



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL TIP FAKÜLTESİ
SUALTI HEKİMLİĞİ VE HİPERBARİK TIP ANABİLİM DALI

Dalış Sağlığı Açısından Bozukkale Sualtı Arkeolojisi Kazısı

(Uzmanlık Tezi)

Dr. Selahattin Çakıroğlu

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Akın Savaş Toklu

İstanbul

2022



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
İSTANBUL TIP FAKÜLTESİ
SUALTI HEKİMLİĞİ VE HİPERBARİK TIP ANABİLİM DALI

Dalış Sağlığı Açısından Bozukkale Sualtı Arkeolojisi Kazısı

(Uzmanlık Tezi)

Dr. Selahattin Çakıroğlu

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Akın Savaş Toklu

İstanbul

2022

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmalarım süresince desteğini ve vaktini hiç esirgemeyen, her türlü bilgi ve tecrübesini bizlerle paylaşan, bizlere sunduğu olanaklar ve deneyimlerle hiç unutmayacağım asistanlık sürecime katkısı olan tez danışmanım Prof. Dr. Akın Savaş Toklu'ya çok teşekkür ederim.

Engin bilgi ve tecrübeleriyle bize her eğitimde yeni bir bakış açısı kazandıran, asistanlık eğitimimize göstermiş olduğu özveri sayesinde uzmanlık unvanı almamızda emeği büyük olan, akademik yönümüzün gelişmesine katkı sağlayan Prof. Dr. Şamil Aktaş'a çok teşekkür ederim.

Klinik bakış açısı ve tecrübeleriyle hem klinikteki hem de sahadaki deneyimlerini bizlerle paylaşan, her sorumuzda bilgilerini bize esirgmeden ileten Prof. Dr. Salih Aydın'a çok teşekkür ederim.

Uzun yıllar kliniğe emek harcayan, tecrübelerini ve tüm bilgilerini asistanlık sürecimizin en başından beri bizimle paylaşan, en yoğun zamanında bile bizlere vaktini ayıran ve hiçbir yardımı esirgemeyen, tıp eğitiminin olmazsa olmazı usta çırak ilişkisi sayesinde kendisinden çok şey öğrendiğim Doç. Dr. Bengüsu Mirasoğlu'na çok teşekkür ederim.

Birlikte çalışmaktan çok mutlu olduğum ve en zor zamanlarımda benden desteklerini hiç esirgemeyen değerli asistan arkadaşlarımdan hepsine, eğitimimiz süresince bana kattıkları için çok teşekkür ederim.

Değerli hemşire arkadaşlarım, anabilim dalı sekreterimiz Sevgi abla ve tüm personel arkadaşlarıma her yardıma ihtiyacım olduğunda yanımda oldukları için sonsuz teşekkür ederim.

4 yıl boyunca, tezim süresince ve öncesinde sahada gerek tezim için gerekse dalış tecrübeleri açısından bana sonsuz yardımları dokunan, başta Doç. Dr. Harun Özdaş olmak üzere tüm Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman desteklerini arkamda hissettiğim, beni hiçbir anımda yalnız bırakmayan, beni sevmekten ve bana inanmaktan asla vazgeçmeyen değerli aileme ve tanıdığım günden beri her an yanımda olan Buse Çelikten'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT	2
I. GİRİŞ	3
II. GENEL BİLGİLER	5
A. SUALTI ARKEOLOJİSİ	5
B. DALIŞ FİZİK ve FİZYOLOJİSİ	6
1. Basınç ve Hacim	6
2. Sıcaklık ve Hacim	7
3. Gaz Karışımlarında Kısmi Basınçlar	7
4. Sıvılarda Gaz Çözeltisi.....	7
5. Dalışta Solunan Gazlar	8
C. DİSBARİK HASTALIKLAR	9
1. Pulmoner Barotravmalar	9
2. Kulak Barotravmaları	10
3. Sinüs Barotravmaları.....	11
4. Diş Barotravmaları	12
5. Gastrointestinal Sistem Barotravmaları	12
6. Ekipman Barotravmaları	12
D. GAZLARIN KISMİ BASINCININ ARTMASINA BAĞLI SORUNLAR	12
1. İnert Gaz Narkozu	12
2. Oksijen Toksisitesi	13
3. Solunum Gazı Kontaminasyonu	14
E. DEKOMPRESYON HASTALIĞI	15
1. Patofizyoloji	15

2. Klinik Bulgular.....	18
F. KABARCIK TESPİT METODLARI ve ULTRASON TEKNOLOJİSİ.....	19
III. GEREÇ VE YÖNTEMLER	23
IV. AMAÇLAR.....	30
V. BULGULAR.....	31
A. DALGIÇLAR ve DALIŞ SAĞLIĞI İLE İLGİLİ BULGULAR	31
B. DOPPLER İLE KABARCIK TESPİTİ.....	31
VI. TARTIŞMA	42
VII. SONUÇ.....	51
VIII. KAYNAKLAR	52
EKLER.....	58
Ek 1. Etik Kurul Onayı.....	58

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Derinlik, basınç ve hacim ilişkisi

Tablo 2. Avrupa Standardı EN12021:2014'e göre hava saflık standartları

Tablo 3. Dalış sonrası kabarcık derecelendirmesi için Spencer skalası

Tablo 4. 2019 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

Tablo 5. 2020 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

Tablo 6. 2021 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

Tablo 7. 2019 ve 2021 yıllarında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalış detayları (kişilerin gün içindeki ikinci dalışları koyu renkle gösterilmiştir)

Tablo 8. Oksijen ile yapılan deko sürelerinin hava ile yapılması halinde, örnek iki ilk dalış ve iki ikinci (mükerrer) dalış üzerinden karşılaştırılması

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Kompresör ve doldurulan tüp

Şekil 2. Örnek dalış profilleri

Şekil 3. 6 m'deki dekompresyon durağı

Şekil 4. Oksijen tüpü ve dekompresyon durağına sarkıtılan regülatörler

Şekil 5. İstirahat ve hafif egzersiz sonrası ölçümler

Şekil 6. Dalış sağlığı ile ilgili eğitim



GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 1. 2019 yılında yapılan Doppler kayıtlarının değerlendirilebilme oranı

Grafik 2. 2019 yılı Doppler kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı

Grafik 3. Değerlendirilebilen 74 kayıttan kabarcık bulunanların oranı

Grafik 4. 2019 yılında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara ve gün içinde hangi dalışta tespit edildiklerine göre dağılımı

Grafik 5. 2021 yılında yapılan Doppler kayıtlarının değerlendirilebilme oranı

Grafik 6. 2021 yılı Doppler kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı

Grafik 7. Değerlendirilebilen 119 kayıttan kabarcık bulunanların oranı.

Grafik 8. 2021 yılında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara ve gün içinde hangi dalışta tespit edildiklerine göre dağılımı.

KISALTMALAR LİSTESİ

SCUBA	: Self Contained Underwater Breathing Apparatus
DEÜ	: Dokuz Eylül Üniversitesi
INA	: The Institute of Nautical Archaeology
Atm	: Atmosfer
ATA	: Atmosfer absolute
AGE	: Arteriyel gaz embolisi
İGN	: İnert gaz narkozu
MSS	: Merkezi sinir sistemi
FVC	: Zorlu vital kapasite
CO	: Karbonmonoksit
N₂O	: Nitröz oksit
VGE	: Venöz gaz embolisi
PFO	: Patent foramen ovale
MRG	: Manyetik rezonans görüntüleme
BT	: Bilgisayarlı tomografi
MHz	: Mega-Hertz
TI	: Termal indeks
MI	: Mekanik indeks
KM	: Kısmen-Masurel
VKİ	: Vücut kitle indeksi
DAN	: Divers Alert Network

ÖZET

Dalış Sağlığı Açısından Bozukkale Sualtı Arkeolojisi Kazısı

Amaç: Bu çalışmada Bozukkale sualtı arkeolojisi kazısı çalışmalarından elde edilen verileri dalış sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirmek ve literatürdeki benzer çalışmalarda sahada sualtı hekiminin varlığının önemini gözden geçirmek amaçlanmıştır.

Gereç ve Yöntemler: Araştırma, Bozukkale sualtı arkeolojisi kazısı çalışmalarından veri toplayarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirilen veriler 2019'un Eylül ayında 24 gün, 2020'nin Ekim ayında 7 gün ve 2021'in Eylül ayında 14 gün süreyle dalış bölgesinde toplanmıştır. Toplanan veriler arasında dalgıçların demografik bilgileri, dalış tecrübeleri, vücut kitle indeksi, dalış kayıtları, dalış sonrası Doppler kayıtları, kullanılan dalış profili ve ekipmanları, dalışa bağlı yaşanan sağlık sorunlarının kaydı yer almaktadır.

Bulgular: 2019-2021 Bozukkale sualtı kazısı çalışmalarında 13 dalgıcın dalışları incelenmiş ve toplam 564 dalış izlenmiştir. Çalışmadaki 13 dalgıcın yaşları 23 ila 57 arasında (39.9 ± 12), vücut kitle indeksi ise 19.6 ile 32.3 arasında değişmekte idi (25.3 ± 3.7). Dalışlar 30-42 m derinliğe ve 20 dk sabit dip zamanı ile gerçekleştirilmiştir. Dipte sabit noktada yapılan iş nedeni ile kare dalış profilleri sergilenmiştir. Dekompresyon durakları 6 m'de kurulan düzenek üzerinde oksijenle yapılmıştır. Çalışma boyunca dekompresyon hastalığına rastlanmamış olup sadece 1 dalgıçta orta kulak barotravması görülmüştür. Çalışma boyunca kaydedilen toplam 365 Doppler kaydının 193'ü değerlendirilebilir kalitede gerçekleştirilmiştir. Kayıtların 15'inde kabarcık sinyalleri tespit edilmiş ve tamamı Spencer skalasına göre derece 1 olarak sınıflandırılmıştır.

Sonuç: Dekompresyonlu dalışlarla gerçekleştirilen Bozukkale sualtı kazısında, sahada sualtı hekimlerinin varlığı çalışmaları dalış sağlığı açısından daha güvenli kılmış, dalgıçlar kendilerini daha güvende hissetmişlerdir. Kazı süresince dekompresyon hastalığı görülmemesi ve dekompresyon stresi göstergesi olabilecek Venöz Gaz Embolisi (VGE) derecelerinin oldukça düşük olması, dalış profillerinin güvenli olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Uygun dalış ve deniz koşullarında dekompresyon duraklarında uygulanan oksijen dekompresyonunun dekompresyon stresini azaltarak daha düşük derecelerde VGE oluşmasına ve dekompreyon hastalığı riskinin azalmasına katkı sağladığı düşünülmüştür.

ABSTRACT

Bozukkale Underwater Archeology Excavation in terms of Diving Health

Objective: In this study, it is aimed to evaluate the data obtained from Bozukkale underwater archeology excavations in terms of diving health and safety, and to review the importance of the presence of a diving physician in the field based on the similar studies in the literature.

Material and Methods: The research was conducted by collecting data from Bozukkale excavation. Evaluated data were collected at the dive site for 24 days in September 2019, 7 days in October 2020 and 14 days in September 2021. The collected data includes demographic information, diving experience, body mass index, dive profiles, Doppler records, diving equipment and recording of dive-related health problems.

Results: During the 2019-2021 Bozukkale excavations, 13 divers were examined and a total of 564 dives were observed. The age of the divers ranged from 23 to 57 (39.9 ± 12), and their body mass index ranged between 19.6 and 32.3 (25.3 ± 3.7). The dives were performed at a depth of 30-42 m and a fixed bottom time of 20 minutes. Square dive profiles were performed due to the work done at the fixed point at the bottom. Decompression stops were done by breathing oxygen on the setup at 6 m. No signs of decompression sickness were encountered during the study, and middle ear barotrauma was observed in only 1 diver. A total of 365 Doppler recordings were taken throughout the study, and 193 of them were of evaluable quality. Bubble signals were detected in 15 of the recordings and all were classified as grade 1 according to the Spencer scale.

Conclusion: In Bozukkale excavation, which was carried out by dives with decompression stops, the presence of diving physicians at dive site made the divers feel safe and the dives were safer in terms of diving health. The fact that there was no decompression sickness during the excavation and the noticeably low VGE degrees, which could be an indicator of decompression stress, were considered as a result of safer dive profile. It is thought that oxygen breathing at decompression stops in suitable diving and sea conditions contributes to the formation of lower degrees of VGE by reducing the decompression stress and reducing the risk of decompression sickness.

I. GİRİŞ

Dalış operasyonları, su altında belli süreler geçirmeyi gerektirmektedir ve bu operasyonlar dalış ortamının doğası gereği belli riskler içermektedir. Bu riskler başlıca, basınç ve solunan gaz ile ilişkili hastalıkların görülmesidir. Bu nedenle belirli sualtı çalışmalarına sualtı hekimleri de eşlik etmektedir. Bu çalışmalar bilimsel amaçlı ya da ticari amaçlı olabilir. Ticari amaçlı dalışlarda dalışa bağlı hastalıklar daha sık izlenmekle birlikte bilimsel amaçlı yapılan dalışların profilleri de riskler içerebilmektedir. Bilimsel amaçlı dalışlarda alınan önlemler sayesinde dalış hastalığı ve kazalarının görülme sıklığı daha düşük izlenmektedir (1, 2).

Bilimsel amaçlı dalışları da içeren sualtı arkeolojisi, 1867'de ilk olarak karada keşfedilen gemi batıklarıyla başlamıştır. Kaptan Jacques-Yves Cousteau ve Emile Gagnan tarafından 1942'de icat edilen SCUBA (Self Contained Underwater Breathing Apparatus) dalış teknolojisinin ortaya çıkmasından sonra, su altında çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak çalışmaların su altındaki kısmına arkeologların kendisinden ziyade, çoğunlukla ticari sünger dalgıçları veya rekreasyonel dalgıçlar katılmıştır. Türkiye'de de Bodrum bölgesindeki yerel sünger dalgıçları su altında birçok eser gözlemlemiştir. 1958'de San Francisco Denizcilik Müzesi'nin Küratör Yardımcısı Peter Throckmorton, eski bir gemi enkazı alanını bulmak umuduyla Türkiye'ye gelmiştir. Kendisinden önceki birçokları gibi, yerel sünger dalgıçlarından, Türkiye'nin güney kıyısındaki Gelidonya Burnu açıklarında bir dizi kırık nesnenin ele geçirildiği bir enkazın yerini öğrenmiştir. 1960'ta Throckmorton, deneyimli dalgıç Frederick Dumas ve ilk açık deniz dalışlarını yapmaya hevesli genç bir arkeolog olan George Bass ile geri dönmüştür. Bass, dalış programının arkeolojik yönlerinden sorumluyken, bu ekip literatürde ilk kez gerçek arkeolojik haritalama ve örnekleme protokolü oluşturmaya başlamıştır. Böylece sualtı arkeolojisinin temelleri, Türkiye'nin güney kıyılarında 1961-1964 yılları arasında Yassıada kazısının gerçekleştirilmesiyle atılmıştır (3). Bu tez çalışmasına konu olan Bozukkale sualtı kazısı 2017 yılından bu yana Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü tarafından gerçekleştirilmektedir. Kazı için 2017 yılından günümüze kadar 1500 civarında dalış gerçekleştirilmiştir. Batık alanı Bozburun mevkiinde, Akdeniz'de antik dönem deniz ticaretinin en önemli geçiş bölgesi olan Rodos kanalında, 30 ila 47 metreler arasında bulunmaktadır. Söz konusu batık DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne bağlı K. Piri Reis Araştırma Gemisi ile Türkiye Batık Envanteri Projesi kapsamında yürütülen arkeolojik sualtı araştırmaları sırasında 2013 yılında keşfedilmiştir (4).

Sualtı arkeolojisi disiplininde yapılan bilimsel amaçlı dalışlarda ortak endişe, dekompresyon hastalığı ve dalışa bağlı görülebilecek diğer klinik durumlardır. Bozukkale sualtı kazısına katılmak üzere İ. Ü. İstanbul Tıp Fakültesi, Sualtı Hekimliği ve Hiperbarik Tıp AD'dan her yıl hekim talep edilmektedir. Görevlendirilen hekim her yıl çalışmalar başlamadan önce genel dalış tıbbi hakkında eğitimler vermekte, dalışa bağlı hastalıklarda veya ilk yardım gerektirebilecek diğer klinik durumlarda acil müdahalelerin yapılması için de dalış destek gemisinde dalgıçların yanında bulunmaktadır. Hekim, olası ilk yardım ve dalışa bağlı hastalıklara müdahalelerde gerekebilecek tıbbi araç ve gereçleri içeren acil çantasını da gemide hazır bulundurmaktadır. Ayrıca gerekli olması halinde en yakın basınç odasına dalgıç nakli için hazırlıklar ve gerekli ön görüşmeler yapılmakta böylece dalışların daha güvenli bir ortam ve koşullarda gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Dalışlarda oksijen dekompresyonu uygulanarak inert gaz atımının hızlandırılması ve dekompresyon stresinin azaltılması amaçlanmıştır.

Dekompresyon hastalığının altta yatan nedeni olarak kabarcıkların önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Günümüz teknolojisiyle yaygın olarak kullanılan ultrason cihazları, dekompresyon sonrası gelişen bu kabarcıkları tespit etme yöntemidir. Bu yöntem dekompresyon hastalığı için tanısal değildir ancak kabarcık tespiti için oldukça duyarlıdır. Dekompresyon stresini ölçen bu yöntem ile dalgıçlarla sahada birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar oldukça zaman alıcı ve saha ortamının şartları gereği zorlayıcıdır. Bununla birlikte bu çalışmalardan elde edilen verilerin kullanılabilmesi için standardizasyon ve çalışmanın nasıl yapıldığına dair detaylı tanımlamalar gerekir (5).

Bu çalışmada 2019-2021 yıllarında Bozukkale sualtı kazısı çalışmaları incelenerek sualtı hekiminin dalış bölgesindeki varlığının dalış sağlığı açısından önemi değerlendirilmiştir. Çalışmada arkeolojik kazı süresince olası dalış kazası ve hastalıklarının kaydedilmesi amaçlanmıştır.

II. GENEL BİLGİLER

A. SUALTI ARKEOLOJİSİ

Denizlerde insan faaliyetlerinin maddi kalıntılarının incelenmesini amaçlayan sualtı arkeolojisi temel olarak gemi batıklarına odaklanmıştır. Sualtı arkeolojisinin temellerinin atıldığı Yassıada batığı kazısının ardından George Bass'ın ekibi, Michael Katzev tarafından yönetilen başka bir batığın kazısını gerçekleştirmişlerdir. Girne yakınlarında MÖ 4. yüzyıla ait bu batığın kapsamlı kazısı 1967-69 yılları arasında gerçekleştirilmiştir ve geminin korunmuş gövde yapısı bütün olarak çıkarılmıştır. Bu öncü sualtı kazı çalışmalarının ardından dünya çapında çok sayıda sualtı arkeolojisi programı açılmaya başlamıştır (3, 6).

Halihazırda Batı Avrupa açıkları ve Akdeniz, sualtı arkeolojisi faaliyetlerinin güçlü bir odak noktası olmaya devam etmektedir. INA (The Institute of Nautical Archaeology) tarafından Bodrum'da kurulan Bodrum Araştırma Merkezi, ülkemizin güney kıyılarında çok sayıda sualtı araştırma projesi sürdürmüştür. Bunlardan biri olan geç Tunç Çağı Uluburun Batığı'nın kazısı Kaş'ta 1984-1994 yılları arasında gerçekleştirilmiş ve değerli bilgiler sağlayan binlerce eserin kurtarılmasını sağlamıştır. Uluburun Batığı'nın çalışmaları sırasında 45 metreyi aşan derinliklere 22.000'den fazla dalış gerçekleştirilmiştir. Serçe Limanı Gemi Batığı Kazısı ise Rodos'un kuzeyinde, Türkiye'nin güney sahilinde doğal bir liman olan Serçe Limanı konumunda gerçekleşmiştir. Bulunan birçok cam eşya kalıntısı nedeniyle Bizans Cam Batığı olarak adlandırılmıştır. Kazı, yine Bass tarafından 1977-79 yılları arasında gerçekleştirilmiştir (3).

Türkiye güney kıyılarında günümüzde devam eden sualtı kazıları Muğla, Antalya ve Mersin il sınırları içerisinde yapılmaktadır. Bunlardan biri olan Bozukkale Batığı, Muğla'nın Marmaris ilçesi, Bozburun konumunda, Akdeniz'de antik dönem deniz ticaretinin en önemli geçiş bölgesi olan Rodos kanalında bulunmaktadır. İlk tespitlere göre batık geminin Kıbrıs kökenli olduğu düşünülmüş ve batık gemi MÖ 7. yüzyılın sonu 6. yüzyılın başına tarihlendirilmiştir. 30 ila 47 metre derinliklerdeki batıktan çıkarılan çeşitli eserler arasında olan sunu heykelleri, batığın en önemli eserleri olarak görülmektedir. Bunlar, sualtında bilinen ilk ve tek pişmiş toprak – kireçtaşı heykel topluluğu olarak bilinmektedir (4). Önemi, batıktan çıkan eserlerle gün geçtikçe artan bu kazının çalışmaları ise gelecek yıllarda daha derin kısımlarda sürdürülecektir.

B. DALIŞ FİZİK ve FİZYOLOJİSİ

1. Basınç ve Hacim

Dünya yüzeyinde atmosfer tarafından uygulanan bir basınç mevcuttur. Buna atmosferik veya barometrik basınç denir. Deniz seviyesinde bu basınç 1 atmosferdir ve ATM olarak kısaltılır. Bu basınç, deniz seviyesinden yükseldikçe atmosfer tabakası inceleceğinden azalır. Su altına indikçe de atmosferik basınca ek olarak su kütesinin yaptığı basıncın eklenmesi ile artar. Örneğin 10 metre derinlikte basınç 2 ATA iken 5000 metre civarı irtifada yaklaşık 0.5 ATA'dır (**Tablo 1**).

Dalış tıbbının önemli unsurlarından biri basınç ile hacim arasındaki ilişkidir. Sabit sıcaklıkta atmosferik basınç arttıkça hacim de ters orantılı şekilde azalmaktadır. Bu Boyle Gaz Kanunu ile açıklanmaktadır (**Tablo 1**).

Derinlik (m)	Basınç (ATA)	Hacim (L)
≈ -5000	0.5	2
0	1	1
10	2	0.5
20	3	0.33

Tablo 1. Derinlik, basınç ve hacim ilişkisi

İnsan vücudunda fizyolojik olarak hava boşluğu içeren organlar; akciğerler, paranasal sinüsler, orta kulak ve gastrointestinal sistemdir. Basınç-hacim arasındaki bu ilişki nedeniyle insan vücudundaki boşluklarda barotravmalar görülebilmektedir. Ayrıca unutulmamalıdır ki oransal olarak en büyük hacim değişikliği yüzeye yaklaştıkça, ilk 10 metre derinliklerde gerçekleşmektedir.

Basınç altında solunan havanın yoğunluğu artmaktadır. Böylece derinlik arttıkça her inspiryumda harcanan efor da artmaktadır. Bu sebeple su altında yapılan işlerde solunum iş yükü atmakta ve fazladan harcanan efor dalgıcın erken yorulmasına yol açmaktadır (7).

2. Sıcaklık ve Hacim

Charles Gaz Kanununa göre eğer basınç sabit ise gazın hacmi ile mutlak sıcaklığı doğru orantılıdır. Boyle ve Charles Gaz Kanunları bir matematik formülü üzerinde birleştirildiğinde aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

$$P_1 \times V_1/T_1 = P_2 \times V_2/T_2$$

Gay-Lussac yasası belirli bir miktardaki ideal gazın basıncının, kelvin birimiyle belirtilmiş sıcaklığına doğru orantılı olduğunu gösterir. Uygulamada bu kuralın önemi bir örnek ile gösterilebilir. Dalgıç, tüpünü kompresör aracılığı ile doldurduğunda tüpün sıcaklığı artar. Böylece sabit hacimde ve artmış sıcaklıktaki tüp basıncı, ortam sıcaklığında olduğundan daha yüksek bir basınç gösterir. Tüp tekrar ortam sıcaklığına düştüğünde, ya da dalış esnasında daha soğuk ortama girdiğinde basınç da düşecektir (7).

3. Gaz Karışımlarında Kısmi Basınçlar

Dalton Gaz Kanununa göre bir gaz karışımı tarafından uygulanan toplam basınç, karışımı oluşturan her bir farklı gazın oluşturduğu basınçların toplamına eşittir. Havada yaklaşık olarak %80 nitrojen ve %20 oksijen bulunmaktadır. Bunların kısmi basınçları ise sırasıyla 0.8 ve 0.2 atmosferik basınç (atm) olmaktadır.

Havadaki gazların kısmi basınçları değiştirilerek, örneğin nitrojenin kısmi basıncı azaltılıp, oksijeninki arttırılır ise dekompresyon hastalığı riski düşürülebilir. İstenmeyen durum olarak karbondioksit ve karbonmonoksit gibi gazların da kısmi basıncının artmasıyla toksik etkiler görülebilir (7).

4. Sıvılarda Gaz Çözeltisi

Henry Gaz Kanununa göre sabit sıcaklıktaki bir sıvının içerisinde çözünecek gazın miktarı, o gazın kısmi basıncı ve o sıvı içerisindeki çözünürlüğü ile doğru orantılıdır. Bu kanuna göre tüm gazlar, temas halinde bulunduğu çözelti içinde dengeye erişir. İnsan vücudu, deniz seviyesinde yaklaşık 1 litre gaz halinde nitrojen içerir. Su altında basınçlı hava solunmasıyla nitrojen kısmi basıncı artar ve nitrojen dokularda daha fazla çözünmeye başlar. Yeterli süre tanındığında ve

herhangi bir inert gazın bu şekilde kısmi basıncının arttığı durumlarda, inert gaz vücuttaki dokularda doygunluğa ulaşır. Toplam basınç veya gazın kısmi basıncı düştüğünde olay tersine döner ve gaz çözültiden ayrılır. Eğer hızlı bir basınç düşüşü gerçekleşirse bir doku, çözültide çevre basıncına uygun olarak tutabileceğinden daha fazla gaz içerebilir. Süpersatürasyon ya da aşırı doygunluk olarak adlandırılan bu durumda kabarcıklar oluşabilir ve dekompresyon hastalığı bulguları ortaya çıkabilir.

Gazların çözünürlüğünün fizyolojik etkileri, nitrojen narkozu ve oksijen toksisitesiyle de ilgilidir (7). Bu konular ayrı bir başlık altında ileride incelenmiştir.

5. Dalışta Solunan Gazlar

Dalışların çoğu, basınçlı havanın ve diğer oksijen-nitrojen karışımlarının solunum gazı olarak kullanımına dayanır. Ticari, askeri, teknik ve bilimsel dalışlar hava dışında diğer gaz karışımlarının kullanımını içerebilir.

a) Oksijen

Dalışta hipoksi semptomlarından kaçınmak için solunum gazı içinde oksijenin kısmi basıncı 0.2 ATA civarında olmalıdır. Daha yüksek kısmi basınçlarda oksijen solunma süresine de bağlı olarak toksik etkiye neden olabilir. 0.55 ATA kısmi basınçta uzun süre maruziyet pulmoner oksijen toksisitesine yol açabiliyorken, 1.5 ATA ve daha yüksek kısmi basınçlarda daha kısa sürelerde merkezi sinir sistemi toksisitesine yol açabilir. Ancak basınç odalarında ortamın sualtı ortamından farklı olduğu da dikkate alınarak mevcut riskler kabul edilip 2.8 ATA kısmi basınca kadar oksijen solutulabilmektedir (7).

b) Nitrojen

Nitrojen fizyolojik olarak inert bir gazdır. Dalışların büyük bir bölümünde hava solunur ve bazı dalışlardan sonra nitrojenden oluşan kabarcıklar, dalışın dekompresyon fazında hızlı çıkış sonrası dekompresyon hastalığına neden olabilir. Tam tersine dalışın kompresyon fazında ise nitrojen narkozuna neden olabilir. Nitrojen narkozu, yaklaşık 3 ATA üzeri kısmi basınçlarda dalgıç performansında gözle görülür düşümlere sebep olabilmektedir. Nitrojenin solunum gazı olarak kullanılmasını sınırlayan diğer bir etken ise artan basınçtaki yoğunluğu nedeniyle inspiyumu zorlaştırmasıdır (7).

c) Helyum

Helyum da inert bir gaz olup atom ağırlığı dört olan yoğunluğu düşük bir gazdır. 50 metreden derinlerde, havanın kullanılmadığı dalışlarda, oksijeni seyreltmek için kullanılır. İki büyük

avantajı, hafif olduğu için inspiyumdaki eforu azaltır ve narkotik etkileri yok denecek kadar azdır. Ayrıca nitrojenden daha kolay difüzyona uğrayabildiği için hava ile yapılan dalışlara kıyasla dekompresyon süresini kısaltabilir.

Helyumun konuşma bozukluğuna yol açması, ısı transferinin hızlı olması nedeniyle dalgıçta hipotermi sorunlarına yol açması ve maliyetinin yüksek olması dezavantajlarıdır. Ayrıca helyum kullanılan karışım gaz dalışları 150 metre ve daha derinlere yapıldığında yüksek basınç sinirsel sendromu görülebilir (7). Ancak yüksek basınç sinirsel sendromunda, solunan gazlar kendi başlarına birincil sebep değildir.

d) Hidrojen

Hidrojen maliyeti düşük ve kolay temin edilen bir gazdır. Yoğunluğunun düşük olması nedeniyle solunması en kolay gazdır. Ancak kolay kullanılamamasının sebebi %4 üzerindeki oksijen seviyesinde patlamalara yol açabilmesidir (7).

C. DİSBARİK HASTALIKLAR

1. Pulmoner Barotravmalar

Basıncı hava soluyan dalgıçlarda, dalışın dekompresyon fazında azalan çevre basıncı ile akciğerlerdeki havanın genişlemesi akciğer dokusunun aşırı distansiyonundan ve rüptüründen, soluk tutarak yapılan serbest dalışlarda ise inişte artan çevre basıncı ile akciğerlerdeki havanın sıkışmasından kaynaklanır. Bu durum Boyle Gaz Kanununun klinik bulgusudur. Kadavra çalışmalarında, patofizyolojide aşırı distansiyonun yanı sıra akciğer dokusuna zarar verebilecek bir transmural basınç farkı gelişimine de bağlı olduğu gösterilmiştir. Total akciğer kapasitesine yakın bir hacimden 70-80 mm Hg'lık transmural basınç farkıyla sudan çıkmak barotravma geçirmek için yeterli olabilmektedir. Bu basınç farkı da yaklaşık 1 metre derinliğe denk gelmektedir (8, 9).

Alveollerin ve yakınındaki kılcal damarların hasar görmesiyle vasküler yapı içerisine ya da akciğer interstisyumuna gaz kabarcıkları girebilir. Arteriyel dolaşıma gaz kabarcığı girmesi 'arteriyel gaz embolisi'ne (AGE), interstisyuma kaçış ile de akciğer hilusuna ilerleyebilir. Hilustan mediastene girmesi 'mediastinal amfizem'e yol açar. Mediastenden trakea boyunca ilerleyerek boyun tabanında deri altına uzanabilir ve böylece 'subkütanöz amfizem' ortaya çıkabilir. Viseral

plevraya komşu alveol rüptürü olması halinde alveol dışına çıkan gaz, plevral boşluğa girebilir ve pnömotoraks oluşturabilir.

Alveol rüptürü sonucu arteriyel dolaşıma giren kabarcıklar, kan akışı ile hareket etme eğilimindedir. Dolayısıyla kalp debisinin önemli bir bölümünü alan beyin, etkilenmesi en olası organdır. Hipoksiye duyarlı olan beynin etkilenmesi sonucu ani başlayan bilinç kaybı ve/veya multifokal inme benzeri olaylar ortaya çıkabilir. Bu semptomların ortaya çıkması noktasında kabarcık davranışı, kabarcıkların boyutlarından etkilenir. Arteriolü kaplayacak kadar büyük kabarcıklar oklüzyona sebep olabilirken küçük kabarcıklar minimal obstrüksiyonlara sebep olabilir. Ancak küçük kabarcıklar, mikrosirkülasyon yolu ile tekrar yerinden oynayabilir. Kabarcıkların tekrar yer değiştirmesiyle mevcut endotel hasarının artması söz konusu olabilir. Kabarcıkların sonradan dağılmasıyla inflamatuvar sekel olarak adlandırılan durum ortaya çıkabilir. AGE’de ilk semptomlardaki iyileşmeden sonra görülen kötüleşmenin bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir (10). Ayrıca kabarcıklar beyin dışındaki organlara da zarar verebilmektedir. Büyük miktarda kabarcık, kardiyak arrest yapabildiği gibi böbrek ve karaciğer olmak üzere diğer organlarda da etkileri olabilmektedir (8).

2. Kulak Barotravmaları

Kulak barotravmaları; iç kulak, orta kulak ve dış kulak yolunda gözlenebilir. İniş barotravmaları, kulak boşluklarındaki basıncı dış ortam basıncına eşitleyememekten kaynaklanır. Çıkış barotravmaları ise genişleyen havanın kapalı alanda çevreye uyguladığı bası sonucu oluşur.

Dış kulak barotravmaları, dış kulak yolunda bir hava hapsi oluşturulursa gerçekleşebilir. Bunun sebebi dalgıcın kendi yerleştirdiği kulak tıkaçları, sıkı dalış elbisesi başlığı, dalış maskesi kayışı ya da dış kulak yolunda buşon varlığı olabilir. Klinik bulgu olarak dış kulak yolunda hemoraji ve lokal konjesyon görülebilir.

Orta kulak iniş barotravmaları dalgıçların karşılaştığı en yaygın tıbbi sorundur. Orta kulaktaki basıncın östaki tüpü aracılığıyla dış ortamla eşitlenememesi sonucu ortaya çıkar. Farinks ve orta kulak boşluğu arasındaki basınç farkı 10 ila 30 mm Hg’ye ulaştığında östaki tüpleri açılabilir. Bu da 25 cm’lik bir derinliğe karşılık gelir. 2 metre derinlik veya 150 mm Hg basınç farkında kulakta rahatsızlık hissi ve ağrı ortaya çıkabilir (11). Bu durum esneme, çeneyi hareket ettirme, yutma ile giderilebilir. Daha sık önerilen diğer bir yöntem Valsalva manevrasıdır. Bu yöntem, orta kulak boşluğuna istemli olarak hava gönderme işlemidir. Derinlere inildikçe bu

manevrayı yapma ihtiyacı azalır çünkü hacim değişimi en fazla sığ derinliklerde olur. Bu sebeple de barotravmalar en sık ilk on metrede izlenir.

Dalgıç dibe kulak eşitleme yapmadan iniyorsa orta kulak boşluğunda mukozal konjesyon, ödem ve hemoraji görünmeye başlar. Timpanik membran içe doğru bombeleşir ve içeride sıkışan gazı bir miktar telafi eder. Ancak timpanik membran giderek hemorajik olmaya başlar. Basınç farkının daha da artması halinde rüptür izlenebilir. Eşitleme yapılamamasının iki majör nedeni, üst solunum yollarında östaki tüpünü tıkayan herhangi bir patoloji veya yetersiz kulak eşitleme yapılmasıdır.

Orta kulak çıkış barotravmasında ise östaki tüpünün tıkanmasına bağlı havanın dışa salınımı kısıtlanır. Basınç hissi, ağrı ve artan basınç farkından kaynaklanan baş dönmesi (alternobarik vertigo) eşlik edebilir. Sıklıkla orta kulak iniş barotravmasını takiben oluşur. Semptomlar çoğunlukla saniyeler içinde sürüp geçer ancak nadiren iç kulak hasarına yol açabilir.

İç kulak barotravması daha ciddi bir klinik durumdur ve en sık nedeni orta kulak barotravmasıdır. Genellikle kulak eşitleme problemleri yaşayan dalgıçlarda görülür. Bu dalgıçlarda sıklıkla sensörinöral işitme kaybı eşlik eder. Ayrıca tinnitus ve vertigo da sıktır. İç kulak dekompresyon hastalığında da benzer şikayetler gelişebilir ve ayırıcı tanı düşünülmesi gerekir. Çünkü iki klinik durumun tedavileri farklıdır. Ayırıcı tanı için semptomların başlama zamanı, otoskopik muayene, dalış profili gibi bilgiler önemlidir (12).

3. Sinüs Barotravmaları

İniş sırasında sinüslerdeki hava basıncı çevre basıncıyla eşitlenemezse vakum etkisiyle sinus içine kanama ve mukozal konjesyon gerçekleşir. Bunu izleyen çıkış sırasında da sıkışan havanın genişlemesiyle kan ve mukus, sinus ostiumundan nazal boşluğa açılır. Semptomlar, ağrı ve sıkışma hissi şeklinde görülebilir. Etkilenen genellikle frontal sinüsler olup daha az sıklıkta retro-orbital, sfenoid ve maksiller sinüsler de barotravmadan etkilenebilir.

Daha nadiren çıkış sırasında da sinüs barotravması izlenebilir. Sinüs ostiumunun polip veya mukozal konjesyon ile tıkanması durumunda içerideki hava genişler ve sinus ostiumundan nazal boşluğa kan ve mukus boşalmasına yol açabilir. Ağrılı veya ağrısız olabilen bu durum, acil veya hızlı çıkış yapılan dalışlarla daha sık görülür.

4. Diş Barotravmaları

İnfekte diş köklerinde, ya da dolgu veya kaplama altında gaz boşlukları bulunabilir. Dalışın iniş fazında bu boşluklarda negatif basınç oluşması ve kan dolmasıyla ağrı oluşabilir. Çıkış fazında da bu gaz boşlukları genişleyeceğinden distansiyon ve ağrı hissedilir. Diş barotravmalarının görülebileceği diğer bir durum ise oral cerrahi girişimler sonrasıdır. Burada iyatrojenik olarak oluşturulan hava hapisleri hem iniş hem de çıkış sırasında barotravmalara neden olabilir.

5. Gastrointestinal Sistem Barotravmaları

Çıkış sırasında bağırsaklarda mevcut olabilecek gazın genişlemesiyle; geğirme, kusma, abdominal distansiyon ve kolik ağrı görülebilir. Elastik yapı nedeniyle iniş sırasında görülmez. Nadiren perforasyona ve böylece şok benzeri durumlara yol açabilir.

6. Ekipman Barotravmaları

Dalış maskeleri, vücut dışında yüz ile maske arasında kalan bir hava boşluğu oluşturur. İniş sırasında burundan maske içine hava verilmediğinde maske içerisindeki boşlukta vakum etki oluşur ve maske içerisinde kalan yüz ve gözler etkilenir. Klinik bulguları ise konjonktival ve orbital kanamalar olarak ortaya çıkar.

Dalış elbiselerinden kaynaklanan barotravmalar ise esas olarak kuru tip elbiselerde meydana gelir. İniş sırasında kuru elbise içerisindeki basınç içeri hava verilerek eşitlenmez ise, elbisedeki kıvrımları içine hapsolan hava sıkışmak isteyerek deriye vakum etki oluşturur ve lineer ekimozlara sebep olabilir.

D. GAZLARIN KISMİ BASINCININ ARTMASINA BAĞLI SORUNLAR

1. İnert Gaz Narkozu

Dalış sırasında solunmakta olan inert gazların kısmi basıncının artmasına bağlı olarak ortaya çıkan ruhsal ve davranışsal değişimler, inert gaz narkozu (İGN) terimiyle ifade edilir. Belirtiler kognitif performansın olumsuz yönde etkilenmesi, entelektüel yeteneklerin ve sinir kas becerilerinin bozulması ile karakterizedir. İnert terimi, vücutta metabolik bir değişikliğe uğramadan etkilerini gösteren gazlar için kullanılmaktadır. Neon, argon, kripton, ksenon, hidrojen ve nitrojen gibi metabolik olarak aktif olmayan bu inert gazların kısmi basıncının artmasıyla narkotik etkiler ortaya çıkmaktadır. Hava ile yapılan dalışlarda narkotik etkiler nitrojen tarafından oluşturulmaktadır.

İnert gazların narkotik etkisi farklı kısmi basınçlarda ortaya çıkmaktadır. Helyum için bu narkotik etki ulaşılabilir derinliklerde gösterilememişken, hava ile yapılan dalışlarda nitrojenin yaklaşık 30 metre derinliklerden sonra narkotik etkileri görülmeye başlamaktadır.

Nitrojen narkozundaki mekanizma tüm inert gazlar için aynı kabul edilir ve buna narkozun üniter hipotezi denir (11). İnert gazların oluşturduğu narkotik etkilerin benzeşmesi bu hipoteze dayandırılmaktadır.

Narkotik etkiler kişiden kişiye ve aynı kişinin farklı zamanlarına göre belirgin farklılıklar gösterebilir. Genellikle, önce konsantrasyon ve dikkatin azaldığı izlenir. Dalgıç hafif alkollü gibi aşırı özgüvenli hissedebilir. Derinlik arttıkça kognitif fonksiyonların ve motor yeteneklerin bozulduğu gözlenir ve dalgıcın dipte iş yapma yetisi bozulabilir.

Narkozun kompresyon hızıyla ilişkisi belirgin olup, zamanla aynı derinliğe yapılan dalışlarda tolerans gelişebilir. Etkiler sıg derinliğe yükselerek çevre basıncının azalması ile hızla kaybolabilir. Sık veya uzun süreli maruziyet adaptasyona yol açabilir. Bu adaptasyonun psikolojik stresin azalmasından da kaynaklanıyor olabileceği, adaptasyona yönelik deneyimlerin daha çok öznel olduğu belirtilmiştir (13).

2. Oksijen Toksisitesi

Oksijenin merkezi sinir sistemi (MSS) üzerindeki toksik etkisi, 1878 yılında Paul Bert tarafından tarla kuşlarına 15-20 ATA'da hava solutulup konvülziyonlar oluşturularak tanımlanmıştır. Paul Bert etkisi olarak da bilinen MSS oksijen toksisitesi tanımlanırken pulmoner hasar bildirilmemiştir. 1899 yılında J. Lorrain Smith tarafından ise sıçanlarda, yaklaşık 1 ATA oksijen kısmi basıncına uzun süreli maruziyetle ortaya çıkan pulmoner değişiklikler kaydedilmiştir. Oksijenin yaptığı bu pulmoner değişikliklere Lorrain Smith etkisi de denmektedir (14).

Oksijen toksisitesinin görülebileceği riskli durumlar arasında: kapalı ve yarı kapalı devre dalış sistemlerinin kullanıldığı dalışlar, daha yüksek oksijen içeren gaz karışımlarının kullanıldığı teknik dalışlar (15), satürasyon dalışları ve %100 oksijen ile yapılan dekompresyonlar yer almaktadır.

MSS oksijen toksisitesi hem oksijenin artan kısmi basıncı hem de maruziyet süresiyle ilişkilidir. Ancak toksisitenin görüldüğü derinliği ve maruziyet süresini tahmin etmek çok mümkün

değildir. Zira kişiler arası ve aynı kişide günden güne farklı olabilecek tolerans çeşitliliği mevcuttur (16).

MSS oksijen toksisitesinin bulguları arasında en dramatik olanı jeneralize tonik klonik nöbetlerdir. Pratikte, önceden uyarıcı bulantı, kusma, görme alanının daralması, yüzde seğirme gibi belirtiler görülebilir. Su altında bu non-spesifik bulguları fark etmek zor olacağı için ilk bulgu konvülziyonlar olabilir. Su altında konvülziyon, boğulmalara ve dekompresyon esnasında pulmoner barotravmalara sebep olabilir. Ayrıca su altında oksijene tolerans, basınç odalarındaki kuru ortama göre daha düşüktür. Bu nedenle su altında solunabilecek oksijen kısmi basıncının üst limiti genellikle 1.6 ATA olarak alınmaktadır (17).

Pulmoner oksijen toksisitesi, yüksek kısmi basınçlarda oksijene daha uzun süreli maruziyetlerin görüldüğü saturasyon dalışlarında ve uzun dip zamanlı askeri amaçlı dalışlarda yaşanan bir problemdir. Yüksek oksijen kısmi basıncına uzun süreli maruziyet, akciğer parankiminde inflamasyon bulgularına yol açmaktadır (18). Oksijen kısmi basıncının 0.5 ATA'yı geçtiği ve maruziyetin 2 saati aştığı durumlarda klinik bulgular ortaya çıkabilir (19). Merkezi sinir sistemi toksisitesinde olduğu gibi pulmoner oksijen toksisitesinde de kişiler arası ve aynı kişinin farklı zamanlarında duyarlılık değişebilmektedir. Erken klinik bulgular; trakeal irritasyon, retrosternal ağrı ve öksürük olup uzayan maruziyetlerde dispne gelişebilir (20). Solunum fonksiyon testi bulgularından zorlu vital kapasitenin (FVC) düşüşü, toksisitenin ilerlediğinin bir göstergesidir. Ancak bu laboratuvar testi, klinik bulgulardan daha az spesifiktir (17).

3. Solunum Gazı Kontaminasyonu

Solunum gazının kontaminasyonu, dalgıçta çeşitli problemlere yol açabilir. Bunlar yağ tadı kaynaklı hafif rahatsızlık ve baş ağrısı gibi semptomlardan; toksik gaz solunumuyla olabilecek şuur kaybı ve mortaliteye kadar değişen aralıktadır.

Kontamine gaz kaynağının birkaç sebebi olabilir. Kompresör endüstriyel bir bölgeye yakın ise bu kaynak atmosferik hava olabilir. Bunun dışında kompresörde uygun olmayan yağ kullanılıyorsa yağın yanması sonucu kontaminasyon oluşabilir. Kirlenici gazlar başlıca karbonmonoksit (CO), nitroz oksit (N₂O) ve uçucu hidrokarbonlar olabilir. Bu gazların basınçlı ortamda solunmasıyla toksik etkileri artar ve inert gaz narkozu, karbonmonoksit zehirlenmesi gibi klinik durumlara zemin hazırlar.

Kontamine gazlar için bazı standartlar mevcuttur. Örneğin Avrupa’da kullanılan solunum aygıtları için basınçlı hava standardı EN12021:2014’e göre hava saflık standartları Tablo 2 de özetlenmiştir. Bu standartlar atmosferik basınçlarda oldukça güvenli görünmekle birlikte daha yüksek basınçlarda risk oluşturabileceği göz önüne alınmalıdır.

Oksijen (% hacim)	21±1
Karbondioksit (ml/m ³)	500
Karbonmonoksit (ml/m ³)	5
Yağ (mg/m ³)	0.5
Su (mg/m ³)	25

Tablo 2. Avrupa Standardı EN12021:2014’e göre hava saflık standartları

E. DEKOMPRESYON HASTALIĞI

1. Patofizyoloji

Dekompresyon hastalığı, çevre basıncının azalması sonrası kanda ve dokuda oluşan kabarcıkların sebep olduğu bir hastalıktır. Bu hastalık Henry Gaz Kanunu temelinde ortaya çıkar. Sualtında solunum aygıtı kullanan dalgıçlarda ve basınçlı ortamda çalışanlarda, yüksek basınçta solunan inert gaz vücutta çözünür ve belirli oranda doygunluğa (satürasyon) ulaşır. Dalışın dekompresyon fazı sırasında inert gaz yeterince atılmaz ise vücut sıvılarında ve dokularda aşırı doygunluk (süpersatürasyon) oluşur. Çözünmüş gaz basıncı ile su buharı toplamının, çevresel mutlak basıncı aştığı aşırı doygunluk durumlarında kabarcıkların oluşması ile dekompresyon hastalığı meydana gelebilir (21).

Dekompresyon hastalığının primer sebebi olarak kabarcık oluşması görülür ise, gaz alımı ve atılımı daha derinlemesine incelenmelidir. Dokularda gaz değişimi difüzyon yoluyla olur ve inert gaz kinetiği aracılığıyla gerçekleşir. Her bir dokunun gaz alım ve atım hızı farklıdır. Kesin

referanslar olmamakla birlikte, farklı doku özelliklerini temsil edebilmek için belli sayıda dokuya varsayımsal olarak yarılanma ömrü belirlenmiştir. Buna göre hızlı dokular; akciğerler, kan ve beyin iken, yavaş dokular olarak bağ ve kıkırdak gibi perfüzyonu düşük dokular gösterilir. Ayrıca inert gaz alım kapasitesi yüksek yağ dokusu da yavaş doku olarak tanımlanır.

Çoğu dalış, dalgıcın tam saturasyona ulaşması için yeterince uzun sürmez. Bu tür dalışlar sırasında hızlı dokular doygunluğa ulaşabilir. Ancak yavaş ve ara dokular için dip zamanı süresince gaz alımı devam eder. Dalışın çıkış fazında ise önce hızlı dokular olmak üzere tersine bir durum oluşur ve gaz atımı başlar. Satha çıkış sırasında, tüm dokular için geçerli olan ve daha önce de tanımlanmış olan süpersaturasyon durumu ortaya çıkar. Eğer süpersaturasyon derecesi çok yüksek değil ise periferik dokulardan kana, kandan da akciğerler yoluyla atmosfere inert gaz atımı düzenli olur. Gaz atımı yeterince yapılamaz ise kabarcıklar oluşabilir ve dekompresyon hastalığı gelişebilir (22).

Süpersaturasyonun nasıl kabarcık oluşumuna neden olduğu halen araştırılmakta olup tam olarak aydınlatılabilmemiş değildir. Kabarcığın evrilmesi için kabarcık kritik (minimal) bir boyuta ulaşabilmelidir (23). Kritik boyutun altındaki kabarcıklar yüksek basınç nedeniyle tekrar çözünebilir. Buradan yola çıkarak, bir dalışta kabarcıkların gelişmesi için kritik bir eğrilik yarıçapına sahip gaz mikronukleuslarının, dekompresyon öncesinde veya sırasında mevcut olması gerektiği düşünülmüştür (24). Günümüzde, gaz mikronukleuslarının nasıl oluştuğuna dair hipotezler ortaya sürülmüş olup kesin kanıt bulunmamaktadır. Buna rağmen ortaya sürülen hipotezler dekompresyon tablolarının geliştirilmesinde dikkate alınmaktadır (25).

Süpersaturasyon nedeni ile venöz sistemde oluşan kabarcıklar, yani venöz gaz embolisi (VGE), 3-5 m derinlikten daha derinlere yapılan dalışlarda süreye de bağlı olarak ultrason ile kolaylıkla tespit edilebilmektedir (26). Kabarcıklar dokularda mekanik ve embolik hasarlara yol açabildiği gibi, aynı zamanda tetikledikleri inflamatuvar yanıtlarla da ek hasara neden olabilirler. Kabarcıkların doğrudan etkileri; mekanik distansiyon ve vasküler oklüzyonlar olabilir. Ancak kabarcıklar sekonder etkiler ile satha çıktıktan 24 saate kadar uzayan bir zaman diliminde klinik bulgu gösterebilirler. Damar içindeki kabarcıkların neden olduğu endotelial hasar; kapiller sızıntıya, ekstravazasyona ve hemokonsantrasyona neden olabilir (27). Diğer etkileri arasında trombosit aktivasyonu ve birikmesi, lökosit endotel adezyonu ve muhtemelen vasküler tıkanma sonucu oluşan reperfüzyon hasarı ve apoptosis görülür (28-30).

Venöz gaz embolisi, çoğu dalıştan sonra asemptomatik olarak tespit edilebilir (31). Genellikle, oluşan kabarcıkların bir bölümü, çapları alveol çevresindeki kapiller çaplarından daha büyük olduğu için pulmoner dolaşım tarafından etkili bir şekilde filtrelenir. Böylece normal şartlarda arteriyel tarafa kabarcık geçişi söz konusu olmaz. Ancak çok miktarda venöz gaz embolisi söz konusu olur ise pulmoner dekompresyon hastalığı (shock) ortaya çıkabilir (32, 33). İntrapulmoner arteriyovenöz şantların alveolar kapillerden daha büyük çapları nedeniyle VGE geçişi için ek bir yol sağlayabileceği gösterilmiştir (34). Ayrıca sağdan sola şanta neden olabilecek patent foramen ovale (PFO) popülasyonun % 27'sinde mevcuttur (35) ve teorik olarak VGE'nin arteriyel dolaşıma geçmesine neden olabileceğini söylemek mümkündür. Dekompresyon hastalığının serebral, spinal, vestibulokoklear belirtileri ve kutanöz tutulumu PFO ile ilişkilendirilmiştir ancak bu bulguların gelişmesi için dalgıçta PFO bulunması şart değildir (36-38).

PFO'nun potansiyel olarak dekompresyon hastalığı riskini arttırmasının yanında dehidratasyonun da dekompresyon hastalığı için önemli predispozan faktörler arasında olduğu gösterilmiştir (39). Obezite, sigara içme, yaş, ortam sıcaklığı, ardışık dalışlar, ters dalış profilleri, dalış sonrası irtifa ve geçirilmiş dekompresyon hastalığı da risk faktörleri arasında gösterilmiştir (40, 41).

Ultrason ile VGE tespit edip derecelendirerek VGE ve dekompresyon hastalığı arasındaki ilişkiyi araştıran birçok çalışma mevcuttur. Aslında yüksek derecelendirilmiş VGE'lerin varlığı ile dekompresyon hastalığı semptomlarının ortaya çıkması ilişkilendirilmiş değildir. Bu nedenle dekompresyon hastalığı için VGE'lerin pozitif prediktif değeri zayıftır. Ancak artmış VGE varlığı ile dekompresyon hastalığı riski arasında korelasyonlar da bildirilmiştir (42). VGE ve dekompresyon hastalığı arasında tanısal korelasyon eksikliği, dekompresyon hastalığının bazı bulgularının neredeyse VGE'den bağımsız olduğunu da düşündürmektedir. İnflamatuvar süreçlerin de patofizyolojide yer aldığı düşünüldüğünde bu durum şaşırtıcı değildir. Ayrıca günümüz teknolojiyle cevaplanamamış sorulardan biri de tespit edilebilen VGE miktarının, aynı dalış profilinde dalan kişiler arasında farklılık göstermesi ve dahası kişinin kendi içinde de farklılık gösteriyor olmasıdır (43).

Dekompresyon hastalığı patofizyolojisine yönelik daha yeni çalışmalarda intravasküler mikropartiküllere yer verilmektedir. Mikropartiküller, kan hücrelerinin ve endotelyumun

yüzeyinden dökülmüş küçük membran materyalleridir. Mikropartikül sayılarının dekompresyon stresi ile arttığı izlenmektedir (44-46). Dolaşımdaki varlıklarıyla inflamatuvar süreçleri ve pıhtılaşmayı aktive ediyor veya şiddetlendiriyor olabilirler. Buradan yola çıkarak kabarcıklara atfedilen patofizyolojik olayların mikropartikül sebepli de olabileceği veya mikropartiküller ile şiddetlenebileceği de düşünülmektedir.

2. Klinik Bulgular

Dekompresyon hastalığı çoğu spesifik olmayan birçok bulgu ve belirti ile ortaya çıkmaktadır. Bulgular çoğunlukla satha çıktıktan sonra ortaya çıkar. Uzun dekompresyon durakları olan dalışlarda nadiren dalışın dekompresyon fazında da ortaya çıkabilir. Tanısı hikaye (dalış profili vb) ve fizik muayene ile konmaktadır. Dalış sonrası ilk 24-48 saate kadar ortaya çıkan herhangi bir şikayet, ilk olarak dekompresyon hastalığını akla getirmelidir.

Dekompresyon hastalığı Amerikan Donanması'nda olduğu gibi geleneksel olarak tip 1 ve tip 2 olarak ikiye ayrılmaktadır. Kas iskelet sistemi ağrısı ve basit deri döküntüleri tip 1 olarak sınıflandırılırken, nörolojik bulgularla ve/veya daha ağır seyreden dekompresyon hastalığı tip 2 olarak sınıflandırılmaktadır (47). Ayrıca literatürde dekompresyon hastalığı ve arteriyel gaz embolisini de içeren "decompression illness" diye bir terim mevcuttur. Daha güncel ve ayrıntılı sınıflandırmada, etkilenen organ ve sistemi içeren ayrı adlandırma kullanılmıştır. Bunlar; kas-iskelet, kütanöz, nörolojik, vestibülokoklear, lenfatik ve kardiyopulmoner dekompresyon hastalığıdır (48).

Kırgınlık, yorgunluk, baş ağrısı, eklem çevresi geçici rahatsızlık hissi gibi non-spesifik semptomlara çok önem verilmemekle birlikte dekompresyon stresiyle ilişkili olduğu bilinmektedir (49). Deride mermer görünümü olarak adlandırılan kutis marmorata, önceleri hafif dekompresyon hastalığı olarak düşünülürken günümüzde nörolojik bulgularla sık birlikteliği nedeniyle ciddi dekompresyon hastalığı olarak ele alınmaktadır (50). Nörolojik dekompresyon hastalığında medulla spinalis tutulumu en yaygın torakolomber bölgededir. Medulla spinalis tutulumuna bağlı nörolojik bulgular arasında non-dermatomal hipoestezi, motor güç kaybı ve mesanede his kaybı mevcuttur. Fulminan seyreden dekompresyon hastalığında ise hemokonsantrasyon, koagülopati ve şok gelişebilir (51). Bu olgular nadirdir ancak sıklıkla fatal seyreder.

Dalgıçta, satha çıktıktan birkaç dakika sonra; bilinç değişikliği, konfüzyon ve fokal kortikal belirtiler varsa daha ziyade arteriyel gaz embolisi akla getirilmelidir. Dekompresyon limitlerini

aşmayan dalış profilleri ve acil çıkış gibi provokatif durumlar, arteriyel gaz embolisi lehinedir. Ancak ikisinin de tedavisi rekompresyon olduğu için ayırıcı tanı için zaman kaybetmeden tedavi edilmelidir. Ayırıcı tanıda göz önünde bulundurulması gereken diğer bir tanı da immersiyon pulmoner ödemidir. Öksürük ve dispne semptomları nedeniyle kardiyopulmoner dekompresyon hastalığı ile karışabilir. İmmersiyon pulmoner ödem genellikle dalış başladıktan kısa bir süre sonra veya dipte de izlenebilir (52).

F. KABARCIK TESPİT METODLARI ve ULTRASON TEKNOLOJİSİ

Dekompresyon hastalığının gelişiminde kabarcıklar önemlidir ancak patofizyolojiyi açıklamak için yetersiz kalır. Kabarcıkları doğrudan in vivo gözlemek oldukça zordur (53). Kabarcıklar başlıca ultrason tekniği ile tespit edilir ve araştırmalarda kullanılan metot ve ekipman değişkenliğinden etkilenir. Nadiren çalışılan diğer kabarcık ölçme yöntemleri arasında; patolojik inceleme, manyetik rezonans görüntülemesi (MRG) ve bilgisayarlı tomografi (BT) mevcuttur (54-56). Diğer yöntemlere göre ultrasonun daha çok tercih edilme nedenleri; taşınabilirliği, gerçek zamanlı ölçümlere olanak sağlaması ve ucuz maliyetidir.

Dalış araştırmalarında başlıca iki tür ultrason kullanılmaktadır. Bunlar; Doppler ve B-mod (parlaklık) ekokardiyografidir. Her iki yöntemin de duruma göre avantajları ve dezavantajları bulunur.

Ultrason cihazlarında hem akustik dalga üreten hem de geri saçılan sinyalleri tespit eden dönüştürücü bulunur. Bu dönüştürücüye transdüser adı verilir. Tıbbi amaçla kullanılan dönüştürücüler, tipik olarak 1-15 mega-Hertz (MHz) arasındaki dalgaları iletmek için geliştirilmiştir. Bir nesnenin tespiti, nesnelerin akustik empedanslarındaki farkı sayesinde, dönüştürücü kullanılarak gerçekleşir. Doku ve kanın akustik empedansı, kabarcıktan 3.000-4.000 kat daha büyüktür. Bu sayede kabarcık, ultrasonla kolaylıkla tespit edilebilir (57). Dönüştürücü tarafından üretilen enerji, cismin visköz yapısı ve dalgaların geri saçılımı nedeniyle zayıflar. Bu akustik zayıflama, frekansa ve derinliğe bağlıdır. Sonuç olarak, kabarcık tespiti için ne kadar yüksek frekans kullanılırsa kabarcıklar o kadar net ayırt edilir ancak dönüştürücünün derinliği gösterme yetisi aynı oranda zayıflar. Bu nedenle ölçümler; çözünürlük ve derinlik arasında denge sağlanarak yapılmalıdır. Dönüştürücüden üretilen akustik enerji, doku tarafından emildiği için ısınma ve kavitasyon (mekanik hasara yol açar) yan etkileri gözlenebilir. Bunlar için termal indeks (TI) ve mekanik indeks (MI) tanımları vardır. Bu indekslerin vücuda zarar vermemesi için üst sınır

belirlenmiştir. Dekompresyon araştırmalarında kabarcık üzerine etkileri bilinmediği için ultrasonun m¼mk¼n olan en d¼ř¼k indeks seviyesinde kullanılması önerilmektedir (58).

Doppler ultrason çalışma prensibi, doppler frekans şiftinin tespitine dayanır. Doppler frekans şifti, herhangi bir zamanda hareketli bir hedeften yansıyan dalgaların frekansındaki değişimdir. Normal duyma aralığında olan çift sayesinde iletilen ve alınan frekanslar arasındaki fark, işitsel bir sinyal olarak kullanılabilir. Bu sayede bir kabarcık, akustik alandan geçtiğinde kan akışından ayırt edilebilen bir ses işitilir. Bu nedenle Doppler ultason ile tespit edilebilen kabarcıklar, dolaşımda hareket eden kabarcıklardır (59). Doppler ultrasonun s¼rekli dalga ve puls dalga formu bulunur. S¼rekli dalga formunda derinlik bileşeni olmadığı için daha hassas kabarcık tespiti yapılabilir. Artan hassasiyet ve ucuz maliyet nedeniyle genelde s¼rekli dalga formu tercih edilir.

Doppler ultrason ile ölç¼mler altın standard olarak prekordiyumdan yapılmaktadır. Bu sayede v¼cuttan geçen tüm kanı örnekleme imkanı doğmaktadır (60). Diğer bir ölç¼m alanı, subklavyen vendir. Subklavyen venden ölç¼m¼n avantajı, dekompresyon hastalığı gör¼lme riskiyle güçlü ilişkisinin gösterilmiş olmasıdır (61). Ölç¼mler, dalgıç hareketlessiz dinlenirken ve/veya hafif egzersiz (diz ç¼kme vb) sonrası alınır. Diz ç¼kme hareketinin amacı, dolaşımda duran kabarcıkları harekete geçirip tespit etmektir.

1974 yılında Spencer ve Johanson, s¼rekli dalga formunda Doppler ultrason kullanarak kabarcık derecelendirme ölç¼đi geliştirmiştir (62). Spencer skalası altında 5 farklı derece vardır. **(Tablo 3)** 1978 yılında Kisman ve Masurel tarafından daha detaylı bir ölç¼k tanımlanmıştır. Bu ölç¼k üç parametreye ayrılır. Bunlar: 1) kardiyak d¼ng¼ başına kabarcık sayısı; 2) dinlenme sırasında kabarcık tespit edilebilen kardiyak d¼ng¼ y¼zdesi veya hafif hareket sonrası kabarcık tespit edilebilen kardiyak d¼ng¼ sayısı; 3) kabarcık seslerinin amplit¼d¼n¼n kan akışı ve kardiyak hareketlerle karşılaştırılması (63). Kisman-Masurel (KM) kodu adı verilen bu ölç¼k daha sonra önem indeksi sağlayan bir puanlama yöntemine çevrilmiştir. Bu yöntem sayesinde Doppler ile tespit edilebilen kabarcıklarda, dekompresyon stresini, parametrik istatistiksel yöntemler kullanarak karşılaştırma olanağı elde edilmiştir (59).

Derece	Kabarcık miktarı
0	Hiçbir kabarcık sinyali yok
1	Kardiyak hareket sinyalleri ile ara sıra duyulan kabarcık sesleri, çoğu kardiyak döngü kabarcıksız
2	Kardiyak döngülerin yarısından azında duyulan kabarcık sesleri, tekli veya grup halinde
3	Kardiyak döngülerin tamamında tekli veya sağanak şekilde duyulan kabarcık sesleri, kardiyak hareket sinyallerini örtmeden
4	Tespit edilebilen maksimum ve her kardiyak döngünün sistolü ve diyastolü boyunca sürekli duyulan kabarcık sesleri, normal kardiyak sesleri örterek

Tablo 3. Dalış sonrası kabarcık derecelendirmesi için Spencer skalası

Her iki derecelendirmeyi de yapabilmek için öncelikle kabarcık sayma işlemi yapacak eğitimli ve tecrübeli birinin bulunması gerekir. Hem Spencer skalası hem de KM kodu kullanılarak yapılan derecelendirmeler kullanıcı biası içerir ve subjektiftir. Ayrıca bu işlemler fazlasıyla zaman alıcıdır. Doppler ultrason kullanılarak yapılan çalışmaların zayıf yönü, kabarcık seslerini duyup tanımlayan bir kişiye bağımlı olunmasıdır. Bu nedenle bilgisayarla otomatikleştirilmiş yazılımlar önerilmektedir. Chappell ve Payne tarafından büyük bir veri tabanında, kullanıcı biasını ortadan kaldıran, kabarcıklara oldukça sensitif bir yazılım uygulanmış ve avantajlı bulunmuştur (64).

Ölçümlerin zamanlaması, dekompresyon hastalığının ve kabarcıkların dinamik yapısı nedeniyle oldukça önemlidir. Dalıştan sonra, çeşitli zamanlarda alınan Doppler ses kayıtlarıyla son

derece değişken kabarcık skorları gösterilmiştir (65). Kabarcık evrimini anlayabilmek için ölçümlerin, yeterli zamanı kapsayarak ve yeterli sıklıkta alınması gerekir. Çalışmaların diğer zayıf yönü bu durumun sağlanamamasıdır (59).

Ultrason çalışmalarının daha yararlı olabilmesi için standardizasyonlar önerilmektedir. Bu sayede farklı çalışmaların birbirleriyle karşılaştırılabilmesi amaçlanmaktadır. 2016 yılında fikir birliği kılavuzu yayınlanmıştır. Bu kılavuzda, dekompresyon çalışmalarında ultrason kullanımının planlaması için önerilen detaylı pratik hususlar ve güncel uygulamalar ele alınmıştır (5). Önerilerden birkaçı: 1) Ölçümleri yapacak operatörün eğitim veya deneyim düzeyi belirtilmelidir. Operatör deneyimsizse önceden belirlenmiş eğitilmiş bir araştırmacı tarafından bağımsız, kör inceleme sonuçları da gösterilmelidir. 2) Derecelendirmeler Spencer skalası veya KM kodu kullanılarak yapılmalıdır. Eğer farklı bir derecelendirme yöntemi kullanılıyorsa detaylı olarak açıklanmalıdır. 3) Örnekleme, standart olarak satha çıkıştan 120 dk sonrasına kadar yapılmalıdır. İlk ölçüm 15 dk içinde olmak koşuluyla ölçüm aralıkları 20 dk'yı aşmamalıdır. Daha az sıklıkta yapılan ölçümlerin sebepleri açıkça belirtilmelidir. 4) Farklı ekipman kullanıldığında karşılaştırma yapabilmek için cihazın (ultrason modeli, prob modeli, ayarları) ve kullanılan protokollerin açıkça tanımlanması gerekir.

Dekompresyon hastalığı patofizyolojisini daha fazla açıklayabilmek için kabarcık tespit etme yöntemlerinde teknolojik gelişmeler yaşanmaktadır. Bu gelişmeler daha çok ekokardiyografi üzerinedir. Ekokardiyografi üzerine yoğunlaşılmasının sebebi, kabarcık boyutunun ve mikrokabarcıkların öneminin anlaşılmasıdır. Teknolojik gelişmelerden biri de çift frekanslı dönüştürücülerdir. Hem Doppler ultrason hem de B-mod ekokardiyografide bu çift frekanslı dönüştürücüler kullanılabilir. Bir çalışmada, çift frekanslı dönüştürücüler ile domuzlar üzerinde dekompresyon sonrası ölçümler yapılmıştır. Bu çalışma ile daha önce tespit edilemeyen mikrokabarcıklar tespit edilebilmiştir (66).

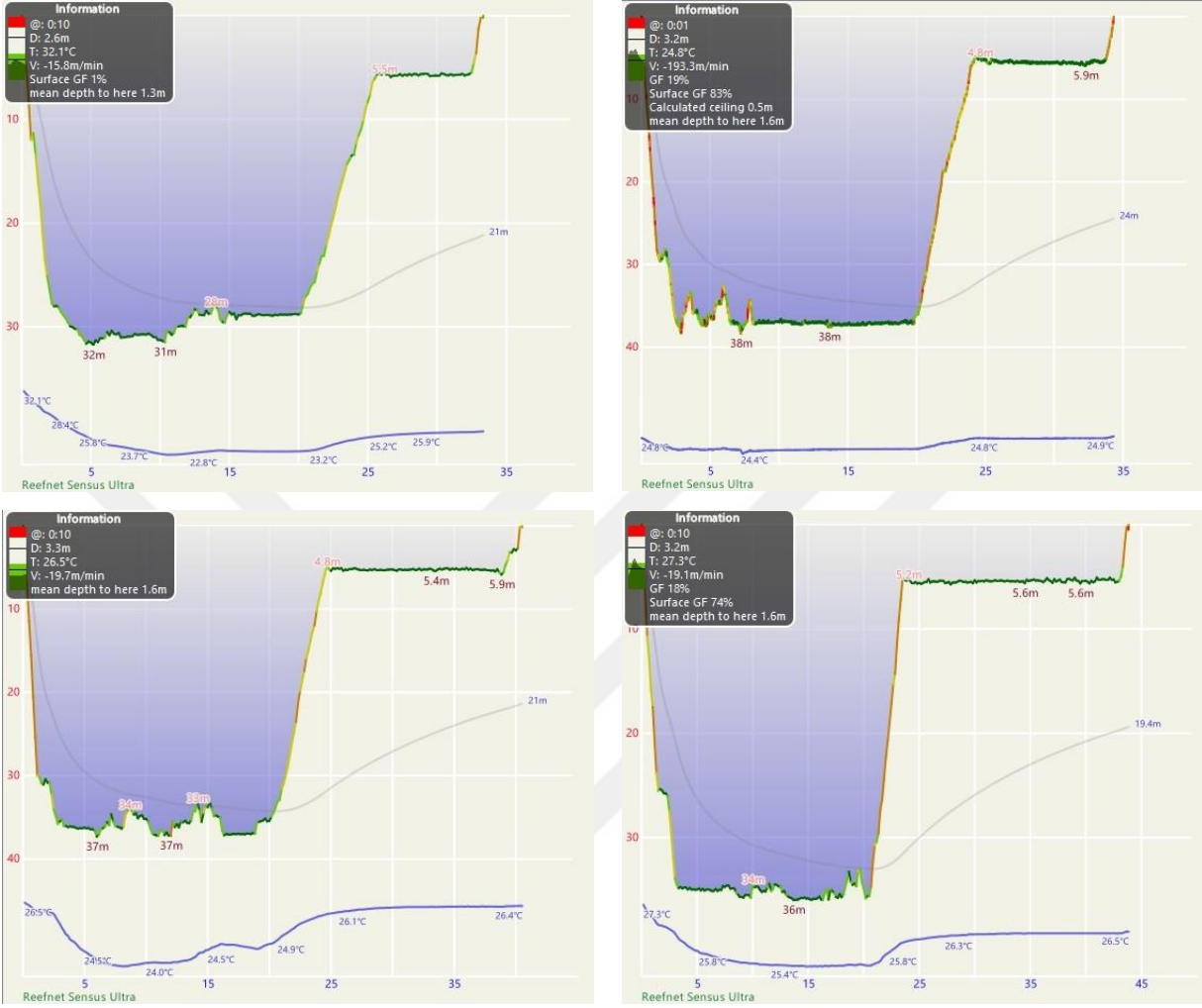
III. GEREÇ VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada, Bozukkale sualtı arkeolojisi kazısı çalışmalarındaki sualtı çalışmaları değerlendirilmiştir. Çalışmada değerlendirilen veriler 2019'un Eylül ayında 24 gün, 2020'nin Ekim ayında 7 gün ve 2021'in Eylül ayında 14 gün süreyle bizzat dalış bölgesinde bulunularak toplanmıştır. Toplanan veriler arasında dalgıçların demografik bilgileri, dalış tecrübeleri, vücut kitle indeksi, dalış kayıtları, dalış sonrası Doppler kayıtları, kullanılan dalış profili ve ekipmanları, dalışa bağlı yaşanan sağlık sorunlarının kaydı yer almaktadır.

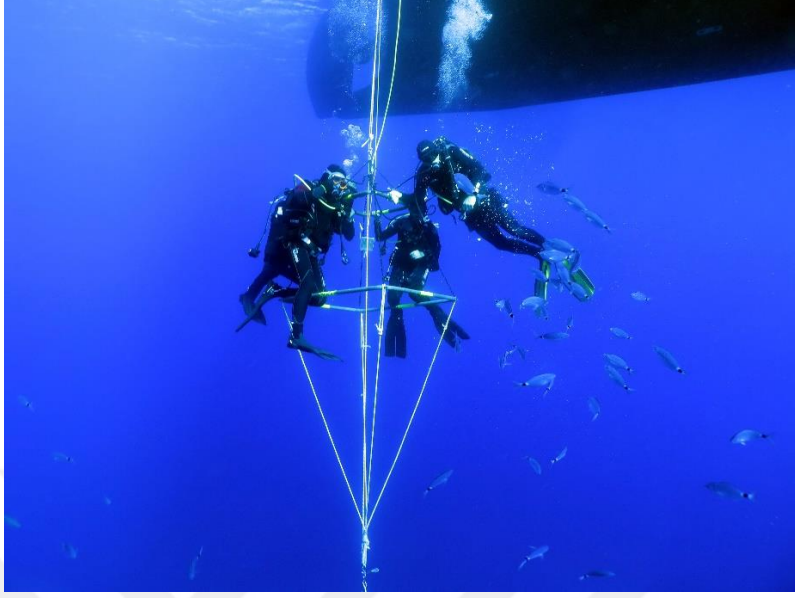
Tüm dalışlar, ekibin önceden yaptığı planları çerçevesinde, 30-42 metre derinliklere, günde en fazla iki dalış olacak şekilde, normal şartlarda haftada 6 gün, en az ikişerli gruplar halinde gerçekleştirilmiştir. Ardışık dalış yapılması halinde yüzey bekleme süresi en az 5 saat tutulmuştur. Tüm dalışlar hava ile gerçekleştirilmiş olup dalış donanımı olarak açık devre SCUBA sistemi kullanılmıştır. Dalışlarda kullanılan 18 litrelik dalış tüpleri her dalıştan önce, gemide bulunan kompresörle 200 bara kadar doldurulmuştur (**Şekil 1**). Dipte sabit noktada yapılan iş nedeni ile kare dalış profilleri sergilenmiştir (**Şekil 2**). Bu profillere uymayan dalışlar (eğitim dalışları, ekipmanların kurulduğu dalışlar ve dalışa uyum amacıyla yapılan sığ dalışlar) ayrı tutulmuştur. Her dalışın dip zamanı 20 dk olarak planlanmış ve 18. dk'da dalgıçları dekompresyon durağına çağıran çan çalınmıştır. Zamanla ilgili ayarlamalar, ekibin içinden zaman tutmak için birinin görevlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Dalgıçların dekompreyon duraklarında rahat bekleyebilmeleri için altı metrede, gemiden sabitlenen bir düzenek (stage) kurulmuş olup, tüm dekompresyon durakları bu düzenek üzerinde gerçekleştirilmiştir (**Şekil 3**). Dekompresyon durağına, gemide bulunan bir saf oksijen tüpünden 4 adet ikinci kademe regülatör sarkıtılmıştır (**Şekil 4**). Oksijen tüpünün basıncı, zaman tutmakla görevlendirilmiş kişi tarafından düzenli olarak kontrol edilmiş, basıncı 50 bara düşen oksijen tüpü değiştirilmiştir. Ayrıca %100 oksijen dolu bir adet yedek tüp, 6 m derinlikte kayalıklara bırakılmıştır. Birinci dalışlarda yapılan dekompresyon duraklarının 5 ila 15 dk arasında değişen süresi %100 oksijen ile, 0 ila 5 dk arasında değişen süresi ise hava ile yapılmıştır. İkinci dalışlarda ise bu süreler %100 oksijen ile 10 ila 20 dk arası, hava ile 0 ila 10 dk arası gerçekleşmiştir. Toplam dalış zamanı 30 ila 60 dk arasında değişmiştir. Dalışlarda su sıcaklığı 20-27 °C arasında değişmiştir. Acil durumlarda kullanılmak üzere dipte, 200 bar hava dolu 2 adet 12 litrelik tüp bulundurulmuştur.



Şekil 1. Kompresör ve doldurulan tüp



Şekil 2. Örnek dalış profilleri

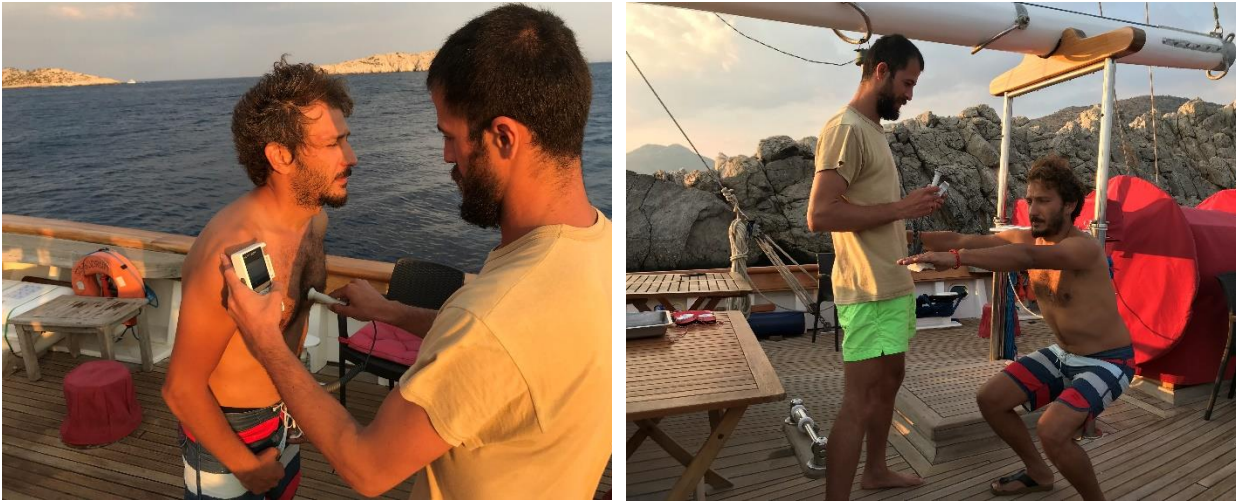


Şekil 3. 6 m'deki dekompresyon durağı



Şekil 4. Oksijen tüpü ve dekompresyon durağına sarkıtılan regülatörler

Dalış profillerinin kaydında bir adet ReefNet Sensus Ultra dalış kayıt cihazı kullanılmıştır. Her dalışta bir dalgıçtan kayıt alınmıştır. Vücut kitle indeksi (VKİ) ölçümleri için Tanita BC545n tartı modeli (vücut analiz cihazı) kullanılmıştır. VKİ ölçümleri her sezon dalışlar başlamadan önce tekrarlanmıştır. Doppler ölçümleri 2019 yılında Huntleigh Sonicaid One Rate Display (2MHz prob), 2020 yılında Huntleigh Multi Dopplex 1 (5MHz prob), 2021 yılında Huntleigh Sonicaid SRX (3MHz prob) cihazı ile gerçekleştirilmiş olup her üç Doppler cihazı da sürekli dalga formu ile çalışmaktadır. Doppler ölçümleri, dalış sonrası 30-40 dk arasında alınmıştır. Ölçümler prekordiyal alanda pulmoner odaktan 60-90 saniye süre ile yapılmıştır. Hem istirahat hem hafif egzersiz (iki diz çökme hareketi) sonrası örnekler kaydedilmiştir (**Şekil 5**). Uygun ses kaydı alınamayan ölçümler tekrarlanmış, optimum ölçüm kaydı elde edilememesi halinde değerlendirmeden çıkarılmıştır. Ölçümler sırasında Olympus WS-852 ses kayıt cihazı kullanılarak ölçümlerin sonradan değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Ölçümler ve değerlendirmeler aynı kişi tarafından yapılmıştır. Derecelendirmeler Spencer skalası kullanılarak yapılmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde tanımlayıcı istatistiklerden sayısal ölçümler için ortalama \pm standart sapma, ortanca, minimum ve maksimum değerler; niteliksel verilerin analizinde ise sayı ve yüzde kullanılmıştır.



Şekil 5. İstirahat ve hafif egzersiz sonrası ölçümler

Dalış bölgesinde acil müdahaleler için gerekli medikal malzemelerin hazır bulunması sağlanmıştır. Medikal malzemeler içerisinde; balon valf maske, orofaringeal hava yolu, endotrakeal tüp ve laringoskop mevcuttur. Acil durumlarda kullanılacak ilaçlar arasında adrenalin amp, amiodaron amp, lidokain amp, parasetamol tb, kodein tb, antihistaminik amp, deksametazon amp, antibiyotikler bulundurulmuştur. Dekompresyon hastalığının transport sırasındaki tedavisi için rezervuarlı maskeler, gerekli olması halinde üriner kateterizasyon için foley sonda ve idrar torbaları, damar içi hidrasyonun sağlanabilmesi için %0.9 izotonik sodyum klorür çözeltileri, kulak muayenesi için otoskop bulundurulmuştur. Nakil gerektiren bir dalış hastalığı görülmesi halinde çevredeki sağlık kuruluşlarına transfer planlanmıştır. Muğla il sınırları içerisinde dalış sahasına en yakın ve basınç odası bulunan merkezlerle her yıl iletişime geçilmiştir. Dalışlar başlamadan önce nakil için gerekli deniz ve kara yolu ulaşım planları tüm ekiple paylaşılmıştır. Transferi gereken dalgıcın en yakın limana şişme bot ile getirilmesi ve limanda bulunan araç ile en yakın sağlık merkezine (basınç odası bulunan merkeze) ulaşımı planlanmıştır. Her çalışma sezonu başlangıcında dalış ekibine dalış tıbbı hakkında eğitim verilmiştir (**Şekil 6**). Dalgıçlara, satıhta rezervuarlı oksijen maskesi uygulaması gösterilmiş, dalışlar başlamadan medikal oksijen tüpleri kontrol edilip denenmiştir. Gemide, dalgıcın transportu süresince yetecek medikal oksijen tüpü bulundurulmuştur.



Şekil 6. Dalış sağlığı ile ilgili eğitim

Yapılan literatür taramasında ülkemizde yapılan sualtı arkeolojisi çalışmalarını araştırılmış olup, bu çalışmalar sualtı hekimliği açısından incelenmiştir.

Çalışmamız İstanbul Üniversitesi, İstanbul Tıp Fakültesi, Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'nun 09/07/2021 tarih ve 14 sayılı toplantısında görüşülerek etik yönden uygun bulunmuştur.

IV. AMAÇLAR

Bu çalışmada Bozukkale sualtı arkeolojisi kazısı çalışmalarından elde edilen verileri dalış sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirmek, literatürdeki benzer çalışmalarda sahada sualtı hekiminin varlığının önemini gözden geçirmek amaçlanmıştır.



V. BULGULAR

A. DALGIÇLAR ve DALIŞ SAĞLIĞI İLE İLGİLİ BULGULAR

2019-2021 Bozukkale sualtı kazısı çalışmalarına bilinen kronik hastalığı bulunan ve düzenli ilaç kullanan dalgıç katılmamıştır. Üç sezonda dalışları incelenen toplam 13 dalgıcın yaşları 23 ila 57 arasında (39.9 ± 12 yıl) değişmekteydi. Dalgıçların VKİ ise 19.6 ile 32.3 arasında değişmekte idi (25.3 ± 3.7 kg/m²). (Birden fazla çalışma sezonuna katılan dalgıçların son sezondaki verisi kullanılmıştır). Elde edilen veriler yeterli olmadığından VKİ ile VGE ya da dekompresyon hastalığı arasında bir ilişkiye bakılmamıştır. Dalgıç 1, 2, 11 ve 13'ün düzenli sigara kullanımı mevcuttur. Dalgıç 1 ve 12'nin özgeçmişinde Amerikan Donanması Tedavi Tablosu 5 ile sahada tedavi edilmiş hafif kas-iskelet sistemi dekompresyon hastalığı öyküsü tespit edilmiştir.

Çalışma boyunca hiçbir dalgıçta dekompresyon hastalığı belirtilerine rastlanmamıştır. 2019 yılındaki çalışmalarda dalgıç 4, orta kulak barotravması geçirmiştir. Timpanik membranda hemoraji izlenen dalgıcın dalışına bir hafta ara verilmiş tam iyileşme görüldükten sonra dalışına izin verilmiştir. Dalgıçların hiçbirinde 6 m'de yapılan oksijen dekompresyonuna bağlı MSS oksijen toksisitesi ya da solunum gazı kontaminasyonuna bağlı herhangi bir bulgu izlenmemiştir.

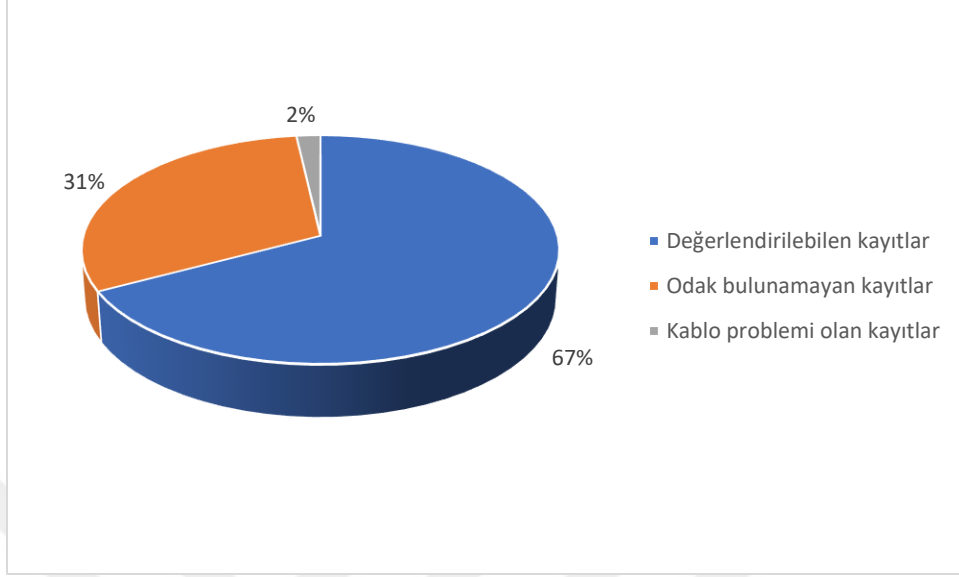
B. DOPPLER İLE KABARCIK TESPİTİ

2019 yılı Eylül ayında on dalgıç toplam 279 dalış gerçekleştirmiş, bu dalışlardan sonra 110 Doppler kaydı alınmıştır. Doppler kayıtları çalışmaları aksatmayacak şekilde alındığından dalışların tümünden sonra Doppler kaydı alınamamıştır. 2019 yılında çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri, VKİ değerleri ve dalış tecrübeleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

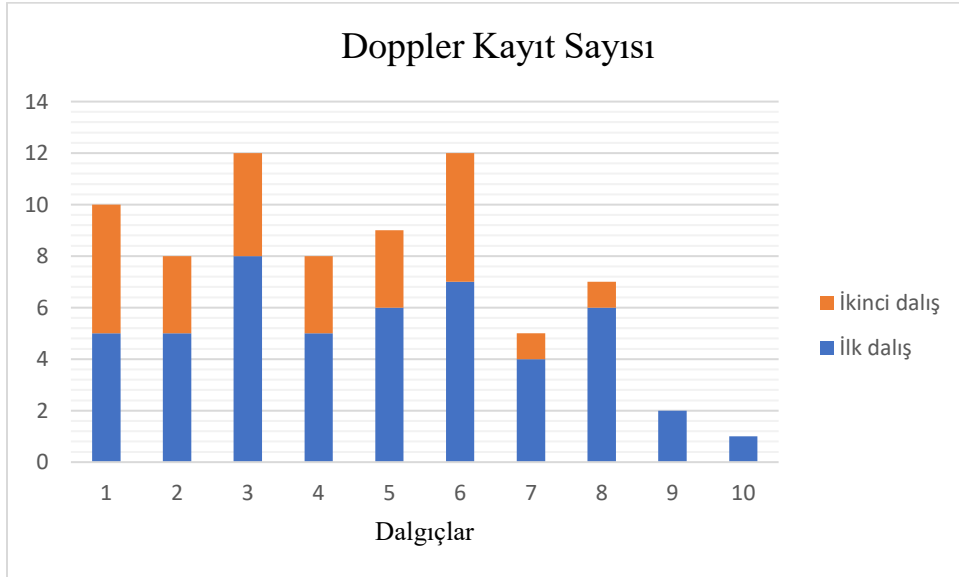
Parametre	Dalgıç 1	Dalgıç 2	Dalgıç 3	Dalgıç 4	Dalgıç 5	Dalgıç 6	Dalgıç 7	Dalgıç 8	Dalgıç 9	Dalgıç 10
Yaş	54	39	33	48	50	49	23	22	27	28
Cinsiyet	E	K	E	E	E	E	K	E	K	E
VKİ (kg/m ²)	30.4	21.6	26.1	29.4	26	24.9	32.3	23.6	19.6	20.3
Dalış deneyimi (yıl/dalış sayısı)	34/3000	13/1000	8/2000	22/5000	6/100	20/300	2/50	6/85	2/285	2/20

Tablo 4. 2019 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

2019 yılında alınan 110 Doppler kaydından 36'sı değerlendirmek için uygun bulunmamıştır. Değerlendirilemeyen kayıtların uygun olmama nedeni, 34'ünde pulmoner odaktan uygun akım alınamaması, ikisinde ise Doppler cihazından ses kayıt cihazına aktarımda kullanılan kabloların parazite neden olmasıdır (**Grafik 1**). Değerlendirilebilen 74 kayıttan 49'u günün ilk dalışı, 25'i de ikinci dalışı sonrası alınmıştır. Dalgıç 1-6 batığın derin bölümünde (34-42 m), dalgıç 7-10 ise sığ bölümünde (30-33 m) çalışmıştır. Değerlendirilen kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı Grafik 2'de gösterilmiştir. Ayrıca günün ilk ve ikinci dalışının kayıt sayıları da belirtilmiştir.

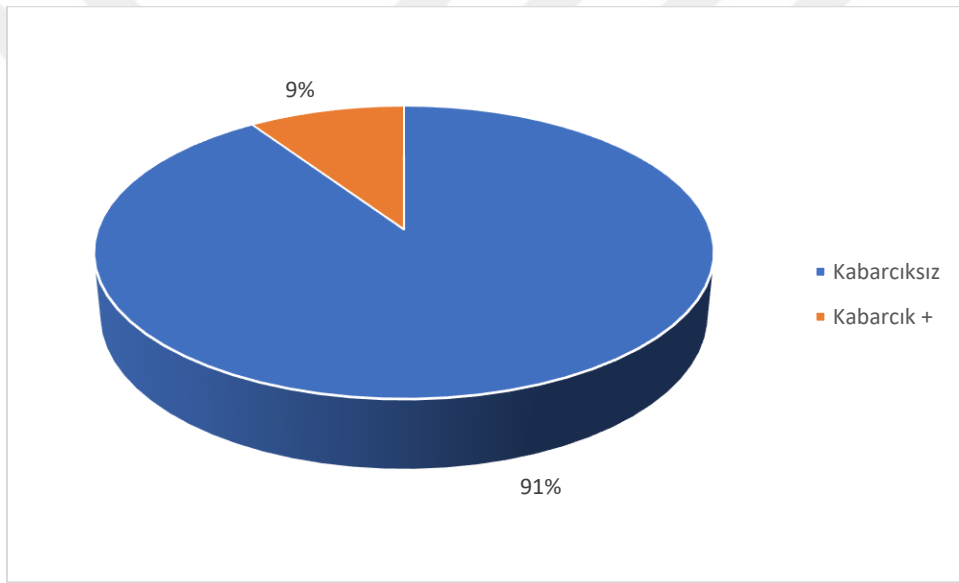


Grafik 1. 2019 yılında yapılan Doppler kayıtlarının değerlendirilebilme oranı

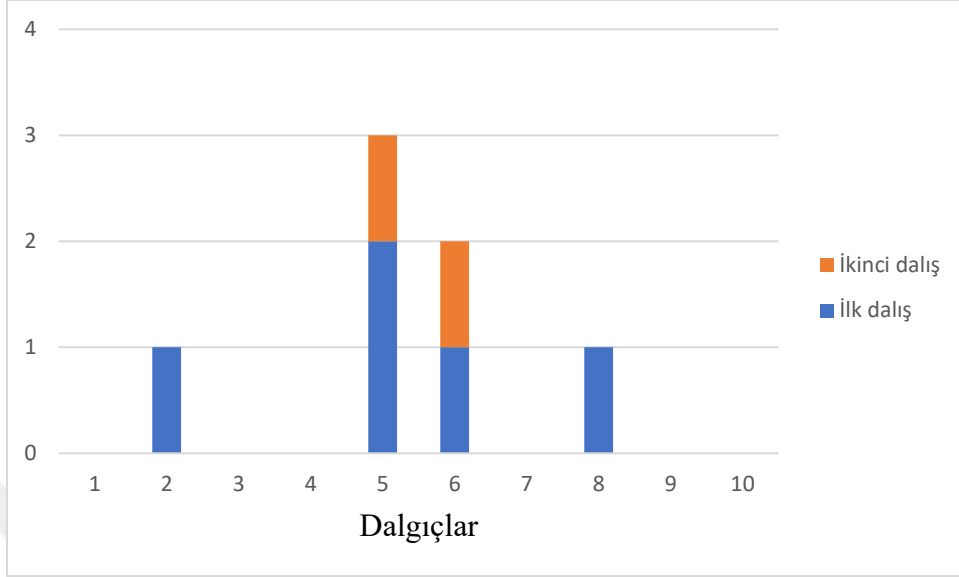


Grafik 2. 2019 yılı Doppler kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı

2019 yılında değerlendirilen 74 kaydın yedisinde kabarcık bulgusu tespit edilmiştir (**Grafik 3**). Ara sıra duyulan bu kabarcıklar Spencer skalasına göre derece 1 olarak sınıflandırılmıştır. Yedi kayıttan beşi ilk dalışlardan, ikisi ise ikinci dalışlardan sonra gerçekleştirilmiştir. Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara göre dağılımı Grafik 4’te gösterilmiştir. Buna göre dalgıçların altında hiç kabarcık tespit edilememiştir.



Grafik 3. Değerlendirilebilen 74 kayıttan kabarcık bulunanların oranı



Grafik 4. 2019 yılında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara ve gün içinde hangi dalışta tespit edildiklerine göre dağılımı

2020 Ekim ayında sekiz dalgıç toplam 103 dalış gerçekleştirmiş, bu dalışların 73'ünden sonra Doppler kaydı alınabilmiş, ancak teknik sorunlar nedeni ile kayıtlar değerlendirilebilir nitelikte gerçekleştirilememiştir. 2020 yılında çalışmaya katılan dalgıçların demografik verileri Tablo 5'te özetlenmiştir. Dalgıç 1-5, 2019 yılında da çalışmalara katılan dalgıçlardır.

Parametre	Dalgıç 1	Dalgıç 2	Dalgıç 3	Dalgıç 4	Dalgıç 5	Dalgıç 11	Dalgıç 12	Dalgıç 13
Yaş	55	41	34	49	51	34	56	41
Cinsiyet	E	K	E	E	E	E	E	E
VKİ (kg/m ²)	28.2	21.6	26	29.6	25.7	24	28.1	24.4
Dalış deneyimi (yıl/dalış sayısı)	35/3000	14/1000	9/2000	23/5000	7/150	15/2000	39/5000	12/1000

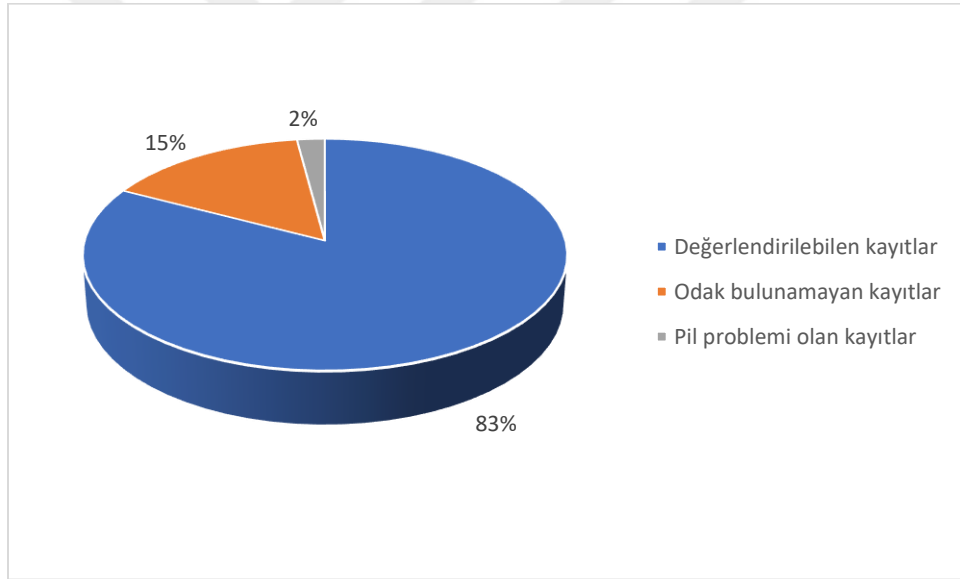
Tablo 5. 2020 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

2021 Eylül ayında sekiz dalgıç 182 dalış gerçekleştirmiş, bu dalışların 144'ünden sonra Doppler kaydı alınmıştır. Dalgıçların demografik verileri Tablo 6'da özetlenmiştir. Sekiz dalgıcın tamamı daha önceki yıllarda çalışmalara katılan dalgıçlardan oluşmuştur.

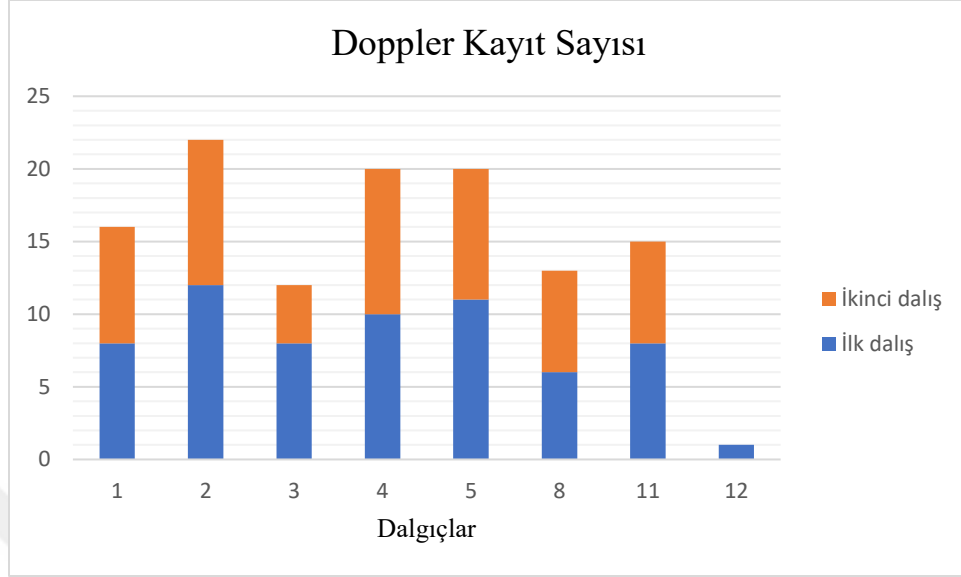
Parametre	Dalgıç 1	Dalgıç 2	Dalgıç 3	Dalgıç 4	Dalgıç 5	Dalgıç 8	Dalgıç 11	Dalgıç 12
Yaş	56	41	35	50	52	24	35	57
Cinsiyet	E	K	E	E	E	E	E	E
VKİ (kg/m ²)	28.1	21.8	26.3	29.8	25.6	25.2	22.6	28
Dalış deneyimi (yıl/dalış sayısı)	36/3000	15/1000	10/2000	24/5000	8/200	8/110	16/2000	40/5000

Tablo 6. 2021 yılındaki çalışmalara katılan dalgıçların demografik verileri

2021 yılında alınan 144 Doppler kaydından 25'i değerlendirmek için uygun bulunmamıştır. Değerlendirilemeyen kayıtlardan 22'sinde pulmoner odaktan uygun akım kaydı alınamamış, üç kayıt ise ölçüm sırasında Doppler cihazının bataryasının azalması nedeniyle dinlenebilir kalitede gerçekleşmemiştir (**Grafik 5**). Değerlendirilebilen 119 kayıttan 64'ü günün ilk dalışı, 55'i de ikinci dalış sonrası alınmıştır. Dalgıç 1-5 ve 12 batığın derin bölümünde (34-42 m), dalgıç 8 ve 11 ise sığ bölümünde (30-33 m) çalışmıştır. Değerlendirilen kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı Grafik 6'da gösterilmiştir.

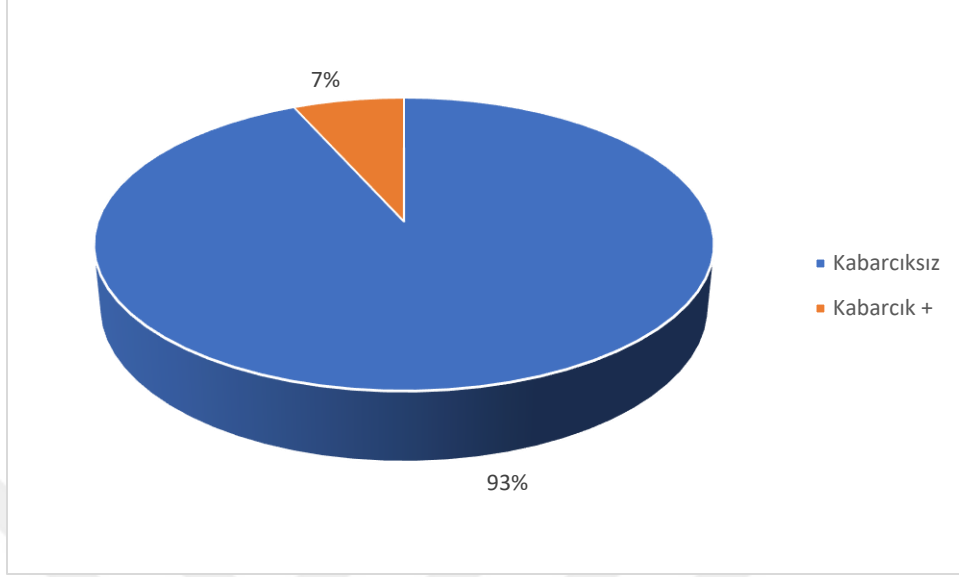


Grafik 5. 2021 yılında yapılan Doppler kayıtlarının değerlendirilebilme oranı

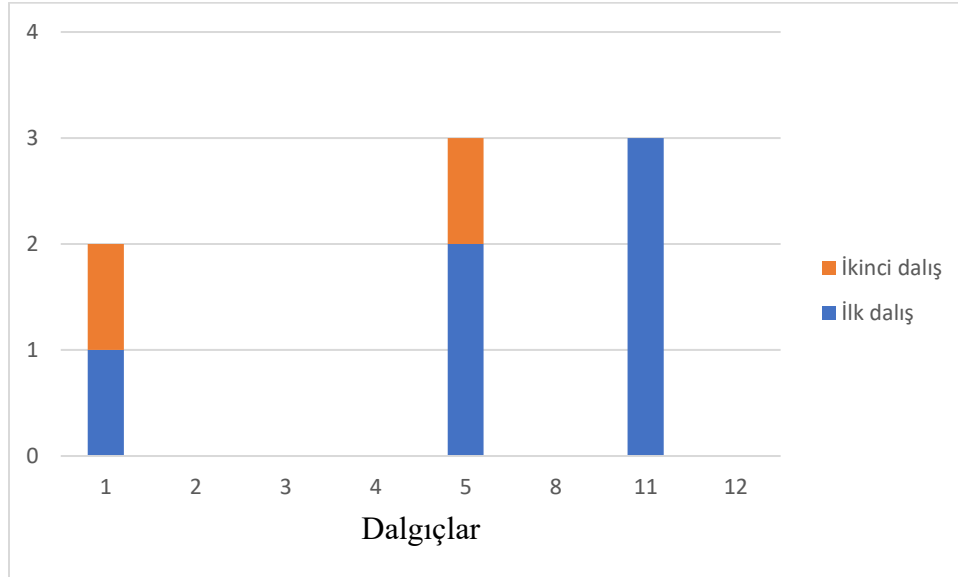


Grafik 6. 2021 yılı Doppler kayıt sayılarının dalgıçlara göre dağılımı

2021 yılında değerlendirilen 119 kaydın sekizinde kabarcık bulgusu tespit edilmiştir (**Grafik 7**). Bulgular Spencer skalasına göre derece 1 olarak sınıflandırılmıştır. Sekiz kayıttan altısı ilk dalışlardan, ikisi ise ikinci dalışlardan sonra gerçekleştirilmiştir. Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara göre dağılımı Grafik 8’de gösterilmiştir. Buna göre dalgıçların beşinde hiç kabarcık tespit edilememiştir.



Grafik 7. Değerlendirilebilen 119 kayıttan kabarcık bulunanların oranı.



Grafik 8. 2021 yılında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalgıçlara ve gün içinde hangi dalışta tespit edildiklerine göre dağılımı.

2019 ve 2021 yıllarında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalış detayları Tablo 7’de özetlenmiştir. Tablodaki ilk yedi satır 2019 yılından, son sekizi ise 2021 yılından elde edilen dalış detaylarıdır. Kaçınıcı dalış gününde oldukları ilk sütunda gösterilmiştir (Çalışma süreleri; 2019 yılında 24 gün, 2021 yılında 14 gündür). Toplam 15 kayıttan 11’i kişilerin gün içindeki ilk dalışlarından, dördü ise ikinci dalışlarından sonra elde edilmiştir.

Dalış günü	Dalgıç no	Derinlik (m)	Dip zamanı (dk)	O ₂ deko (dk)	Hava deko (dk)	Toplam dalış zamanı (dk)
6	Dalgıç 2	38	20	5	3	33
6	Dalgıç 6	36	20	15	3	43
16	Dalgıç 8	33	20	5	3	32
21	Dalgıç 5	34	20	15	3	44
22	Dalgıç 6	38	20	10	3	38
22	Dalgıç 5	37	20	10	3	41
23	Dalgıç 5	38	20	10	3	42
2	Dalgıç 1	38	20	5	5	35
4	Dalgıç 1	38	20	15	3	43
5	Dalgıç 5	38	20	15	3	44
6	Dalgıç 11	32	20	5	5	38
7	Dalgıç 5	38	20	10	5	42
9	Dalgıç 11	32	20	5	5	36
9	Dalgıç 5	38	20	10	3	38
10	Dalgıç 11	32	20	5	5	37

Tablo 7. 2019 ve 2021 yıllarında Spencer skalasına göre derece 1 olarak değerlendirilen kayıtların dalış detayları (kişilerin gün içindeki ikinci dalışları koyu renkle gösterilmiştir)

Ayrıca literatür taraması sonucunda ülkemizde gerçekleştirilen, sualtı hekimlerinin de katıldığı sualtı arkeolojisi çalışmalarıyla ilgili iki çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalardan biri 1996 yılında yayınlanan 'A Diving Operation On the Wreck of Yevstafy' diğeri ise 2002 yılında yayınlanan 'A Diving Operation On the Wreck of Camalti Burnu-1; Interim Report'dur (67, 68).



VI. TARTIŞMA

Sualtında gerçekleştirilen çalışmalarda güvenli bir ortam sağlanmaya çalışılsa da olağan dışı çevre koşulları gereği tıbbi sorunlar ortaya çıkabilir. Olası tıbbi sorunların yaşanmaması veya kötü sonuçlanmaması için ilgili mevzuatta bazı maddeler bulunmaktadır. Örneğin Profesyonel Sualtı Adamları Yönetmeliği'ne göre 40 metreden daha derine yapılan dekompresyonlu dalışlarda, satıh dekompresyonu uygulaması yapılan dalışlarda ve karışım gaz dalışlarında ekibin bir parçası olarak sualtı hekimi bulundurma zorunluluğu mevcuttur. Sualtı çalışmalarında, sualtı hekiminin sahada bulunması hem güvenliği hem de dalgıçların kendini güvende hissetmesini sağlar. Sualtı hekimi acil bir tıbbi durumda tanı ve gerekli tedavinin ivedilikle yapılabilmesini sağlar. Dalış sonrası ortaya çıkan semptomların dalışa bağlı olup olmadığı önemlidir. Dalışa bağlı ve rekompresyon gerektiren hastalıkların, mümkün olan en kısa sürede basınç odasında tedavisi gerekir. Bu çalışmada, dalış destek gemisinde basınç odası bulunmamaktadır. Bu nedenle acil durumlarda dalgıcın naklinin basınç odası bulunan bir merkeze mi yoksa en yakın sağlık kuruluşuna mı yapılacağı sualtı hekimi tarafından belirlenmelidir. Sahada sualtı hekimi bulunmaması halinde telefon üzerinden yapılan öneriler, yerinde ve yüz yüze yapılan muayeneden sonra yapılan öneriler kadar etkin olmayacaktır. Ayrıca sualtı hekimi nakil sırasında oksijen uygulaması, sıvı tedavisi, gerekli durumlarda idrar sondası uygulaması gibi ayrı bir öneme sahip olan girişimlerin eksiksiz uygulamasını, bu uygulamalar için gerekli araç, gereç ve donanımların sahada bulundurulmasını sağlayacaktır.

Literatür tarandığında, ülkemizde sualtı arkeolojisi çalışmaları ile ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bozukkale batığı çalışmalarında dalışa bağlı hastalık insidensi çok düşüktür. Bu çalışmalar sırasında hiçbir dalgıçta dekompresyon hastalığı bulgusuna rastlanmamıştır. Cimsit ve arkadaşlarının Çeşme'de Rus amiral gemisi Yevstafy'de yapılan sualtı kazısı ile ilgili raporunda dekompresyon hastalığı insidensi %0.38, Kocaman ve arkadaşlarının yaptığı Çamaltı Burnu batığına yapılan kazı ile ilgili çalışmada ise dekompresyon hastalığı insidensi %0.05 olarak bildirilmiştir. Bu çalışmalardaki dalış profilleri incelendiğinde dalışların daha derine, daha uzun dip zamanlı, satıhta bekleme süresi daha kısa olarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Önceki çalışmalardaki dalışların çok az bir kısmında bizim çalışmamızdaki dalışlara benzer biçimde oksijen dekompresyonu yapılmıştır. Her ne kadar içerdiği süre daha kısa olsa da diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında Bozukkale batığı çalışmalarında dekompresyon hastalığı riskinin daha düşük olduğu görülmektedir (67, 68).

Barotravmalar, barotravmalar içerisinde de orta kulak barotravması dalışlarda en sık karşılaşılan sağlık problemidir (69). Bizim çalışmamızda sadece bir dalgıçta hafif derecede orta kulak barotravması söz konusu olmuş, ağrı ve kulak eşitlemekte güçlük şikayeti olan dalgıçta, tinnitus, vertigo, bulantı, kusma ve denge bozukluğu gibi ek şikayetler görülmemiştir. Şikayetler dalışın iniş fazında ortaya çıkmış, dalış sonrası timpanik membranda hemoraji izlenmiştir. Dalgıcın tam iyileşene kadar dalışına ara verilmiş, dalgıç daha sonra problemsiz biçimde dalışa devam etmiştir. Bazı dalgıçlarda kulak eşitlemede zorluk yaşayacağı düşüncesiyle barotravmadan korunmak için profilaktik dekonjestan tablet ve/veya sprey kullandığı gözlenmiş olup, bu tür ilaçların kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu uygulamalar için çeşitli çalışmalarda farklı sonuçlar bildirilmiştir (70, 71). Ancak daha güncel olan bir çalışmada istatistiksel olarak anlamlı fark izlenmediği rapor edilmiştir (72).

MSS oksijen toksisitesi açısından immersiyon ve hipoterminin kolaylaştırıcı etkisi olduğu belirtilmektedir (17). Bozukkale batığı dalışlarında oksijen dekompresyonu yapılmasına rağmen toksisite ile karşılaşılmamıştır. Bu dalışlarda 6 m’de en fazla 20 dk süren %100 oksijen soluma süresi, Amerikan Donanması Dekompresyon Tabloları’ndaki oksijen soluma limitlerinin çok altında kalmaktadır. Fransız Donanmasında dalgıçlar, yarı kapalı devreler ile %60 nitroks (%60 oksijen, %40 nitrojen) soluyarak 25 m’ye 3 saate kadar uzayan dalışlar gerçekleştirmişlerdir. Bu dalışlarda kısmi oksijen basıncı, ortalama 1.8 ATA olmasına rağmen toksisiteye bağlı nöbet olgusu rapor edilmemiştir (73). Ayrıca karbondioksit retansiyonu ve egzersizin MSS oksijen toksisitesini kolaylaştırabileceği bilinmektedir. Buna karşılık dekompresyon durağı için 6 m’de sabitlenerek hazırlanan düzenek, dalgıçların dinlenerek saf oksijen solumalarını sağlamıştır (17, 74, 75).

Dalışların büyük çoğunluğu deneyimli dalgıçlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Ekipte 40 yıla kadar dalış tecrübesi olan dalgıçlar da yer almıştır. Her dalgıç, kazı çalışmalarındaki dalışlarına başlamadan önce daha sığ derinliklere alıştırma dalışı yapmıştır. Dalgıçlar, aynı zamanda kazı alanında kullanılan ekipmanlara ve kompresörlere de hakimdir. Tüplerin dolumu, her dalış öncesi, herhangi bir kontaminasyon olmaması için dikkatle yapılmıştır. Oksijen dekompresyonunun gerçekleştirildiği düzenek, olası akıntı sebebiyle dikkatle izlenmiştir. Akıntı veya kötü deniz koşulları nedeni ile dalgıçların konforunun bozulması durumunda kullanılmak üzere, aynı derinlikte ve dalgıçların daha rahat tutunabileceği kayalıklarda, oksijen

dekompresyonu için yedek tüp hazır bulundurulmuştur. Alınan önlemler ve dalgıçların uygun eğitim ve tecrübeleri sayesinde herhangi bir dalış kazası yaşanmamıştır.

Dalış sonrası Doppler ile kabarcık tespitinin tanısal değeri olmasa da kabarcık tespiti, dekompresyon stresinin bir göstergesi olarak değerlidir. Ancak sahada Doppler ile kabarcık tespiti ve derecelendirilmesi son derece zor ve araştırmacıyı zorlayan bir süreçtir. Dalgıçların kendi çalışma programları nedeniyle yeterli sayıda standardize edilmiş kayıt toplamakta güçlükler yaşanmıştır. Doppler incelemelerinin tek araştırmacı tarafından yapılması, çalışma düzeni içinde dalgıçların farklı meşguliyetlerinin olması en önemli sınırlayıcı etkenler olarak karşımıza çıkmıştır. Doppler incelemelerinde önerilen dalış sonrası iki saate kadar 20 dk'lık aralıklarla kayıt alma önerisi, yukarıda sayılan nedenler ile yerine getirilememiştir. Her dalıştan sonra, dalgıçların çalışma temposunu engellemeden sadece tek bir kayıt alınabilmiştir. Tetkik sırasında uygun olmadığı düşünülen kayıtlar tekrarlanmıştır. Buna rağmen kayıtların, her sezonda sırasıyla %33, %100 ve %17'si değerlendirme dışı kalmıştır. 2020 yılında teknik sorunlar nedeniyle hiçbir kayıt değerlendirilebilecek nitelikte alınamamıştır. Dalış sahasının karaya uzaklığı nedeniyle ortaya çıkan teknik sorun çözülememiştir. Diğer yıllarda daha az aksaklık yaşanmış ve daha çok değerlendirilebilir Doppler kaydı alınmıştır. Bazı kayıtların değerlendirme dışı kalmasının altında en sık pulmoner odaktan değerlendirmeye uygun akım alınamaması (2019'da %31, 2021'de %15) yatmıştır. Bu güçlük dalgıçlar arasındaki bünyesel ve anatomik çeşitliliklerden dolayı ortaya çıkmıştır. Akım (ejeksiyon) sesinin ayırt edilemediği ve/veya kalp seslerinin akımı perdelediği kayıtlar, odağın bulunamadığı kayıtlar olarak değerlendirilmiştir. Kayıt kalitesinde araştırmacının deneyimi de etkili bir faktör olarak ortaya çıkmış ve 2021 yılındaki kayıtların %83'ü değerlendirilebilir kalitede yapılabilmektedir.

Doppler ile kabarcık tespitinde ele alınacak bölge hala tartışma konusudur. Çeşitli çalışmalarda yararlı olduğu gösterilerek subklavyen ven ve juguler ven kullanılmıştır (76-78). Prekordiyum ise subklavyen ven ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar alınmıştır (79). Daha güncel bir çalışmada, maruziyet şiddeti göz önüne alındığında subklavyen ven ile dekompresyon hastalığı arasında daha güçlü bir ilişki olduğu gösterilmiştir (61). Uygulama açısından prekordiyal alanda, diğer kalp seslerinden dolayı akımı ayırt etmek, subklavyen vene göre daha zordur. Araştırmacının karşılaştığı zorluklardan biri bu olmasına rağmen pulmoner odağın seçilmesinin

nedeni, tüm vücudu ilgilendiren kan akımının tetkikine olanak sağlaması açısından altın standart olarak görülmesidir (60).

Ölçümler hem istirahatte hem de hafif egzersiz (diz çökme hareketi) sonrasında alınmıştır. Diz çökme hareketi dolaşımında tespit edilebilen kabarcıkların geçici olarak artabileceği düşüncesi ile yaptırılmış, böylece Doppler ultrasonun duyarlılığını arttırmak amaçlanmıştır (80). Diz çökme hareketi transdüserin konumunun değişmesine yol açabileceğinden, bazı yazarlar tarafından, sadece yumruk sıkma hareketi önerilmiştir (81).

Ölçümlerin zamanlamasında 30-40 dk arasının seçilmesinin nedeni, çalışmalarda medyan maksimum VGE derecesinin bu aralıkta kaydedilmiş olmasıdır (43, 82). Aslında bu zamanlama dalış profiline göre değişkenlik gösterir. Dalışın derinliği ve süresi, maksimum VGE derecesinin tespit zamanının değişmesinde etkindir (83). Medyan maksimum VGE derecesinin tespit edildiği dalışlar 33 m derinliğe 20 dk dip zamanı ile yapılan dalışlar olup, çalışmamızda seçilen zaman aralığının uygun olduğu düşünülmüştür. Doppler tetkiki tek kişi ve tek cihazla yapıldığından, her dalgıcın incelemesi dalış sonrası aynı anda yapılamamış, ancak her dalgıcın ölçümü dalış sonrası 30. ve 40. dakika arası zaman diliminde tamamlanmıştır. İleride tartışılacağı üzere oksijen dekompresyonunun VGE oluşumunu etkileyebileceği bilinmektedir. Öte yandan başka bir çalışmada, nitroks dalışı ve oksijen dekompresyonu sonrası yapılan Doppler tetkikinde VGE'nin pik yaptığı zaman, bu çalışmadaki ile benzer görülmüştür (84).

Kabarcık oluşumunda dalış profilinin (derinlik, dip zamanı) etkili olduğu bilinmektedir. Literatürde yapılan benzer çalışmalar incelendiğinde, 30-42 m derinliğin ve 20 dk dip zamanının kabarcık oluşumu için oldukça yeterli bir dalış profili olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra oldukça konservatif dalışlardan sonra bile kabarcık izlenebilir. Bir çalışmada 3-5 m derinliğe yapılan satürasyon sonrasında, dalgıçların %50'sinde kabarcık görülebileceği bildirilmiştir (26, 85). Dekompresyon hastalığı geliştirmeyen bu kabarcıklara sessiz kabarcıklar denmektedir. Kabarcık insidansı çeşitli çalışmalarda oldukça değişken olarak gösterilmiştir. DAN (Divers Alert Network) Avrupa'nın yaptığı geniş çaplı araştırmada 970 rekreasyonel dalışın %62'sinde (65) ve başka bir çalışmada 281 rekreasyonel dalışın %73'ünde (31) kabarcık tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada, solunum gazı olarak %28 nitroksun (%28 oksijen, %72 nitrojen) da kullanıldığı 54 dalıştan %90'ında kabarcık sinyalleri tespit edilebilmiştir (86). Yine sualtı arkeolojisi kazılarında gerçekleştirilen bir çalışmada bu oran %67'dir (67). Mevcut çalışmada ise dalışların %9 ve

%7'sinde VGE pozitif olarak değerlendirilmiştir. Bu oranlar diğer çalışmalara göre oldukça düşüktür. Bu düşük VGE görülme oranları hava yerine oksijen dekompresyonu yapılmış olmasına bağlanmıştır. Her ne kadar VGE ile dekompresyon hastalığı arasında kesin korelasyon kanıtlanmamış olsa da az sayıda kabarcık tespit edilen bu dalışlarda dekompresyon stresinin de düşük olduğu düşünülmüştür.

Çalışma sırasında herhangi bir dekompresyon hastalığı bulgusuna rastlanılmamış ve az sayıda kayıta saptanan kabarcıklar, Spencer skalasına göre derece 1 olarak sınıflandırılmıştır. Bu bulgularla Bozukkale batığına yapılan dalış profillerinin dekompresyon hastalığı yönünden düşük riskli olduğu düşünülmüştür. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda VGE ile dekompresyon hastalığı arasındaki ilişki karmaşıktır. Kimi dalışlarda yüksek VGE dereceleri tespit edilmesine rağmen dekompresyon hastalığı bulguları gözlenmemiştir. Tam tersi olarak kimilerinde, VGE tespit edilemezken dekompresyon hastalığı bulguları ile karşılaşılabilmiştir. Yine de dalışlarda, yüksek VGE derecelerinin tespit edilmesiyle daha yüksek olasılıkla dekompresyon hastalığı riski olduğu bildirilmiştir (26, 79, 87).

Dekompresyon sırasında oksijen solumanın inert gaz atılımını artırıcı etkisi zaten bilinmektedir. Paul Bert, oksijen ile dekompresyonun dekompresyon stresini azaltacağını belirten ilk bilim insanıdır. Solunum gaz karışımında oksijen kısmi basıncını arttırmak, kan-alveol içi inert gaz gradyanını artırır ve böylece inert gaz atılımı artar. İnert gaz atıldıkça süpersatürasyon derecesi düşer ve kabarcık oluşma olasılığı azalır (88). Başka bir teorik açıklamada ise ilk defa Behnke tarafından tarif edilen oksijen penceresinden bahsedilmektedir. Oksijen penceresi, arteriyel taraftaki oksijen ve karbondioksit kısmi basınçlarının toplamı ile venöz taraftakilerin toplamı arasındaki farktır. Bir dokunun beslenmesi kabarcık tarafından tıkandığında, inert gazın atılımı için mevcut tek etken bu oksijen penceresidir (89). Solunum gazında oksijen kısmi basıncının artmasıyla oksijen penceresi de doğru orantılı artacaktır. Kabarcık oluşumu durumunda oksijen soluyarak kabarcıkların boyutlarını küçültmek, dokuların lokal olarak oksijenizasyonunu arttırmak mümkündür (84). Çalışmamızda oksijen dekosu ile yapılan dalışlar sonrası tespit edilebilen VGE'nin sadece %9 ve %7 değerlerinde kalması bu teoriyi destekler niteliktedir. Öte yandan, oksijenin vazokonstriktif etkisi nedeniyle inert gaz atılımının azaldığını öne süren bir çalışma da mevcuttur (90). Ancak çalışmamızda bulunan az sayıda VGE oranları, oksijenin vazokonstriktif etkisinin inert gaz atılımı üzerinde çok da fazla olumsuz etki göstermediği

yönündedir. Başka bir çalışmada %100 oksijen ile %50 nitroks (%50 oksijen, %50 nitrojen) dekompresyon gazı olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada toplam dekompresyon süresinden bağımsız olarak %100 oksijen solumayla dekompresyon riski daha düşük gözlenmiştir (91). Bizim bulgularımız da oksijenin inert gaz atılımı üzerindeki faydalı etkisini ve oksijen penceresi teorisini destekler niteliktedir.

Dalış sonrası oksijen solumanın kabarcık davranışı üzerine etkisini belirlemek için bir çalışmada 30 m'ye 30 dk dip zamanlı dalışlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her dalgıç üç dalış gerçekleştirmiştir. Dalışlardan biri kontrol olmak üzere herhangi bir işlem yapılmaz iken, diğer iki dalışın birinde satha geldikten 10 dakika sonra, 30 dakika süre ile sathıta oksijen, diğerinde ise 6 m derinlikte aynı süreyle oksijen solutulmuştur. Her iki grupta da oksijen solumayan gruba (kontrol grubu) göre anlamlı derecede düşük VGE skorları elde edilmiştir. Dahası su içinde oksijen soluyan grupta, bizim çalışmamıza benzer biçimde, daha az VGE tespit edilmiş, tespit edilebilen kayıtlar da Spencer skalasına göre derece 1 olarak sınıflandırılmıştır (92). Su içi oksijen rekompresyonunun etkinliğini tartışan bu çalışma protokolü, bizim çalışmamızdaki protokolden farklıdır. Ancak her iki çalışmada da Spencer skalasına göre benzer sonuçlar elde edilmesinin dikkat çekici olduğu düşünülmüştür. Bizim çalışmamızdaki protokole daha çok benzeyen protokolle yapılan başka bir çalışmada, 30 m'ye 30 dk dip zamanlı dalışlar gerçekleştirilmiş ve 3 m'de 9 dk dekompresyon durağı yapılmıştır. Bu dekompresyon duraklarında bir gruba hava diğer gruba oksijen solutulmuştur. Doppler ile inceleme satha çıkıştan 30. ve 60. dakikalarda hem istirahatte hem hafif egzersiz sonrası yapılmıştır. Oksijen dekompresyonu sonrası istirahatte alınan ölçümlerde, Spencer skalasına göre derece 0 ve 1 olarak sınıflandırılan kayıtlar elde edilmiştir. Sadece bir ölçümde, 30. dk'da derece 2 olarak sınıflandırılan kayıt gösterilmiştir. Ancak bizim çalışmamızın aksine, diz çökme hareketi sonrası ölçümlerde, derece 2 ve 3 olarak sınıflandırılan kabarcık tespiti söz konusu olmuştur. Sonuç olarak oksijen ile dekompresyonun kabarcık skorlarını anlamlı derecede düşürdüğü belirtilmiştir (93). Söz konusu çalışmada Spencer skalası dereceleri bizim çalışmamızdan yüksek olsa da bizim çalışmamızla paralel sonuçlar vermesi, oksijen dekompresyonunun kabarcık oluşmasındaki göze çarpan etkisini doğrulamıştır.

Su içi oksijen dekompresyon durakları, 1984 yılında Kanada Savunma ve Sivil Çevre Tıbbi Enstitüsü'nde Nishi tarafından ve 1986 COMEX tablolarında Fransız Donanması tarafından geliştirilmiştir. Su içinde yapılan dekompresyon duraklarını kısaltmayı amaçlayan bu uygulamalar

soğuk suda daha az kalmayı ve termal konforu sağlamıştır. Dekompresyon süreleri, derinliğe göre değişerek, %30 ila %50 oranında kısaltılmıştır (88). Dip solunum gazı %40 nitroks (%40 oksijen, %60 nitrojen) olan ve 40 m derinliğe yapılan bir başka çalışmada, oksijen ile yapılan dekompresyon süresini hava dekompresyonuna kıyasla %30 kısaltmak daha güvenli olarak önerilmiştir (84). Benzer derinliğe hava ile dalış yapılan bizim çalışmamızda dekompresyon durakları kimi dalışlarda kısaltılmış fakat bu kısaltmalar çoğunlukla %30'u geçmemiştir. Öncelik dalış güvenliği olduğu için çoğu dalışta hava dekompresyon sürelerinde kısaltma yapılmadan oksijen dekompresyonu uygulanmıştır. Örneğin 38 m'ye yapılan günün ilk dalışında deko süreleri, Amerikan Donanması Dekompresyon Tablosu'na göre hava ile yapılırdı 6 m'de 8 dk olacakken oksijen dekosunda 6 m'de 5 dk yapılmış ve geri kalan 3 dk yine hava ile deko yapılarak tamamlanmıştır (**Tablo 8**). Tespit edilebilen kabarcık sinyalli kayıtların düşük derecede ve az sayıda olmasının bu konservatif dekompresyon stratejisiyle açıklanabileceği düşünülmüştür.

	Amerikan Donanması Hava Dekompresyon Tablosuna göre dekompresyon			Uygulanan dekompresyon		
	Derinlik (m)	Dip zamanı (dk)	Dekompresyon durakları (m/dk)	Derinlik (m)	Dip zamanı (dk)	Dekompresyon durakları (m/dk)
İlk dalış	38	20	6 m / 8 dk	38	20	6 m / 5 dk O ₂ (+3 dk hava)
	40.5	20	6 m / 13 dk	42	20	6 m / 10 dk O ₂ (+3 dk hava)
İkinci dalış	38	20	9 m / 2 dk ve 6 m / 32 dk	38	20	6 m / 15 dk O ₂ (+5 dk hava)
	33	20	6 m / 14 dk	34	20	6 m / 10 dk O ₂ (+3 dk hava)

Tablo 8. Günün ilk ve ikinci dalışlarına (mükerrer) örnek ikişer dalışın Amerikan Donanması Tablosuna göre dekompresyon sürelerinin karşılaştırılması.

Soğuğa maruziyet, periferik dolaşımın vazokonstriksiyonuna ve perfüzyonun azalmasına neden olarak dekompresyonda inert gaz atılımının etkinliğini azaltır (94, 95). Ancak bizim

çalışmamızda dekompresyon süresince su sıcaklığı ortalama 24-26 °C civarında ölçülmüş ve dalgıçlar termal konfor şartlarında dekompresyon duraklarını tamamlamıştır. VGE ve dekompresyon hastalığı ile dış ortam sıcaklığının direk bir bağlantısı kanıtlanmamıştır. Yine de inert gaz alımı ve atılımı için en uygun durum, dalgıcı dip süresince daha serin, dekompresyon süresince hafif sıcak tutmak lehinedir (94). Bu çalışmada da uygun termal konfor faktörleri göz önüne alındığında nitrojen alımı ve atılımı için optimal sıcaklık aralığı olduğu düşünülmüştür.

Dalgıçlar operasyon süresince gerek gemide gerekse su altında, zaman zaman yoğun iş yükü altında çalışmıştır. Dalış sırasında ve yüzeye geldikten sonra fiziksel eforun kabarcık oluşumunu arttırdığı bilinmektedir. Dipte yapılan egzersizin inert gaz alımını arttırdığı da bildirilmiştir (96). DAN Avrupa'nın verilerine göre dekompresyon hastalığı izlenen olgularda, dipte fazla efor harcama, anlamlı bir risk faktörü olarak gösterilmiştir. Ancak Spencer skalasına göre yüksek derece VGE'ler ile dipte fazla efor harcama ters orantılı bulunmuştur. Bu sonuç dolaylı olarak, yoğun egzersiz sergilenen dalışların süresinin kısa tutulmasına bağlanmıştır (65). Bizim çalışmamızda da dalışlarda dip süresinin 20 dk olması görece kısadır. Aynı şekilde çalışmamızda efora rağmen az sayıda kabarcık tespit edilmesinin kısa sayılabilecek dip zamanına da bağlı olabileceği düşünülmüştür.

Literatürde, ardışık günlerde dalışlar gerçekleştirmenin dekompresyon hastalığı ve VGE oluşması için bir aklimatizasyon sağladığından bahsedilmektedir. VGE için daha az tutarlı sonuçlar olmasına rağmen dekompresyon hastalığı insidansı için böyle bir etki olduğu öne sürülmektedir (97). Bizim çalışmamızda zaten dekompresyon hastalığı bulgusuyla karşılaşmamıştır. Kabarcık sinyali tespit edildiği düşünülen kayıtların kaçınıcı günlerde bulunduğu Tablo 7 üzerinde gösterilmiştir. Ancak dalgıçların eksik kayıtları olması nedeniyle VGE aklimatizasyonu için görüş ileri sürülemez.

Çalışmamız, Covid-19 pandemisinin getirdiği kısıtlamaların da etkisi ile kısıtlı veri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ancak yılın kısıtlı bir zaman diliminde yapılabilen Bozukkale sualtı kazısı çalışmalarındaki dalışlar sağlık açısından değerlendirilmiş, dalgıçların önceden yapılan çalışma planlamalarını etkilememek adına veri toplama işlemlerinde bir standart uygulanamamıştır. Bu nedenle dekompresyon stresinin bir göstergesi olan Doppler incelemesi, her dalıştan standart bir zaman sonra yapılamamış, bazı dalgıçların bazı dalışlarından veri elde edilememiştir. Ayrıca dalış sahasının yerleşim merkezlerinden uzak konumu, yaşanan teknik

aksaklıkların kısa sürede çözülememesine ve sağlıklı veri toplanamamasına neden olmuştur. Dalgıçların dalışlarının tümünden sonra değerlendirilebilecek nitelikte Doppler kaydı alınamaması, çalışmanın dekompresyon stresini değerlendirme kısmının zayıf kalmasına neden olmuştur.



VII. SONUÇ

Sualtı çalışmalarında dalış derinliği arttıkça dalış sağlığı açısından alınan risk de artmaktadır. Dekompresyonlu dalışlarla gerçekteştirilen Bozukkale sualtı kazısında, sahada sualtı hekimlerinin varlığı çalışmaları dalış sağlığı açısından daha güvenli kılmış, dalgıçlar kendilerini daha güvende hissetmişlerdir. Dalış bölgesinde sualtı hekimi varlığı, ortaya çıkacak acil dalış kazası ve hastalıklarında zamanında ve uygun müdahalenin yapılmasını sağlayacaktır. Kazı süresince dekompresyon hastalığı görülmemesi, dekompresyon stresi göstergesi olabilecek VGE derecelerinin oldukça düşük olması dalış profillerinin güvenli olduğunun bir göstergesidir. Dalışa bağlı sağlık sorunu olarak sadece bir orta kulak barotravması olgusu gözlenmiş olup, dalgıçların tecrübeli olmaları, çalışma başlangıcında dalış sağlığı ile ilgili eğitim yapılması dalış sağlığı açısından güvenliği arttırmıştır. Uygun dalış ve deniz koşullarında, belirli dekompresyon duraklarında oksijen dekompresyonu güvenli biçimde uygulanmış, bu uygulama dekompresyon stresini azaltarak daha düşük derecelerde VGE oluşmasına ve dekompreyon hastalığı görülmemesine katkı sağlamış olabilir.

VIII. KAYNAKLAR

1. Dardeau MR, Pollock NW, McDonald CM, Lang MA. The incidence of decompression illness in 10 years of scientific diving. *Diving Hyperb Med.* 2012;42(4):195-200.
2. Carter A MR, Thompson A. The rate of decompression sickness in scientific diving at the Australian Institute of Marine Science (Townsville) 1996-2001. *SPUMS Journal.* 2005;35:125-30.
3. Ballard RD. Maritime Archaeology. In: John Steele ST, Karl Turekian, editor. *Encyclopedia of Ocean Sciences* 2001. p. 1675-81.
4. Özdaş H. Bozukkale Sualtı Kazısı, 2019 sezonu. *TINA Denizcilik Arkeolojisi Dergi.* 2019;12:67-71.
5. Mollerlokken A, Blogg SL, Doolette DJ, Nishi RY, Pollock NW. Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research. *Diving Hyperb Med.* 2016;46(1):26-32.
6. Gibbins D, Adams J. Shipwrecks and maritime archaeology. *World Archaeology.* 2001;32(3):279-91.
7. Edmonds C. Physics and physiology. In: Edmonds C, Bennett M, Lippmann J, Mitchell S, editors. *Diving and Subaquatic Medicine*, 5th edition. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 15-26.
8. Edmonds C. Dysbaric Diseases: Barotraumas. In: Edmonds C, Bennett M, Lippmann J, Mitchell S, editors. *Diving and Subaquatic Medicine*, 5th edition. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 63-121.
9. Benton PJ, Woodfine JD, Westwood PR. Arterial gas embolism following a 1-meter ascent during helicopter escape training: a case report. *Aviat Space Environ Med.* 1996;67(1):63-4.
10. van Hulst RA KJ, Lachmann B. Gas embolism: pathophysiology and treatment. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2003 23(5):237-46.
11. Edmonds C. Abnormal Gas Pressures: Inert gas narcosis. In: Edmonds C, Bennett M, Lippmann J, Mitchell S, editors. *Diving and Subaquatic Medicine*, 5th edition. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 205-15.
12. Rozycki SW, Brown MJ, Camacho M. Inner ear barotrauma in divers: an evidence-based tool for evaluation and treatment. *Diving Hyperb Med.* 2018;48(3):186-93.
13. Hamilton K, Laliberte MF, Fowler B. Dissociation of the behavioral and subjective components of nitrogen narcosis and diver adaptation. *Undersea Hyperb Med.* 1995;22(1):41-9.
14. Acott C. Oxygen toxicity: a brief history of oxygen in diving. *South Pacific Underwater Medicine Society Journal.* 1999;29(3):150-5.
15. Lawrence CH. A diving fatality due to oxygen toxicity during a "technical" dive. *Med J Aust.* 1996;165(5):262-3.
16. Clark JM, Thom SR. Oxygen under pressure. In: Brubakk A, Neuman T, editors. *Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving* 5th Edition. London: Saunders; 2003. p. 358-418.
17. Edmonds C. Abnormal Gas Pressures: Oxygen toxicity. In: Edmonds C, Bennett M, Lippmann J, Mitchell S, editors. *Diving and Subaquatic Medicine*, 5th edition. Boca Raton: CRC Press; 2016. p. 205-15.
18. van Ooij PJ, Hollmann MW, van Hulst RA, Sterk PJ. Assessment of pulmonary oxygen toxicity: relevance to professional diving; a review. *Respir Physiol Neurobiol.* 2013;189(1):117-28.
19. Clark JM, Lambertsen CJ. Pulmonary oxygen toxicity: a review. *Pharmacol Rev.* 1971;23(2):37-133.
20. Klein J. Normobaric pulmonary oxygen toxicity. *Anesth Analg.* 1990;70(2):195-207.

21. Vann RD, Butler FK, Mitchell SJ, Moon RE. Decompression illness. *Lancet*. 2011;377(9760):153-64.
22. Pollock NW, Buteau D. Updates in Decompression Illness. *Emerg Med Clin North Am*. 2017;35(2):301-19.
23. Gerth WA, Hemmingsen EA. Heterogeneous nucleation of bubbles at solid surfaces in gas-supersaturated aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1980;74(1):80-9.
24. Hennessy TR. On the site of origin, evolution and effects of decompression microbubbles. In: Brubakk AO, Hemmingsen BB, Sundnes G, editors. *Supersaturation and Bubble Formation in Fluids and Organisms: An International Symposium*; 6–10 June, 1988; Sweden Tapir Publishers. p. 292-332.
25. Flook V. The physics and physiology of decompression. *European Journal of Underwater and Hyperbaric Medicine*. 2000;1:8-13.
26. Eckenhoff RG, Olstad CS, Carrod G. Human dose-response relationship for decompression and endogenous bubble formation. *J Appl Physiol* (1985). 1990;69(3):914-8.
27. Boussuges A, Blanc P, Molenat F, Bergmann E, Sainty JM. Haemoconcentration in neurological decompression illness. *Int J Sports Med*. 1996;17(5):351-5.
28. Bosco G, Yang ZJ, Savini F, Nubile G, Data PG, Wang JP, et al. Environmental stress on diving-induced platelet activation. *Undersea Hyperb Med*. 2001;28(4):207-11.
29. Brouns R, De Deyn PP. The complexity of neurobiological processes in acute ischemic stroke. *Clin Neurol Neurosurg*. 2009;111(6):483-95.
30. Martin JD, Thom SR. Vascular leukocyte sequestration in decompression sickness and prophylactic hyperbaric oxygen therapy in rats. *Aviat Space Environ Med*. 2002;73(6):565-9.
31. Dunford RG, Vann RD, Gerth WA, Pieper CF, Huggins K, Wacholtz C, et al. The incidence of venous gas emboli in recreational diving. *Undersea Hyperb Med*. 2002;29(4):247-59.
32. Vik A, Brubakk AO, Hennessy TR, Jenssen BM, Ekker M, Slordahl SA. Venous air embolism in swine: transport of gas bubbles through the pulmonary circulation. *J Appl Physiol* (1985). 1990;69(1):237-44.
33. Zwirowich CV, Muller NL, Abboud RT, Lepawsky M. Noncardiogenic pulmonary edema caused by decompression sickness: rapid resolution following hyperbaric therapy. *Radiology*. 1987;163(1):81-2.
34. Hills BA, Butler BD. Size distribution of intravascular air emboli produced by decompression. *Undersea Biomed Res*. 1981;8(3):163-70.
35. Hagen PT, Scholz DG, Edwards WD. Incidence and size of patent foramen ovale during the first 10 decades of life: an autopsy study of 965 normal hearts. *Mayo Clin Proc*. 1984;59(1):17-20.
36. Cantais E, Louge P, Suppini A, Foster PP, Palmier B. Right-to-left shunt and risk of decompression illness with cochleovestibular and cerebral symptoms in divers: case control study in 101 consecutive dive accidents. *Crit Care Med*. 2003;31(1):84-8.
37. Gempp E, Blatteau JE, Stephant E, Louge P. Relation between right-to-left shunts and spinal cord decompression sickness in divers. *Int J Sports Med*. 2009;30(2):150-3.
38. Wilmshurst PT, Pearson MJ, Walsh KP, Morrison WL, Bryson P. Relationship between right-to-left shunts and cutaneous decompression illness. *Clin Sci (Lond)*. 2001;100(5):539-42.
39. Fahlman A, Dromsky DM. Dehydration effects on the risk of severe decompression sickness in a swine model. *Aviat Space Environ Med*. 2006;77(2):102-6.
40. Leffler CT. Effect of ambient temperature on the risk of decompression sickness in surface decompression divers. *Aviat Space Environ Med*. 2001;72(5):477-83.

41. Pougnet R, Costanzo LD, Lodde B, Henckes A, Dherbecourt L, Lucas D, et al. Cardiovascular risk factors and cardiovascular risk assessment in professional divers. *Int Marit Health*. 2012;63(3):164-9.
42. Doolette DJ. Venous gas emboli detected by two-dimensional echocardiography are an imperfect surrogate endpoint for decompression sickness. *Diving Hyperb Med*. 2016;46(1):4-10.
43. Papadopoulou V, Germonpre P, Cosgrove D, Eckersley RJ, Dayton PA, Obeid G, et al. Variability in circulating gas emboli after a same scuba diving exposure. *Eur J Appl Physiol*. 2018;118(6):1255-64.
44. Thom SR, Bennett M, Banham ND, Chin W, Blake DF, Rosen A, et al. Association of microparticles and neutrophil activation with decompression sickness. *J Appl Physiol* (1985). 2015;119(5):427-34.
45. Pontier JM, Gempp E, Ignatescu M. Blood platelet-derived microparticles release and bubble formation after an open-sea air dive. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2012;37(5):888-92.
46. Vince RV, McNaughton LR, Taylor L, Midgley AW, Laden G, Madden LA. Release of VCAM-1 associated endothelial microparticles following simulated SCUBA dives. *Eur J Appl Physiol*. 2009;105(4):507-13.
47. Golding FC, Griffiths P, Hempleman HV, Paton WD, Walder DN. Decompression sickness during construction of the Dartford Tunnel. *Br J Ind Med*. 1960;17:167-80.
48. Francis T, Smith D, editors. *Describing Decompression Illness* 1991.
49. Howle LE, Weber PW, Vann RD, Campbell MC. Marginal DCS events: their relation to decompression and use in DCS models. *J Appl Physiol* (1985). 2009;107(5):1539-47.
50. Germonpre P, Balestra C, Obeid G, Caers D. Cutis Marmorata skin decompression sickness is a manifestation of brainstem bubble embolization, not of local skin bubbles. *Med Hypotheses*. 2015;85(6):863-9.
51. Brunner FP, Frick PG, Buehlmann AA. Post-Decompression Shock Due to Extravasation of Plasma. *Lancet*. 1964;1(7342):1071-3.
52. Slade JB, Jr., Hattori T, Ray CS, Bove AA, Cianci P. Pulmonary edema associated with scuba diving : case reports and review. *Chest*. 2001;120(5):1686-94.
53. Papadopoulou V, Evgenidis S, Eckersley RJ, Mesimeris T, Balestra C, Kostoglou M, et al. Decompression induced bubble dynamics on ex vivo fat and muscle tissue surfaces with a new experimental set up. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2015;129:121-9.
54. Francis TJ, Pezeshkpour GH, Dutka AJ, Hallenbeck JM, Flynn ET. Is there a role for the autochthonous bubble in the pathogenesis of spinal cord decompression sickness? *J Neuropathol Exp Neurol*. 1988;47(4):475-87.
55. Stephant E, Gempp E, Blatteau JE. Role of MRI in the detection of marrow bubbles after musculoskeletal decompression sickness predictive of subsequent dysbaric osteonecrosis. *Clin Radiol*. 2008;63(12):1380-3; discussion 4-5.
56. Hansen K, Hansen ES, Tolbod LP, Kristensen MC, Ringgaard S, Brubakk AO, et al. A CT-, PET- and MR-imaging-compatible hyperbaric pressure chamber for baromedical research. *Diving Hyperb Med*. 2015;45(4):247-54.
57. Nishi RY. The Scattering and Absorption of Sound Waves by a Gas Bubble in a Viscous Liquid. *Acta Acustica united with Acustica*. 1975;33(2):65-74.
58. Abbott JG. Rationale and derivation of MI and TI--a review. *Ultrasound Med Biol*. 1999;25(3):431-41.

59. Le DQ, Dayton PA, Tillmans F, Freiburger JJ, Moon RE, Denoble P, et al. Ultrasound in decompression research: fundamentals, considerations, and future technologies. *Undersea Hyperb Med.* 2021;48(1):59-72.
60. Pollock N. Use of ultrasound in decompression research. *Diving and Hyperbaric Medicine.* 2007;37.
61. Hugon J, Metelkina A, Barbaud A, Nishi R, Bouak F, Blatteau JE, et al. Reliability of venous gas embolism detection in the subclavian area for decompression stress assessment following scuba diving. *Diving Hyperb Med.* 2018;48(3):132-40.
62. Spencer MP, Johanson DC. Investigation of New Principles for Human Decompression Schedules Using Doppler Ultrasonic Blood Bubble Detection. Seattle, WA: Institute of Environmental Medicine and Physiology 1974.
63. Kisman K, Masurel G, Guillerm R. Bubble Evaluation Code for Doppler Ultrasonic Decompression Data (Abstract). *Undersea Biomedical Research.* 1978;5.
64. Chappell MA, Payne SJ. A method for the automated detection of venous gas bubbles in humans using empirical mode decomposition. *Ann Biomed Eng.* 2005;33(10):1411-21.
65. Cialoni D, Pieri M, Balestra C, Marroni A. Dive Risk Factors, Gas Bubble Formation, and Decompression Illness in Recreational SCUBA Diving: Analysis of DAN Europe DSL Data Base. *Front Psychol.* 2017;8:1587.
66. Swan JG, Bollinger BD, Donoghue TG, Wilbur JC, Phillips SD, Alvarenga DL, et al. Microbubble detection following hyperbaric chamber dives using dual-frequency ultrasound. *Journal of Applied Physiology.* 2011;111(5):1323-8.
67. Çimşit M, Toklu AS, Akkaş B, Aktaş S, Aydın S. A diving operation on the wreck of Yevstafy. In: Marroni A, Oriani G, Wattel F, editors. *Proceedings of International Joint Meeting on Diving and hyperbaric Medicine*; 4- 8 Sept, 1996; Milano, Italy.1996. p. 293-7.
68. Kocaman F, Günsenin SN, Aktaş Ş, Toklu AS. A diving operation on the wreck of Camalti Burnu-1; interim report. 28th Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society; 4-8 Eylül 2002; Brugge, Belçika2002. p. 200-.
69. Lindfors OH, Raisanen-Sokolowski AK, Suvilehto J, Sinkkonen ST. Middle ear barotrauma in diving. *Diving Hyperb Med.* 2021;51(1):44-52.
70. Brown M, Jones J, Krohmer J. Pseudoephedrine for the prevention of barotitis media: a controlled clinical trial in underwater divers. *Ann Emerg Med.* 1992;21(7):849-52.
71. Jones JS, Sheffield W, White LJ, Bloom MA. A double-blind comparison between oral pseudoephedrine and topical oxymetazoline in the prevention of barotrauma during air travel. *Am J Emerg Med.* 1998;16(3):262-4.
72. Millan SB, Hontz-Geisinger CA, Rooks BJ, Wahl AM, Covington DB. Prevention of middle ear barotrauma with oxymetazoline/fluticasone treatment. *Undersea Hyperb Med.* 2021;48(2):149-52.
73. Gempp E, Louge P, Blatteau JE, Hugon M. Descriptive epidemiology of 153 diving injuries with rebreathers among French military divers from 1979 to 2009. *Mil Med.* 2011;176(4):446-50.
74. Ciarlone GE, Hinojo CM, Stavitzski NM, Dean JB. CNS function and dysfunction during exposure to hyperbaric oxygen in operational and clinical settings. *Redox Biol.* 2019;27:101159.
75. Aviner B, Arieli R, Yalov A. Power Equation for Predicting the Risk of Central Nervous System Oxygen Toxicity at Rest. *Front Physiol.* 2020;11:1007.

76. Tufan K, Ademoglu A, Kurtaran E, Yildiz G, Aydin S, Egi SM. Automatic detection of bubbles in the subclavian vein using Doppler ultrasound signals. *Aviat Space Environ Med.* 2006;77(9):957-62.
77. Germonpre P, Van der Eecken P, Van Renterghem E, Germonpre FL, Balestra C. First impressions: Use of the Azoth Systems O'Dive subclavian bubble monitor on a liveaboard dive vessel. *Diving Hyperb Med.* 2020;50(4):405-12.
78. Brubakk AO, Arntzen AJ, Wienke BR, Koteng S. Decompression profile and bubble formation after dives with surface decompression: experimental support for a dual phase model of decompression. *Undersea Hyperb Med.* 2003;30(3):181-93.
79. Sawatzky KD, Nishi RY. Assessment of inter-rater agreement on the grading of intravascular bubble signals. *Undersea Biomed Res.* 1991;18(5-6):373-96.
80. Gardette B. Correlation between decompression sickness and circulating bubbles in 232 divers. *Undersea Biomed Res.* 1979;6(1):99-107.
81. Pollock NW, Natoli MJ, Gerth WA, Thalmann ED, Vann RD. Risk of decompression sickness during exposure to high cabin altitude after diving. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(11):1163-8.
82. Ljubkovic M, Dujic Z, Mollerlokken A, Bakovic D, Obad A, Breskovic T, et al. Venous and arterial bubbles at rest after no-decompression air dives. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(6):990-5.
83. Gutvik CR, Brubakk AO. A dynamic two-phase model for vascular bubble formation during decompression of divers. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2009;56(3):884-9.
84. Blatteau JE, Hugon J, Gempp E, Castagna O, Peny C, Vallee N. Oxygen breathing or recompression during decompression from nitrox dives with a rebreather: effects on intravascular bubble burden and ramifications for decompression profiles. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(6):2257-65.
85. Blogg SL, Gennser M, Mollerlokken A, Brubakk AO. Ultrasound detection of vascular decompression bubbles: the influence of new technology and considerations on bubble load. *Diving Hyperb Med.* 2014;44(1):35-44.
86. Brebeck AK, Deussen A, Range U, Balestra C, Cleveland S, Schipke JD. Beneficial effect of enriched air nitrox on bubble formation during scuba diving. An open-water study. *J Sports Sci.* 2018;36(6):605-12.
87. Eftedal OS, Lydersen S, Brubakk AO. The relationship between venous gas bubbles and adverse effects of decompression after air dives. *Undersea Hyperb Med.* 2007;34(2):99-105.
88. Hamilton RW, Thalmann E. Decompression practice. In: Brubakk A, Neuman T, editors. *Bennett and Elliot's Physiology and Medicine of Diving 5th Edition.* London: Saunders; 2003. p. 453-98.
89. Van Liew HD, Burkard ME. Density of decompression bubbles and competition for gas among bubbles, tissue, and blood. *J Appl Physiol (1985).* 1993;75(5):2293-301.
90. Anderson D, Nagasawa G, Norfleet W, Olszowka A, Lundgren C. O₂ pressures between 0.12 and 2.5 atm abs, circulatory function, and N₂ elimination. *Undersea Biomed Res.* 1991;18(4):279-92.
91. Walker JR HG, Gault KA, Howle LE, Freiberger JJ. Decompression Risk Analysis Comparing Oxygen And 50% Nitrox Decompression Stops. 2007/1/1=02.01.2007:-.
92. Blatteau JE, Pontier JM. Effect of in-water recompression with oxygen to 6 msw versus normobaric oxygen breathing on bubble formation in divers. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106(5):691-5.

93. Pontier JM, Lambrechts K. Effect of oxygen-breathing during a decompression-stop on bubble-induced platelet activation after an open-sea air dive: oxygen-stop decompression. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114(6):1175-81.
94. Pendergast DR, Senf CJ, Fletcher MC, Lundgren CE. Effects of ambient temperature on nitrogen uptake and elimination in humans. *Undersea Hyperb Med.* 2015;42(1):85-94.
95. Balldin UI, Lundgren CE. Effects of immersion with the head above water on tissue nitrogen elimination in man. *Aerosp Med.* 1972;43(10):1101-8.
96. Gerth WR, VL; Long, ET. The Influence of Thermal Exposure on Diver Susceptibility to Decompression Sickness. 2007/1/1=02.01.2007:-.
97. Risberg J. Acclimatization to diving: a systematic review. *Undersea Hyperb Med.* 2021;48(2):127-47.

