265,0	0,38	0,44	0,50	4,73	6,02	7,58
	L30	0,08	640,0	700,0	760,0	0,38	0,44	0,50	0,06	0,07	0,09
	L31	0,57	480,0	540,0	600,0	0,38	0,44	0,50	0,29	0,38	0,48
	L32	0,93	420,0	470,0	520,0	0,38	0,44	0,50	0,42	0,53	0,67
	L33	1,59	420,0	470,0	520,0	0,38	0,44	0,50	0,71	0,91	1,15
	L34	3,31	295,0	335,0	370,0	0,38	0,44	0,50	1,04	1,35	1,70
	L35	0,52	355,0	395,0	440,0	0,38	0,44	0,50	0,20	0,25	0,32
	L36	0,52	270,0	310,0	340,0	0,38	0,44	0,50	0,15	0,20	0,25

Tablo 4.12: Hava LiDAR tabanlı SAM verisinden elde edilen L37-L71 no'lu havzalara ait maksimum debiler.

Havza No	Alan (ha)	Yağış şiddeti (mm/sa)			Akış Katsayıları			Maksimum Debi (m ³ /sn)		
		i ₂₅	i ₅₀	i ₁₀₀	C ₂₅	C ₅₀	C ₁₀₀	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₁₀₀
L37	0,48	270,0	310,0	340,0	0,38	0,44	0,50	0,14	0,18	0,23
L38	0,00	640,0	700,0	760,0	0,38	0,44	0,50	0,00	0,00	0,00
L39	0,67	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,27	0,34	0,43
L40	0,57	555,0	610,0	675,0	0,38	0,44	0,50	0,34	0,43	0,54
L41	0,50	420,0	470,0	520,0	0,38	0,44	0,50	0,22	0,28	0,36
L42	1,39	430,0	480,0	540,0	0,38	0,44	0,50	0,64	0,81	1,04
L43	3,47	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	1,37	1,73	2,22
L44	0,60	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,24	0,30	0,38
L45	0,48	340,0	375,0	420,0	0,38	0,44	0,50	0,17	0,22	0,28
L46	0,66	315,0	350,0	390,0	0,38	0,44	0,50	0,22	0,28	0,36
L47	12,65	230,0	250,0	280,0	0,38	0,44	0,50	3,11	3,85	4,92
L48	0,47	370,0	410,0	460,0	0,38	0,44	0,50	0,19	0,24	0,30
L49	0,48	355,0	395,0	440,0	0,38	0,44	0,50	0,18	0,23	0,29
L50	0,95	390,0	435,0	480,0	0,38	0,44	0,50	0,39	0,50	0,63
L51	6,80	250,0	280,0	310,0	0,38	0,44	0,50	1,81	2,32	2,93
L52	0,94	390,0	435,0	480,0	0,38	0,44	0,50	0,39	0,50	0,63
L53	1,94	315,0	350,0	390,0	0,38	0,44	0,50	0,65	0,83	1,05
L54	0,83	310,0	340,0	380,0	0,38	0,44	0,50	0,27	0,34	0,44
L55	0,84	290,0	330,0	360,0	0,38	0,44	0,50	0,26	0,34	0,42
L56	2,76	265,0	300,0	335,0	0,38	0,44	0,50	0,78	1,01	1,28
L57	11,79	190,0	210,0	240,0	0,38	0,44	0,50	2,39	3,01	3,93
L58	3,71	235,0	265,0	300,0	0,38	0,44	0,50	0,93	1,20	1,55
L59	1,51	290,0	330,0	370,0	0,38	0,44	0,50	0,47	0,61	0,77
L60	2,17	315,0	350,0	390,0	0,38	0,44	0,50	0,73	0,92	1,18
L61	0,51	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	0,21	0,26	0,33
L62	0,57	390,0	435,0	480,0	0,38	0,44	0,50	0,24	0,30	0,38
L63	0,25	580,0	630,0	700,0	0,38	0,44	0,50	0,16	0,19	0,25
L64	0,48	420,0	470,0	520,0	0,38	0,44	0,50	0,22	0,28	0,35
L65	4,16	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	1,69	2,13	2,72
L66	1,93	300,0	337,0	375,0	0,38	0,44	0,50	0,62	0,79	1,01
L67	9,03	235,0	260,0	290,0	0,38	0,44	0,50	2,26	2,86	3,64
L68	0,80	380,0	420,0	470,0	0,38	0,44	0,50	0,32	0,41	0,52
L69	1,84	350,0	390,0	435,0	0,38	0,44	0,50	0,69	0,88	1,11
L70	0,48	555,0	610,0	675,0	0,38	0,44	0,50	0,28	0,35	0,45
L71	0,56	530,0	590,0	650,0	0,38	0,44	0,50	0,32	0,40	0,51

4.5.3. Topoğrafik Harita Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalardaki Hidrolik Sanat Yapısı Tür ve Kesitleri

Tablo 4.13 dikkate alındığında, tabloda yer alan sanat yapıları ve kesit boyutlarına göre yapılan değerlendirmelerde, taşkın periyotlarına göre kesitlerin büyüdüğü gözlemlenmektedir. Çoğu havzada, taşkın periyotlarına bağlı olarak hazır beton büz kesitleri kullanılmakta ve genellikle Ø60 ile Ø80 arasında değişen boyutlar kullanılmaktadır. Özellikle Q₂₅ ve Q₅₀

periyotlarında Ø60 boyutlarında hazır beton büzler yaygın olarak kullanılırken, Q₁₀₀ periyodunda bazı havzalarda Ø80 boyutlarına geçiş yapılmıştır. Bu değişim, taşkın debilerinin artışıyla birlikte, akış kapasitesinin artırılması gerektiğinin bir göstergesidir (Şekil 4.15).

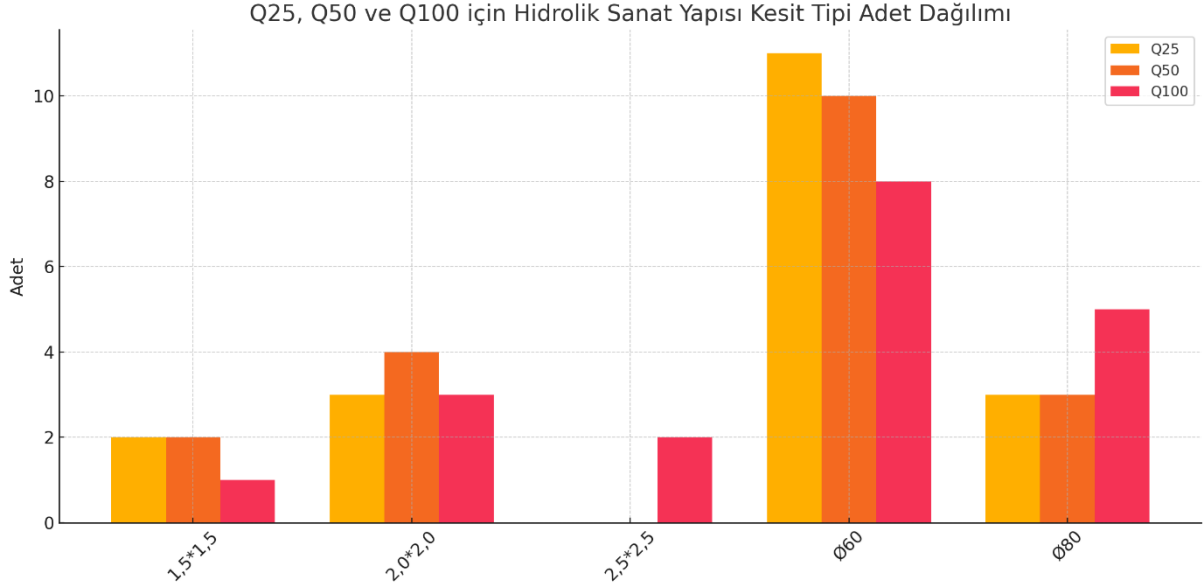
Tablo 4.13: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen Hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri.

Havza No	Q ₂₅		Q ₅₀		Q ₁₀₀	
	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti
T1	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
T2	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T3	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T4	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø80
T5	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
T6	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T7	Hazır Beton Büz	Ø80	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	1,5*1,5
T8	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T9	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0
T10	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,5*2,5
T11	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,5*2,5
T12	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
T13	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0
T14	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø80
T15	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T16	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T17	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	2,0*2,0
T18	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
T19	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60

Kutu menfez yapıları ise, büyük alanlı havzalarda kullanılmıştır. T7, T9, T10, T11 ve T13 gibi havzalarda Q₂₅ ve Q₅₀ periyotlarında 1,5x1,5 m veya 2,0x2,0 m boyutlarındaki kesitler kullanılmıştır. Ancak, taşkın debilerinin en yüksek olduğu Q₁₀₀ periyodunda, özellikle T10 ve T11 havzalarında, kutu menfez kesit boyutları 2,5x2,5 m'ye yükseltilmiştir. Bu, büyük taşkın debilerini taşıyabilmek için sanat yapılarının boyutlarının artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, taşkın periyotlarının artışıyla birlikte, havzalarda kullanılan sanat yapılarının kesit boyutları da büyümüştür. Küçük alanlı havzalarda, daha küçük kesit boyutları (örneğin Ø60 kesitli hazır beton büz) yeterli olurken, büyük havzalarda taşkın debilerinin

artışına karşı daha büyük kesitler (örneğin 2,5x2,5 m kutu menfez) uygun olmuştur. Bu durum, taşkın riskinin arttığı periyotlarda, akışın daha büyük alanlardan geçebilmesi için gerekli mühendislik çözümlerinin devreye girdiğini göstermektedir.



Şekil 4.15: Topoğrafik SAM göre Q₂₅, Q₅₀ ve Q₁₀₀ için hidrolik sanat yapısı kesit tipi dağılımı.

4.5.4. Hava LiDAR Tabanlı SAM Modeline Göre Havzalardaki Hidrolik Sanat Yapısı Tür ve Kesitleri

Hava LiDAR tabanlı SAM verisine göre elde edilen 71 havzadaki sanat yapılarına ait elde edilen Tablo 4.14 ve 4.15 incelendiğinde, taşkın periyotlarına bağlı olarak kullanılan sanat yapıları ve kesit boyutlarında belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Genel olarak, taşkın debilerinin arttığı periyotlarda daha büyük kesitler ve yapı tipleri ile karşılaşmıştır (Şekil 4.16).

Çoğu havzada, özellikle Q₂₅ ve Q₅₀ taşkın periyotlarında hazır beton büz (Ø60) kullanılması yeterli olmuştur. Bu kesit boyutu, küçük taşkın debilerinin olduğu havzalarda yeterli olmakta ve çoğu havzayı kapsamaktadır. Bu kullanım oranı, taşkın debilerinin düşük olduğu durumlarda hazır beton büz (Ø60) kesitinin yeterli olduğunu göstermektedir. Taşkın debisi arttıkça, özellikle Q₁₀₀ periyodunda, daha büyük kesit boyutlarına ve kutu menfez yapılarının kullanımına geçilmiştir.

Tablo 4.14: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri (L1-L36 no'lu havzalara ait).

Havza No	Q ₂₅		Q ₅₀		Q ₁₀₀	
	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti
L1	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L2	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L3	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L4	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L5	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80	Kutu Menfez	1,5*1,5
L6	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L7	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L8	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L9	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L10	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L11	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L12	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,5*2,5
L13	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0
L14	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L15	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L16	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L17	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L18	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L19	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L20	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L21	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
L22	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L23	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø80
L24	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L25	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L26	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L27	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L28	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L29	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0	Kutu Menfez	2,0*2,0
L30	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L31	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L32	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L33	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L34	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L35	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L36	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60

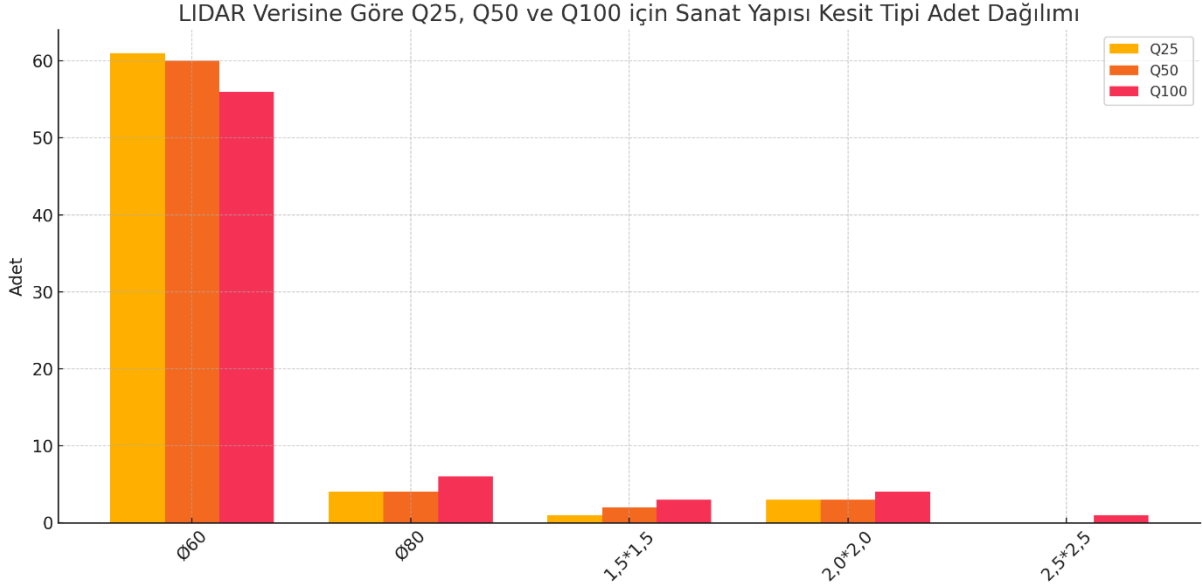
Tablo 4.15: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının tür ve kesitleri (L37-L71 no'lu havzalara ait).

Havza No	Q ₂₅		Q ₅₀		Q ₁₀₀	
	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti	Sanat Yapısı	Kesiti
L37	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L38	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L39	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L40	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L41	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L42	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L43	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L44	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L45	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L46	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L47	Hazır Beton Büz	Ø80	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	2,0*2,0
L48	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L49	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L50	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L51	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
L52	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L53	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L54	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L55	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L56	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L57	Hazır Beton Büz	Ø80	Kutu Menfez	1,5*1,5	Kutu Menfez	1,5*1,5
L58	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L59	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L61	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L62	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L63	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L64	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L65	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L66	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L67	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80	Hazır Beton Büz	Ø80
L68	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L69	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L70	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60
L71	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60	Hazır Beton Büz	Ø60

Kesit Boyutları ve Kullanım Oranı:

Hazır beton büz (Ø60) kesiti, Q₂₅ ve Q₅₀ periyotlarında, %95,77 oranında (68 havza) kullanılmıştır. Bu kesit, düşük taşkın debilerinin taşınmasında yeterli olmuştur.

Q₁₀₀ periyodunda ise hazır beton büz (Ø60) kesiti %91,55 oranında (65 havza) tercih edilmiştir. Bu, taşkın debilerinin arttığı bu periyotta daha büyük kesitlerin tercih edilmeye başlandığını göstermektedir.



Şekil 4.16: LiDAR tabanlı SAM göre Q₂₅, Q₅₀ ve Q₁₀₀ için hidrolik sanat yapısı kesit tipi dağılımı.

Diğer Sanat Yapıları:

Kutu menfez yapıları, daha büyük havzalarda ve yüksek taşkın debilerine sahip bölgelerde tercih edilmiştir. Özellikle büyük taşkın debilerinin görüldüğü Q₁₀₀ periyodunda, kutu menfez yapıları daha büyük boyutlarla kullanılmıştır. Örneğin, L5, L12, L13 ve L47 gibi havzalarda Q₁₀₀ periyodunda kutu menfez boyutları 1,5x1,5 m'den 2,0x2,0 m veya 2,5x2,5 m'ye yükseltilmiştir.

Havzalarda Değişiklikler:

Bazı havzalarda taşkın periyotları arttıkça, sanat yapılarının boyutlarında belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir: L5 havzasında, Q₂₅ ve Q₅₀ periyotlarında hazır beton büz (Ø80) kullanılırken, Q₁₀₀ periyodunda kutu menfez (1,5x1,5 m) kullanılmıştır. Bu, taşkın debilerinin artışıyla birlikte daha büyük kesit gereksinimlerini karşılamak amacıyla yapılmış bir değişikliktir. L12 ve L13 havzalarında Q₂₅ ve Q₅₀ için kutu menfez (2,0x2,0 m) kullanılırken, Q₁₀₀ periyodunda bu kesit boyutları 2,5x2,5 m'ye yükseltilmiştir. L47 havzasında ise Q₂₅

periyodunda hazır beton büz ($\text{Ø}80$), Q_{50} periyodunda kutu menfez (1,5x1,5 m), ve Q_{100} periyodunda ise kutu menfez (2,0x2,0 m) kullanılmıştır. Bu da taşkın periyodunun arttıkça sanat yapılarının boyutunun büyüdüğünü ve taşkın riskine karşı önlem alındığını göstermektedir.

Kesit Boyutlarında Değişiklikler:

$\text{Ø}60$ hazır beton büz kesitleri, çoğu havzada tüm periyotlar boyunca sabit kalmıştır ve küçük taşkın debileri için yeterli olmuştur. $\text{Ø}80$ hazır beton büz kesitleri ise genellikle Q_{50} periyodunda kullanılmış, bazı havzalarda ise Q_{100} periyodunda bile sabit kalmıştır (örneğin, L51 ve L67 gibi). Bu, taşkın debilerinin artmasına rağmen kesit boyutlarının değiştirilmediği birkaç örneği göstermektedir.

Kutu menfez yapıları ise özellikle Q_{100} periyodunda daha büyük boyutlarla tercih edilmiştir. 2,0x2,0 m ve 2,5x2,5 m boyutları, büyük taşkın debilerinin taşınabilmesi için gerekli kapasiteye sahip olup, bazı havzalarda bu değişim belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, taşkın periyotlarına bağlı olarak havzalarda kullanılan sanat yapıları ve kesit boyutlarında belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Q_{25} ve Q_{50} periyotlarında, küçük taşkın debilerini taşımak için hazır beton büz ($\text{Ø}60$) yaygın olarak tercih edilmiştir. Ancak, taşkın debilerinin arttığı Q_{100} periyodunda, özellikle büyük havzalarda kutu menfez yapıları tercih edilmiş ve kesit boyutları büyütülmüştür. Bu, taşkın debilerinin artışıyla birlikte, taşkın riskine karşı uygun mühendislik çözümlerinin devreye girdiğini ve taşkınların güvenli bir şekilde yönetilebilmesi için yapı boyutlarının arttığını göstermektedir.

4.6. ORMAN YOLLARINA GÖRE SANAT YAPISI GEREKSİNİMLERİ

Çalışma kapsamında, araştırma alanı içinde yer alan 10 adet orman yoluna ait sanat yapısı ihtiyaçları değerlendirilmiştir. Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre konumlandırılan 19 adet sanat yapısı ve bunların ait oldukları yollar Tablo 4.16'da sunulmuştur. Benzer şekilde, Hava LiDAR tabanlı SAM modelinden elde edilen 71 adet sanat yapısına ait mekânsal konum bilgileri Tablo 4.17'te verilmiştir. Her bir sanat yapısına karşılık gelen orman yolu kodları aracılığıyla, yollar üzerindeki yapıların dağılımı analiz edilmiştir.

Tablo 4.16: Topoğrafik harita tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu ve ait olduğu orman yolu.

Sanat Yapısı Numarası	Ait olduğu orman yolu kodu	Sanat Yapısının Konumu		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
T1	004	416028.614	4560323.190	54.449
T2	004	416019.115	4560588.237	59.017
T3	004	416018.578	4560742.444	67.607
T4	006	416108.016	4560730.343	95.521
T5	007	416282.001	4560365.575	75.081
T6	004	416041.588	4560010.303	44.570
T7	004	416431.857	4559632.567	32.174
T8	004	416675.333	4559581.962	36.421
T9	004	416946.834	4559567.819	25.635
T10	005	417012.111	4559949.371	42.886
T11	005	416972.948	4560053.253	46.700
T12	005	416828.612	4560086.015	62.161
T13	008	416842.000	4560506.667	85.258
T14	006	416329.400	4561216.112	126.830
T15	006	416638.236	4561351.391	171.649
T16	010	417152.090	4559610.581	52.029
T17	008	416962.009	4560726.260	129.010
T18	010	417346.515	4559626.599	65.564
T19	010	417450.482	4559629.307	79.208

Tablo 4.17: Hava LiDAR tabanlı SAM modeline göre belirlenen hidrolik sanat yapılarının konumu ve ait olduğu orman yolu.

Sanat Yapısı No	Ait olduğu orman yolu kodu	Sanat Yapısının Konumu			Sanat Yapısı No	Ait olduğu orman yolu kodu	Sanat Yapısının Konumu		
		X (m)	Y (m)	Z (m)			X (m)	Y (m)	Z (m)
L1	007	416350.515	4560371.515	88.004	L36	003	417442.466	4561053.870	224.144
L2	007	416350.293	4560354.697	89.099	L37	003	417747.295	4560790.870	226.035
L3	007	416267.906	4560328.367	75.798	L38	003	417774.178	4560724.747	223.633
L4	010	417647.730	4559607.760	94.471	L39	010	417087.971	4559588.571	44.489
L5	010	417173.870	4559618.179	55.472	L40	003	417694.120	4560155.128	156.034
L6	010	417577.516	4559562.140	90.476	L41	003	417774.524	4560093.041	170.005
L7	005	416706.990	4560171.373	86.441	L42	003	417497.896	4560076.932	127.587
L8	005	416722.662	4560160.953	84.108	L43	003	417453.647	4560040.978	127.177
L9	005	416784.161	4560095.370	73.055	L44	001	417168.392	4561653.316	219.984
L10	005	416872.935	4560075.805	61.632	L45	001	416793.575	4561144.381	211.938
L11	005	416989.370	4560045.356	53.030	L46	001	416770.114	4561127.468	210.936
L12	005	416981.754	4560049.736	53.220	L47	008	416994.539	4560749.584	126.337
L13	005	417021.189	4559789.543	45.852	L48	001	416652.501	4560515.811	157.785
L14	005	417041.939	4559708.620	43.840	L49	004	416021.525	4560285.370	57.490
L15	005	417009.006	4559506.009	33.525	L50	004	416012.893	4560238.656	55.229
L16	002	417752.870	4560813.424	226.124	L51	004	416052.910	4559964.570	44.494
L17	002	416995.889	4560108.389	55.110	L52	004	416118.625	4559868.561	39.976
L18	006	416636.794	4561350.007	162.708	L53	004	416206.352	4559783.602	42.690
L19	006	416327.614	4561250.870	128.167	L54	004	416356.620	4559677.226	39.136
L20	006	416586.239	4561370.336	152.711	L55	004	416926.177	4559573.785	32.296
L21	006	416316.123	4561207.414	107.534	L56	004	416934.779	4559571.529	32.270
L22	006	416181.629	4560996.219	102.447	L57	004	416415.895	4559640.145	37.773
L23	006	416105.365	4560719.365	85.521	L58	004	416612.870	4559601.901	37.515
L24	006	416268.266	4560626.513	126.903	L59	004	416503.254	4559612.381	39.495
L25	006	416468.682	4560500.073	135.083	L60	004	416666.066	4559585.877	37.112
L26	008	417068.906	4561127.154	208.297	L61	004	416842.870	4559537.686	39.084
L27	008	417111.033	4561057.620	202.146	L62	004	416778.139	4559539.523	40.167
L28	008	417109.255	4560996.085	188.577	L63	004	416134.784	4561003.370	80.713
L29	008	416841.053	4560506.937	80.573	L64	004	416096.771	4560910.620	77.829
L30	008	416709.549	4560465.870	125.145	L65	004	416011.181	4560473.120	56.782
L31	008	416663.778	4560422.661	119.399	L66	004	416028.395	4560326.145	57.099
L32	008	416635.980	4560392.940	124.688	L67	004	416028.768	4560323.370	57.014
L33	006	417026.620	4561385.975	206.266	L68	004	416029.101	4560320.889	57.032
L34	006	416812.370	4561438.899	169.527	L69	004	416917.711	4559843.750	44.538
L35	003	417048.190	4561215.981	221.128	L70	004	416920.906	4559722.120	39.661
					L71	010	417063.120	4559582.275	39.940

Sanat yapılarının konumsal ilişkilerini değerlendirmek amacıyla, aynı yol üzerinde bulunan yapıların birbiri arasındaki ortalama mesafeleri (aralıkları) hesaplanmış ve bu değerler Tablo 4.18’de özetlenmiştir. Hesaplanan bu değerler, yol drenaj kapasitesi ve yol stabilitesi açısından yapıların uygun konumlandırılmasına yönelik temel göstergelerdendir.

Tablo 4.18: SAM kaynağına göre yol başına düşen sanat yapısı.

Yol kod no	SAM Kaynağı	Sanat Yapısı Sayısı	Ortalama Aralık (m)
001	Hava LiDAR	4	427,95
	Topoğrafik Harita	-	-
002	Hava LiDAR	2	1034,45
	Topoğrafik Harita	-	-
003	Hava LiDAR	8	263,06
	Topoğrafik Harita	-	-
004	Hava LiDAR	22	308,99
	Topoğrafik Harita	7	281,64
005	Hava LiDAR	9	106,29
	Topoğrafik Harita	3	129,68
006	Hava LiDAR	10	320,74
	Topoğrafik Harita	3	435,50
007	Hava LiDAR	3	51,46
	Topoğrafik Harita	1	-
008	Hava LiDAR	8	189,45
	Topoğrafik Harita	2	250,24
009	Hava LiDAR	-	-
	Topoğrafik Harita	-	-
010	Hava LiDAR	5	348,78
	Topoğrafik Harita	3	149,54

Tablo 4.18 incelendiğinde, sanat yapısı tespiti açısından hava LiDAR tabanlı SAM verisinin, topoğrafik harita tabanlı veriye kıyasla daha fazla detay sunduğu net bir şekilde görülmektedir. Özellikle 004, 005, 006, 007, 008 ve 010 kodlu yollar için her iki veri kaynağından elde edilen sanat yapısı sayıları karşılaştırıldığında, LiDAR verisinin daha yüksek yapısal yoğunluk sağladığı dikkat çekmektedir. Örneğin, 004 numaralı yol için LiDAR verisi 22 adet yapı tespit ederken, topoğrafik harita verisi sadece 7 yapı göstermektedir. Benzer durum 005, 006 ve 008 numaralı yollarda da gözlemlenmektedir. Bu farkın temelinde, LiDAR’ın yüksek çözünürlüklü arazi modelleme kapasitesi yatmaktadır. LiDAR verisi, mikrotopoğrafik değişimleri algılamada çok daha hassas olduğu için, topoğrafik harita kaynaklı modellerin atladığı detayları ortaya koyabilmektedir. Nitekim 001, 002 ve 003 no.lu yol kesimlerinde yalnızca LiDAR verisinden sanat yapısı tespiti yapılabilmiş, topoğrafik harita ile herhangi bir yapı önerisi üretilmemiştir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı SAM kaynaklarının (özellikle hava LiDAR ve topoğrafik haritaların) orman yollarındaki sanat yapısı gereksinimlerinin modellenmesine etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, benzer nitelikteki literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve farklı veri kaynaklarının hidrolik modelleme üzerindeki avantajları ve sınırlılıkları tartışılmıştır. Tez çalışmasının giriş kısmında ifade edilen hipotezler değerlendirildiğinde, çalışma sonunda “1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar ve hava kaynaklı LiDAR verilerine dayalı olarak elde edilen havza parametrelerine göre tesis edilecek hidrolik sanat yapıları arasında yer ve boyut bakımından anlamlı bir fark bulunmaktadır.” hipotezinin doğrulandığı görülmektedir.

Elde edilen bulgular ışığında, LiDAR ve Topoğrafik harita kaynaklı modellerin henüz veri setlerinin mekânsal olarak değerlendirilmesi aşamasında bile önemli farklar ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Her iki veri setinden elde edilen eğim ve bakı verileri arasındaki farklılıkların değerlendirildiğinde, genel olarak ortalama eğim ve bakı değerlerinin birbirine kabul edilebilir düzeyde yakın olduğu, ancak maksimum eğim ve standart sapma gibi istatistiksel değerlerde mikrotopoğrafik farklılıkları da algılayabilme yeteneğinde olan LiDAR tabanlı modellerin fark yarattığı belirgin biçimde görülmüştür. Özellikle LiDAR tabanlı SAM verisinden türetilen eğim veri setindeki maksimum ve minimum eğim değerlerindeki hassasiyet dikkat çekicidir. Bu durumda, arazi eğimi ve bakı hakkında genel bir değerlendirme yapılmasının yeterli olacağı şartlarda her iki yöntem de tatmin edici düzeyde bilgi sunabilirken, detaylı mikrotopoğrafik analizler, heyelan riski, yüzey akışı ya da arazi şekillenme süreçlerinin değerlendirilmesi gibi daha hassas uygulamalarda LiDAR tabanlı SAM verisinin tercih edilmesi daha uygun olacaktır.

LiDAR verilerinin sağladığı yüksek çözünürlük, hidrolik modellemede akış yollarının ve drenaj ağlarının daha doğru belirlenmesine olanak tanır. Dávila-Hernández ve diğ. (2022), farklı SAM kaynaklarının ve hidrolik işleme algoritmalarının jeomorfolojik parametreler üzerindeki etkilerini incelemiş ve LiDAR tabanlı SAM'ların daha güvenilir sonuçlar verdiğini bulmuştur. Bu çalışmada da benzer şekilde, LiDAR verileri kullanılarak oluşturulan hidrolik

modellerin, topoğrafik haritalara dayalı modellere göre daha fazla sayıda dere kolları ve buna bağlı olarak daha hassas akış yolları ve drenaj yapıları tespit ettiği gözlemlenmiştir.

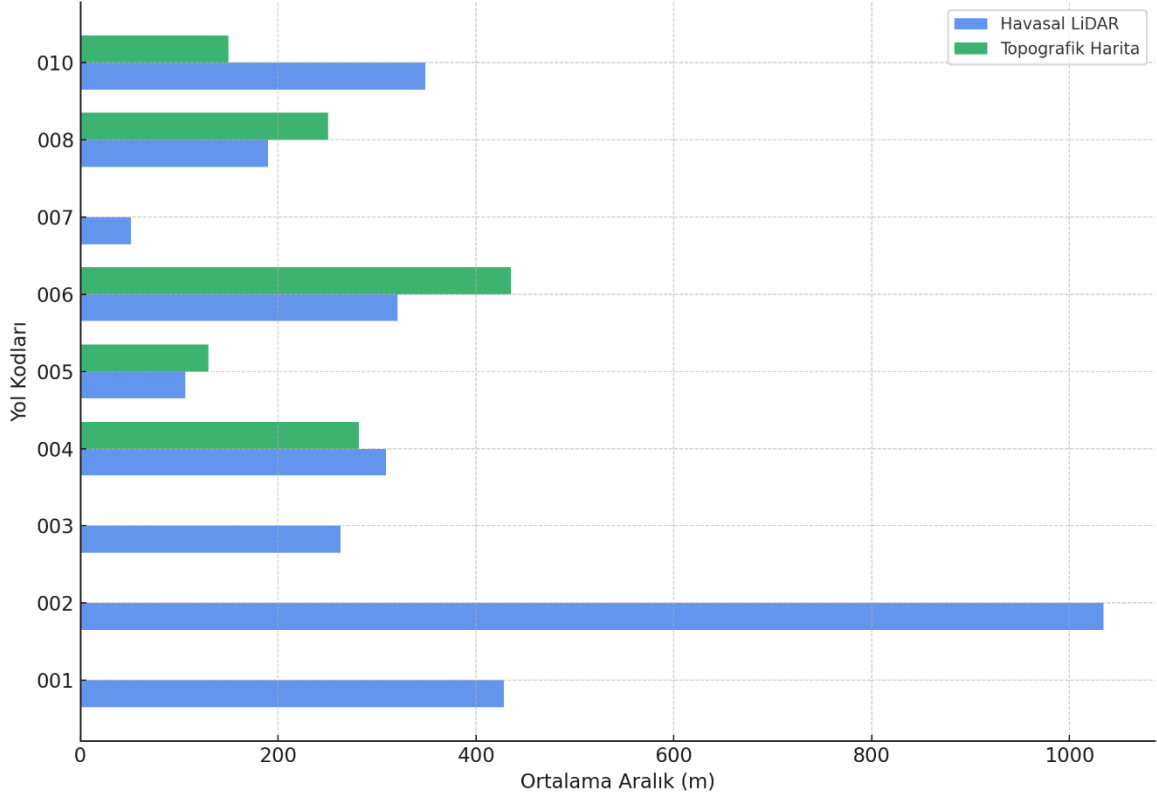
Çalışmada hem LiDAR hem de topoğrafik harita kaynaklı modellerin işlenmesiyle tespit edilen hidrolik sanat yapılarının konumsal karşılaştırılmalarında, özellikle Z değerlerindeki farklılığın büyüklüğü sanat yapılarının maliyetine olan etkisi bakımından önemlidir. Düşey doğruluk yataydaki (X, Y) değişimlere göre kazı, dolgu ve toprak hacim hesapları gibi işlemlerle maliyeti doğrudan etkileyen bir faktördür. Akgül ve diğ. (2018), maliyet karşılaştırması yaptıkları çalışmalarında LiDAR tabanlı modellerin maliyet etkin veri sunduğunu belirtmiştir.

SAM çözünürlüğü, hidrolik modellemede kritik bir faktördür. Zhao ve diğ. (2010), LiDAR tabanlı 1 m çözünürlüklü SAM'ları, 10 m çözünürlüklü SAM'lara göre alt havza sınırlarını ve su akış hatlarını daha doğru belirlediğini göstermiştir. Bu çalışmada da LiDAR verilerinin sağladığı yüksek çözünürlüğün, sanat yapılarının konumlandırılmasında ve drenaj yapılarının tasarımında önemli avantajlar sunduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre topoğrafik harita kaynaklı alanda 19, LiDAR tabanlı olanda ise 71 adet, sanat yapısı ve bunların havzaları oluşmuştur. Bununla beraber, aynı kod numaralı yollar üzerinde LiDAR verilerinin, topoğrafik haritalara kıyasla çok daha fazla sayıda sanat yapısı tespit ettiği belirlenmiştir. Özellikle 004, 005, 006, 007, 008 ve 010 kodlu yollar için her iki veri kaynağından elde edilen sanat yapısı sayıları karşılaştırıldığında, LiDAR verisinin daha yüksek yapısal yoğunluk sağladığı dikkat çekmektedir. Örneğin, 004 numaralı orman yolu üzerinde LiDAR verisi 22 sanat yapısı tespit ederken, topoğrafik harita verisi yalnızca 7 yapı tespit etmiştir. Aynı çalışma alanı içinde Demir (1996)'in 1/5.000 ölçekli ortofoto haritalardan elde ettiği SAM üzerinden yaptığı planlamada, İÜC Orman Fakültesi Eğitim Araştırma ve Uygulama Ormanının hem kuzey hem de güney parselinde toplam 26 adet kutu menfez ihtiyacı tespit edilmiştir.

LiDAR ve topoğrafik harita verilerine göre sanat yapılarının yerleştirilme sıklığını karşılaştırıldığında (Şekil 5.1) genel olarak, LiDAR verisi daha kısa ortalama mesafeler ile yapıların yerleştirildiğini önermektedir. Bu durum, araziye duyarlılık açısından daha sık drenaj altyapısı gereksinimine işaret etmektedir. Örneğin:

- 005 numaralı yol için LiDAR ortalama aralığı 106 m iken, Topo tabanlıya göre bu mesafe 129 m'dir.

- 006 numaralı yolda, LiDAR 320 m aralık sunarken, Topo tabanlı 435 m ile çok daha seyrek bir yapı dağılımı ortaya koymuştur.



Şekil 5.1: Orman Yollarında Ortalama Sanat Yapısı Aralıklarının SAM Yöntemlerine Göre Karşılaştırılması.

Bu bulgular, LiDAR'ın yüksek çözünürlüklü veri toplama kapasitesinin, küçük ölçekli topoğrafik özellikleri daha hassas bir şekilde yakalamasına bağlanabilir. Benzer sonuçlar literatürde de rapor edilmiştir; Degetto ve diğ. (2015), LiDAR tabanlı SAM'ların, kontur tabanlı SAM'lara göre daha doğru hidrolik modelleme sağladığını belirtmiştir. Bu sonuçlar, LiDAR verisinin mühendislik projelerinde daha hassas ve güvenilir altyapı yerleşimi sunduğunu göstermektedir.

Her ne kadar LiDAR tabanlı SAM'lar yüksek doğruluk sunsa da bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle, LiDAR verilerinin işlenmesi ve depolanması, yüksek maliyet ve zaman gerektirebilir. Ayrıca, LiDAR verilerinin yoğun bitki örtüsü altındaki yüzeyleri doğru bir şekilde temsil etmesi zor olabilir. Wechsler (2007), SAM'ları hidrolik uygulamalardaki belirsizliklerini incelemiş ve veri toplama yöntemlerinin ve çözünürlüğünün sonuçları önemli ölçüde etkileyebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, proje gereksinimlerine ve kaynaklara bağlı olarak, SAM seçiminde dikkatli bir değerlendirme yapılmalıdır.

LiDAR verilerinin yol drenaj tasarımında kullanımı, özellikle düz arazide ve taşkın yataklarında büyük avantajlar sunmaktadır. Hans ve diğ. (2003), LiDAR tabanlı yükseklik verilerinin otoyol drenaj analizlerinde kullanımını incelemiş ve LiDAR'ın, USGS tabanlı yükseklik verilerine göre daha doğru drenaj yapısı tasarımı sağladığını bulmuştur. Bu çalışmada da LiDAR verilerinin, orman yollarındaki sanat yapılarının optimal yerleşimi için daha hassas veriler sağladığı belirlenmiştir. Örneğin, Muhadi ve diğ. (2020), LiDAR türetilmiş SAM'ları taşkın uygulamalarındaki kullanımını incelemiş ve LiDAR verilerinin, taşkın modellemesinde yüksek doğruluk sağladığını belirtmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da LiDAR verilerinin, sanat yapılarının tespitinde ve konumlandırılmasında yüksek doğruluk sunduğu gözlemlenmiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, farklı sayısal arazi modeli kaynaklarının - özellikle 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar ve hava LiDAR verilerinin - orman yolları üzerinde sanat yapısı gereksinimlerinin modellenmesine etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Aynı çalışma alanında her iki veri kaynağından elde edilen SAM'lar kullanılarak oluşturulan havza sınırları, akış yönü ve akış birikimi analizleri üzerinden drenaj sistemleri modellenmiş, bu analizlerin orman yolları ile kesişim noktaları sanat yapısı konumları olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, veri kaynağının mühendislik projelerindeki belirleyiciliğini net şekilde ortaya koymuştur.

Topoğrafik haritalardan türetilen SAM'ların, 10 m aralıklı eş yükselti eğrilerine dayanması nedeniyle, özellikle küçük ölçekli topoğrafik değişimleri yeterli doğrulukta temsil edemediği görülmüştür. Buna karşılık, LiDAR verisi ile oluşturulan yüksek çözünürlüklü SAM'lar (25 cm çözünürlükte), mikrotopoğrafik özellikleri ortaya koyarak sanat yapılarının gerek konumsal gerekse hidrolik hesaplamalar açısından daha güvenilir biçimde modellenmesine imkân tanımıştır. Özellikle sanat yapılarının yer seçimi kadar boyutlandırılmasının da kritik olduğu düşünüldüğünde, LiDAR verisinin sağladığı alan, eğim, havza uzunluğu gibi parametrelerin doğruluğu, yapı çapı ve kesitinin gerçek ihtiyaçlara uygun şekilde hesaplanmasına olanak vermiştir. Bu da hem yapısal güvenlik hem de maliyet verimliliği açısından LiDAR'ın mühendislik projelerine olan katkısını açıkça ortaya koymaktadır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, LiDAR verisinin orman yolları gibi karmaşık ve eğimli arazide sanat yapısı planlaması için sadece bir alternatif değil, aynı zamanda daha yüksek doğrulukta çözüm önerileri sunan bir kaynak olduğunu göstermektedir. Özellikle taşkın riski yüksek, topoğrafik farklılıkların yoğun olduğu orman yollarında LiDAR verisine dayalı modellerle oluşturulan sanat yapısı yerleşimleri daha sık aralıklı ve detaylı çıkmış; bu sayede drenaj sistemlerinin etkinliği artırılmıştır. Bu bulgu, mevcut literatürle de örtüşmekte olup, LiDAR teknolojisinin mühendislik projelerinde karar destek aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, LiDAR tabanlı veri üretimi bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Öncelikle, hava LiDAR sistemlerinin yüksek maliyetli olması ve Türkiye genelinde hâlen yaygın olarak erişilebilir durumda bulunmaması, bu teknolojinin kullanımını sınırlandıran başlıca faktörlerdendir. Ayrıca, LiDAR verisinin işlenmesi süreci, standart CBS uygulamalarına kıyasla daha karmaşık ve uzmanlık gerektiren bir yapıya sahiptir. Veri sınıflandırması, çıplak zemin modelleme, raster üretimi ve doğrulama gibi süreçler yalnızca bu alanda deneyimli kişiler tarafından yürütülebilecek nitelikte olup, LiDAR kullanımının sürdürülebilirliği için kurumsal kapasite ve teknik altyapının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, hava LiDAR teknolojisi, yüksek çözünürlük ve detaylı veri üretimi ile hidrolik sanat yapısı planlamasında büyük avantajlar sunmakta; özellikle havza tabanlı mühendislik çözümlerinin daha güvenilir ve etkili biçimde oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Her ne kadar yaygınlaşması ve kullanım maliyetlerinin düşürülmesi yönünde çeşitli zorluklar olsa da LiDAR verisi ile oluşturulan SAM'lar, özellikle orman yolları, dağlık alanlar ve yoğun bitki örtüsü altındaki topoğrafik yapıların modellenmesinde yüksek doğruluklu sonuçlar vermektedir. Bu yönüyle, topoğrafik haritalara alternatif olmaktan ziyade, hassas mühendislik uygulamaları için tamamlayıcı ve ileri düzey bir çözüm olarak görülmelidir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı iklim, topoğrafya ve zemin türlerinde LiDAR ile geleneksel veri kaynaklarının karşılaştırılması yapılarak, bu teknolojinin saha uygulamalarına entegrasyonu daha da derinleştirilebilir. Ayrıca, LiDAR verilerinin sanat yapılarının tasarımı ve işletme süreçlerinde kullanılması, altyapı projelerinde uzun vadeli performansın artırılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

ArcGIS 10.4

- Açıl, A., 2020. *Orman Yollarında Hidrolik Yapıların HEC-RAS Yazılımı Kullanılarak Boyutlandırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Anderson, J.E., Thompson, C. and Croke, J., 2006. Estimating the accuracy of digital elevation models derived from airborne laser scanning in vegetated catchments. *Geomorphology*, 73(1–2), pp.65–76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.005>
- Akgül, M., Yurtseven, H., Gülci, S. and Akay, A.E., 2018. Evaluation of UAV- and GNSS-based DEMs for earthwork volume. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), pp.1893–1909. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2811-9>
- Ardiansyah, P.O.D. and Yokoyama, R., 2002. DEM generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and a monotone interpolation function. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(2), pp.86–101. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00117-X)
- Ariza-Villaverde, A.B., Jiménez-Hornero, F.J. and De Ravé, E.G., 2015. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: a multifractal analysis. *Geomorphology*, 241, pp.243–254. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.040>
- Aryal, R.R., Latifi, H., Heurich, M. and Hahn, M., 2017. Impact of Slope, Aspect, and Habitat-Type on LiDAR-Derived Digital Terrain Models in a Near Natural, Heterogeneous Temperate Forest. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85, pp.243–255. <https://doi.org/10.1007/s41064-017-0023-2>
- Barnes, R., Lehman, C. and Mulla, D., 2014. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 62, pp.128–135.
- Bayoğlu, S., 1997. *Orman Transport Tesisleri ve Taşıtları (Orman Yolları)*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayın No: 3969/434.
- Bayoğlu, S. and Hasdemir, M., 1991. Orman yollarında tesis edilen küçük hidrolik sanat yapılarının seçimi ve boyutlandırması. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, B41(3–4), pp.17–38.
- Burrough, P.A. and McDonnell, R.A., 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Cook, W.L. Jr. and Hewlett, J.D., 1979. The Broad-Based Dip on Piedmont Woods Roads. *Southern Journal of Applied Forestry*, 3(3), pp.77–81.

- Çalışkan, E. and Acar, H.H., 2003. Orman Yollarında Hidrolik Sanat Yapılarının İncelenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 4(1), pp.137–143.
- Çalışkan, E. and Acar, H.H., 2011. Orman Yollarında Hidrolik Sanat Yapılarının İncelenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 4(1), pp.137–143.
- Çitgez, T., 2011. *Sel ve Taşkın Zararlarının Önlenmesi Üzerine Bir Araştırma: Düzce-Kaynaşlı Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Damian, F., 2003. *Cross-drain Placement to Reduce Sediment Delivery from Forest Roads to Streams*. University of Washington.
- Dávila-Hernández, M.M. *et al.*, 2022. Comparative assessment of DEMs and hydrological conditioning techniques in the derivation of drainage networks and basins. *Water*, 14(15), p.2363.
- Degetto, M., Teatini, P. and Tosi, L., 2015. Hydraulic behaviour of surficial formations from LiDAR-based DEMs: A comparison with topographic maps. *Frontiers in Earth Science*, 3, p.21.
- Demers, M.N., 2008, *Fundamentals of Geographic Information Systems*, 4th ed., Wiley, New York.
- Demir, M., 1996. İ.Ü. Orman Fakültesi Araştırma ve Uygulama Ormanı'nın yol şebekesi ve nakliyat planlamasının yapılması. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 46(A)(2), pp.147–170.
- Demir, M., 1998. Orman yollarında drenaj problemi ve çözüm yolları. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 48(1–4), pp.81–99.
- Demir, S., 2019. *CBS Yardımıyla Orman Yolu ve Sanat Yapılarının Taşkın Riski Açısından Değerlendirilmesi (Artvin Tütüncüler Orman İşletme Şefliği örneği)*. Yüksek Lisans Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Döner, O., 2012. *Orman Yolu Hidrolik Sanat Yapılarının Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Yardımı İle Tespiti ve Boyutlandırılması (Vezirköprü Orman İşletme Müdürlüğüne Sarıçiçek Orman İşletme Şefliği Örneği)*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eck, R.W. and Morgan, P.J., 1987. Culverts Versus Dips in the Appalachian Region: A Performance-Based Decision-Making Guide. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Low-Volume Roads*, 16–20 August, Ithaca, NY. *Transportation Research Record*, 1106(2), pp.330–340.
- Erdaş, O., 1997. *Orman Yolları (Cilt II)*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi Yayın No. 26.
- Esin, A.İ., Akgül, M., Akay, A.O. and Yurtseven, H., 2021. Comparison of LiDAR-based morphometric analysis of a drainage basin with results obtained from UAV, TOPO, ASTER and SRTM-based DEMs. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, p.340. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06705-3>

- Eskandari, S. and Hosseini, S.A., 2013. Assessment of drainage system standards of forest roads in Iran using GIS. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22, pp.675–682.
- ESRI, 2014. *ArcGIS Help Library – Topo to Raster*. Environmental Systems Research Institute. <https://desktop.arcgis.com>
- Fannin, J.R. and Lorbach, J., 2007. Guide to forest road engineering in mountainous terrain. *Forest Harvesting and Engineering Working Paper 2*, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Rome, pp.39–50.
- Foltz, R.B. and Burroughs, E.R., 1990. Sediment production from forest roads with wheel ruts. In: *Watershed Planning and Analysis in Action. Symposium Proceedings of IR Conference, Watershed Management/IR Division/ASCE*, Durango, CO, 9–11 July, pp.266–275.
- Franzinger, K., 2004, Precision and accuracy: Motion System Design talks with industry experts to find out exactly what you need to know about precision and accuracy, *Motion System Design*, 46(9), pp.42–44.
- Garbrecht, J. and Martz, L.W., 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 193(1–4), pp.204–213.
- Gonzales, R., 1998. *Cross Drain Update*. Publication 9877 1804—SDTDC. San Dimas, CA: USDA Forest Service, San Dimas Technology Development Center.
- Görmez, F., 2012. *Orman Yollarında Sanat Yapılarının Planlama ve Yapım Esaslarının İrdelenmesi (Dereköy Orman İşletme Şefliği Örneği)*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gül, A., 1999. *Cross-Drainage & Culvert Design on Highways*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hancock, G.R., Martinez, C., Evans, K.G. and Moliere, D.R., 2006. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, pp.1394–1412. <https://doi.org/10.1002/esp.1335>
- Hans, Z. et al., 2003. *Evaluation of LiDAR for Highway Drainage Analysis*. Iowa State University, Center for Transportation Research and Education.
- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32, pp.1283–1298. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp.275–370.
- Höfle, B. and Rutzinger, M., 2011. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 55(2), pp.1–29. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043>

- Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106, pp.211–232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
- Hutchinson, M.F., Xu, T. and Stein, J.A., 2011. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. *Geomorphometry 2011*, pp.19–22.
- Jain, M.K., Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2006. Evaluation of AMC-dependent SCS-CN-based models using watershed characteristics. *Water Resources Management*, 20(4), pp.531–552.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 2005. *Karayolu Tasarımı El Kitabı*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Keller, G. and Sherar, J., 2003. *Low-volume Roads Engineering—Best Management Practices Field Guide*. USDA Forest Service, Washington, DC.
- Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), p.362.
- Kochenderfer, J.N. and Helvey, J.D., 1987. Using gravel to reduce soil losses from minimum standard forest roads. *Journal of Soil and Water Conservation*, 42, pp.46–50.
- Kızılkaya, T., 1988. *Sulama ve Drenaj*. Ankara: DSİ Yayınları.
- Li, Z., Zhu, Q. and Gold, C., 2004. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. Boca Raton: CRC Press.
- Liu, X., 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), pp.31–49. <https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W., 2015, *Geographic Information Science and Systems*, 4th ed., Wiley, London.
- Ludlow, C.D., 2009. *Flood Modeling in a Data-Poor Region: A Satellite Data-Supported Flood Model for Accra, Ghana*. Master's Thesis, University of Sussex.
- Maidment, D.R., 2002. *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA: ESRI Press.
- Martz, L.W. and Garbrecht, J., 1992. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 18(6), pp.747–761.
- Moussa, R., 2009. Definition of new equivalent indices of Horton-Strahler ratios for the derivation of the geomorphological instantaneous unit hydrograph. *Water Resources Research*, 45.
- Muhadi, N.A.H. *et al.*, 2020. Use of LiDAR-derived DEMs in flood risk mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14), p.2308.
- Murphy, P.N., Ogilvie, J., Meng, F.R. and Arp, P., 2008. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: A comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22(12), pp.1747–1754. <https://doi.org/10.1002/hyp.6770>

- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), pp.323–344.
- OGM, 2008. *Orman Yolları Planlaması, Yapımı ve Bakımı*. Tebliğ No: 292. Ankara: Orman Genel Müdürlüğü.
- Özçelik, N., 1982. *Orman Yolu Sanat Yapıları*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayını No: 323.
- Öztürk, T. and Hasdemir, M., 2021. *Orman Yolları Sanat Yapıları*. Ankara: Gece Kitaplığı. ISBN 978-625-8032-90-1.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), pp.59–79.
- Polat, N. and Uysal, M., 2015. Investigating performance of airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement*, 63, pp.61–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.017>
- Reddy, G.P.O., Maji, A.K. and Gajbhiye, K.S., 2004. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India: A remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1), pp.1–16.
- Sessions, J., 2007. *Forest Road Operations in the Tropics*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Shannon, C.E., 1984. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IEEE*, 72, pp.1192–1201.
- Singh, V.P., 1992. *Elementary Hydrology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, pp.179–182.
- Şen, K. and Aksu, H., 2021. İstanbul için standart süreli gözlenen en büyük yağışların eğilimleri. *Teknik Dergi*, 32(1), pp.10495–10514. <https://doi.org/10.18400/tekderg.647558>
- Sonuç, T., 1977. *Karayolları Tekniği*. İstanbul: Sermet Matbaası.
- Strahler, A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: *Handbook of Applied Hydrology*, Vol. 4-2. New York: McGraw Hill.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), pp.309–319.
- Thomas, J. and Prasannakumar, V., 2015. Morphometric analysis of two major sub-watersheds in Attapady, South India, using ASTER and SRTM DEM and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, pp.10693–10711. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1939-2>
- Turton, D., Anderson, S. and Miller, R., 2009. *Best Management Practices for Forest Road Construction and Harvesting Operations in Oklahoma*. Forestry Extension Report 5, Oklahoma State University, Cooperative Extension Service.

- Vieira, C.A.O., Mather, P.M. and Aplin, P., 2004, Assessing the positional and thematic accuracy of remotely sensed data, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)*, 35(6).
- Wechsler, S.P., 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), pp.1481–1500.
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C., 2000. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Wilson, J.P. and Fotheringham, A.S., 2008. *The Handbook of Geographic Information Science*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Wu, M., Shi, P., Chen, A., Shen, C. and Wang, P., 2017. Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT. *Water SA*, 43, pp.450–462. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i3.10>
- Yayla, N., 2018. *Karayolu Mühendisliği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Zhang, H. and Huang, G., 2009. Building channel networks for flat regions in digital elevation models. *Hydrological Processes*, 23(20), pp.2879–2887.
- Zhang, H., Yao, Z., Yang, Q., Li, S., Baartman, J.E., Gai, L., and Geissen, V., 2017. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. *Catena*, 151, pp.174–181.
- Zhao, G., Gao, J. and Masser, I., 2010. The impacts of DEM resolution on hydrologic modeling: A case study using SWAT model. *Water Resources Management*, 24, pp.1085–1101.
- Zwirn, M., 2002. *Culvert Installation in Salmon Streams: Forest Road Construction and Culvert Installations in Salmon Streams – Best Management Practices and Lessons for the Samarga Watershed*.