



Atmosferden PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁ parçacıkları eş zamanlı olarak toplayabilecek, ekonomik bir örnekleme sisteminin geliştirilmesi

Program Kodu: 1005

Proje No: 114Y160

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. S. Gürdal TUNCEL

Bursiyer(ler):
Ömer ATEŞ

TEMMUZ 2016
ANKARA

1. İÇİNDEKİLER

1	İÇİNDEKİLER	1
2	TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ	2
3	GİRİŞ	5
3.1	PM NEDİR	5
3.2	PM10, PM2.5 ve PM1 boyut grupları	5
3.3	PM kaynakları	7
3.3.1	Doğal PM kaynakları	9
3.3.2	Antropojenik PM kaynakları	11
3.4	PM'in çevresel etkileri	14
3.4.1	Atmosferdeki parçacıkların sağlık etkileri	14
3.4.2	Parçacıkların pus (haze) oluşumuna etkileri	16
3.4.3	Partiküler maddenin hidrolojik döngüye etkileri	18
3.4.4	Partiküler maddenin iklim değişikliğindeki rolü	19
3.5	PM örnekleme sistemleri	20
3.5.1	Düşük hacimli örnekleme sistemleri	20
3.5.2	Yüksek hacimli örnekleme sistemleri	25
3.5.3	Örneklemede kullanılan filtreler	28
3.6	PM örneklemede hava akış hızının önemi ve kontrolü	28
3.6.1	Kütlesel hava akış kontrol üniteleri (Mass Flow Controller – MFC)	29
3.6.2	Hava akışının kritik orifis kullanılarak kontrol edilmesi	29
4.	Deneysel	31
4.1.	Çalışmanın yapıldığı yer	31
4.2.	Cihazın yapımında uygulanan genel strateji	32
4.2.1.	Cihazın genel yapısının oluşturulması	33
4.2.2.	Hangi bileşenlerin kullanılacağına tespiti	34
4.2.3.	Bileşenlerin temini	34
4.2.4.	Cihazın MFC kullanılarak oluşturulması	35
4.2.5.	Akım kontrollerinin yapılması ve cihazın çalışır hale getirilmesi	36
4.2.6.	MFC'lerin kritik orifislerle değiştirilmesi	37
4.2.7.	Örnekleyiciden geçen hava akım hızını dakikalık olarak kaydedecek bir kontrol ünitesinin tasarımı ve yaptırılması	38
4.2.8.	Cihazın bir kabin içerisine yerleştirilmesi	38
4.2.9.	Validasyon çalışmaları	38
4.3.	Örnekleyicinin bileşenleri	38
4.3.1.	Bileşenlerin tanıtılması	38



5.1.	Örnekleyicinin Kütlesel debi kontrolü ile oluşturulması	48
5.1.1.	Sistemin bir araya getirilmesi	48
5.1.2.	Örnekleyicinin kütlesel debi kontrol üniteleri kullanılarak oluşturulması ve hava akış hızlarının izlenmesi	50
5.1.3.	Geri besleme sisteminin yaptırılması	51
5.1.4.	MFC ile çalıştırılan örnekleyicinin "Stack Filter Unit" örnekleyici ile karşılaştırılması	52
5.2.	Örnekleme sisteminin kritik orifis kullanılarak çalıştırılması	55
5.3.	Değişik filtre türlerinin hava akış hızına etkisi	56
5.4.	Tekrarlanabilirlik testleri	61
5.5.	Kontrol ünitesinin yaptırılması	62
5.5.1	Örnekleme Sistemi Mikro Denetleyici Programı	64
5.5.2.	Cihazın Kullanımı	65
5.5.	Örnekleme sisteminin bir kabin içerisine yerleştirilmesi	66
5.6.	Validasyon çalışmaları	68
5.7.	Dördüncü kanalın kullanılmasına yönelik çalışmalar	72
5.8.	Geliştirilen örnekleyicinin piyasada bulunan diğer örnekleyicilerle karşılaştırılması	
6	KAYNAKÇA	74

2 TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ

- Şekil 1. Atmosferik parçacıkların boyut dağılımı
- Şekil 2. Atmosferik parçacıkların boyut dağılımı ve tipik kaynakları
- Şekil 3. ABD'de $PM_{2.5}$ ve PM_{10} parçaların kaynak sınıflarına göre salımları
- Şekil 4. $PM_{2.5}$ bileşenlerinin ve onların öncülerinin evrensel kaynakları
- Şekil 5. 7 ABD şehrindeki trafik kaynaklı $PM_{2.5}$ kaynak dağılımı
- Şekil 6. New York, 1992 PM_{10} kaynak belirleme çalışmasının sonuçları
- Şekil 7. Parçacıkların boyutlarına göre solunum sistemine nüfuzları
- Şekil 8. Farklı hava kirleticilerinin her $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ artışı için bağıl ölüm riskleri
- Şekil 9. Kirleticilerin pus oluşturarak görüş mesafesi kısaltma mekanizmaları
- Şekil 10. Dichotomous hava örnekleyici
- Şekil 11. Stack filter ünitesi şematik gösterimi
- Şekil 12. 8 kademeli Andersen basamaklı impactor
- Şekil 13. RespiCon parçacık örnekleyici
- Şekil 14. Model 290 Marple kişisel basamaklı impaktör
- Şekil 15. Toplam askıda partiküler madde örnekleyici
- Şekil 16. Yüksek hacimli PM_{10} örnekleyici
- Şekil 17. $PM_{1.0/2.5/10}$ Trichotomous örnekleyici. a) Monte edilmiş örnekleyici; b) $2.5 \mu\text{m}$ HVVI; c) $1.0 \mu\text{m}$ HVVI. A- PM_{10} giriş; B- Ara hazne; C- taban; D- $2.5 \mu\text{m}$ HVVI; E- $1.0 \mu\text{m}$ HVVI; F-Nihai filtre
- Şekil 18. Çalışmada kullanılan istasyonun yeri
- Şekil 19. Çalışmada kullanılan istasyonun fotoğrafı
- Şekil 20. Proje teklifinde sunulan tasarım
- Şekil 21. Cihazın ilk montaj çalışmaları sırasındaki durumu
- Şekil 22. PM_{10} siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi
- Şekil 23. $PM_{2.5}$ siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi
- Şekil 24. PM_1 siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi
- Şekil 25. Filtre tutucular ve teknik özellikleri
- Şekil 26. Çalışmada kullanılan kütleli akış hızı kontrol ünitesi
- Şekil 27. Çalışmada kullanılan pompa ve teknik özellikleri
- Şekil 28. Kullanılan kritik orifislerin fotoğrafı ve teknik özellikleri
- Şekil 29. Çalışmada kullanılan manifold ve "hızlı" bağlantılar
- Şekil 30. Kütleli hava akış hızı kontrol ünitesi kullanılarak oluşturulan örnekleyicinin teknik özellikleri

- Şekil 31. MFC'ler kullanılarak oluşturulan örnekleyiciden elde edilen hava akış hızı kalibrasyon eğrileri
- Şekil 32. MFC'ler için yaptırılan geri besleme sisteminin fotoğrafı
- Şekil 33. MFC'ler için yaptırılan geri besleme sisteminin elektrik diyagramı
- Şekil 34. Örnekleyicinin geçici kabine yerleştirilmiş hali
- Şekil 35. MFC kullanarak oluşturulan örnekleyiciden elde edilen PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_{10} konsantrasyonlarının "stack filter unit" örnekleyicisinden elde edilen $PM_{2.5}$ ve PM_{10} kütleli konsantrasyonları ile karşılaştırılması
- Şekil 36. Örnekleyicinin kritik orifisler kullanılarak oluşturulan halinin teknik gösterimi
- Şekil 37. Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 1: Teflon filtre
- Şekil 38. Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 2: Nuclepore filtre
- Şekil 39. Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 3: Nuclepore filtre, 1 kanal ve 1 pompa
- Şekil 40. Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 4: Nuclepore filtre, 3 kanal ve 2 pompa
- Şekil 41. Tekrarlanabilirlik testinin sonuçları
- Şekil 42. Kontrol modülünün örnekleme istemindeki görünümü
- Şekil 43. Kontrol modülünün akım diyagramı
- Şekil 44. Örnekleyicinin yerleştirildiği kabinin teknik özellikleri
- Şekil 45. Kabinin dış görünümü
- Şekil 46. Örnekleme sisteminin kabine yerleştirilmiş hali
- Şekil 47. PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 örneklerinde toplanan parçacıkların kütleli konsantrasyonlarının zaman içerisindeki değişimi
- Şekil 48. Tasarlanan örnekleyici, dichotomous örnekleyici ve stack filter unit ile ölçülen PM_{10} ve $PM_{2.5}$ kütleli konsantrasyonları
- Tablo 1. SFU, dichotomous örnekleyici ve bu çalışmada tasarlanan örnekleyici ile ölçülen PM fraksiyonlarının kütleli konsantrasyonlarının istatistik değerleri.
- Tablo 2. Örnekleyicide kullanılan parçaların fiyatları
- Tablo 3. Örnekleyicinin MFC kullanılması durumundaki maliyeti
- Tablo 4. Örnekleyicinin kritik orifis kullanılması durumundaki fiyatı
- Tablo 5. Piyasadaki bu çalışmada geliştirilen örnekleyici ile karşılaştırılabilecek ticari örnekleyici fiyatları
- Tablo 6. Örnekleyicinin sadece $PM_{2.5}$ parçacıkları toplayacak şekilde tasarlanması halinde maliyeti



GİRİŞ

1.1 PM NEDİR

Partiküler madde (PM), mikroskopik ölçekteki katı ve sıvı parçacıklarından oluşan, atmosferde askıda bulunan karmaşık yapıda bir kirlenici karışımdır. Partiküler maddenin bileşimi geniş bir ölçekte çeşitlilik göstermektedir. Genellikle iyonlar, organik bileşikler, doğal ve antropojenik kökenli elementler, elementel karbon parçacıkların bileşenlerini oluşturmaktadır (EPA, 2013). Bu bileşenlerden parçacıklarda en çok bulunanları sülfat, nitrat, amonyak gibi iyonlarla, deniz tuzu kaynaklı sodyum ve klor ile özellikle kentsel ve endüstriyel atmosferlerde elementel karbon olmaktadır. Atmosferde bulunan aerosol kütlesi içerisinde yüksek düzeylerde bulunan diğer bir bileşen de toprak parçacıkları ve bunlara bağlı olan litofilik element grubudur (Dünya Sağlık Örgütü, 2014).

Partiküler madde, hava kirliliği çalışmalarında büyük bir öneme sahip olup, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından tanımlanmış altı ortak kirleniciden (öncelikli kirleniciler) birisi olarak belirlenmiştir. Bu altı ortak kirleniciden diğerleri ise, troposferdeki ozon (O_3), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO_2), azot dioksit (NO_2) ve kurşun (Pb) olarak belirtilmiştir (EPA, 2015b). Bu tanımlamayla birlikte partiküler madde ve diğer öncelikli kirleniciler, ABD'de 1980 tarihli Temiz Hava Kanunu (Clean Air Act) ve bu kanun çerçevesinde hazırlanmış olan Ulusal Açık Hava Kalite Standartları (NAAQS) uyarınca takip edilmekte ve yönetilmektedir (EPA, 2015b). Ülkemizde ise bu denetim, Çevre Kanunu'nun Ek 6'ncı maddesi ve Avrupa Birliği direktifleri doğrultusunda Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği uyarınca sağlanmaktadır.

Geçmişteki hava kirliliği olaylarının sebep olduğu ölümler ve ciddi sağlık sorunları ve konuyla ilgili yapılmış epidemiyoloji ve toksikoloji çalışmalarının getirdiği bilgi birikimini göz önüne alındığında partiküler maddenin insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi etkilere sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir. Nitekim Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da dünya çapında en önemli 13'ncü sağlık kaynaklı ölüm sebebi olarak tespit edilmiş olması da partiküler maddenin ciddi sağlık etkileri olduğunun bir göstergesidir (Anderson vd., 2012).

1.2 PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 boyut grupları

Atmosferde bulunan partiküler madde boyut dağılımını anlamak, partiküler maddelerin kaynakları, davranışları ve üretim mekanizmalarının anlaşılması için büyük bir önem arz etmektedir. Zira parçacıkların sağlık ve çevresel etkilerinin seviyesi, boyutlarıyla doğrudan ilintilidir. Parçacıkların aerodinamik çapları küçüldükçe, solunum sistemine daha rahat girebildikleri ve üst solunum yollarında tutulmadan daha derinlere ilerleyebildikleri için sağlık açısından

daha tehlikeli olmaktadır. Ayrıca küçük parçacıkların atmosferde kalma süreleri (residence time) de arttığı için çevresel etkilerinin boyutları da daha büyük hale gelmektedir. (Fuzzi vd., 2015; Radke vd., 1991; WHO, 2003)

Partiküler madde, EPA tarafından kaba ve ince olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır, dünya çapında da genel olarak bu sınıflandırma kullanılmaktadır. Kaba parçacıklar 10 μm 'dan küçük parçacıkları (PM_{10}), ince parçacıklar ise 2.5 μm 'dan küçük parçacıkları ($\text{PM}_{2.5}$) temsil etmektedir (EPA, 2013).

PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$ parçacık grupları uzun süredir ölçülmektedir ve bir çok yerde ölçüm sonuçları ulusal veri tabanlarında toplanmaktadır. Ancak son yıllarda, 1 μm 'dan daha küçük parçacıklar (PM_1) giderek önem kazanmakta ve çalışmalar bunlar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Önceki bölümde de belirtildiği gibi, parçacıkların boyutu küçüldükçe solunum sisteminde daha derinlere ilerlediği ve zararlı etkilerinin arttığı epidemiyolojik çalışmalarla tespit edilmiştir. Bu yüzden, çok küçük parçacıkları da temsil edecek yeni bir boyut grubuna ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır ve PM_1 parçacık grubu bu ihtiyacı karşılayan bir standart olarak kabul görmeye başlamıştır. EPA tarafından kaba (PM_{10}) ve ince ($\text{PM}_{2.5}$) şeklinde yapılmış olan parçacık boyut sınıflandırmasının aksine, (Whitby, 1978) üç modlu (trimodal) bir parçacık boyut sınıflandırması öngörmüştür. Bu sınıflandırmaya göre parçacıklar ince mod (PM_1), ara mod ($\text{PM}_{2.5}$) ve kalın mod (PM_{10}) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadırlar (Marple, Lundgren, & Olson, 2014).

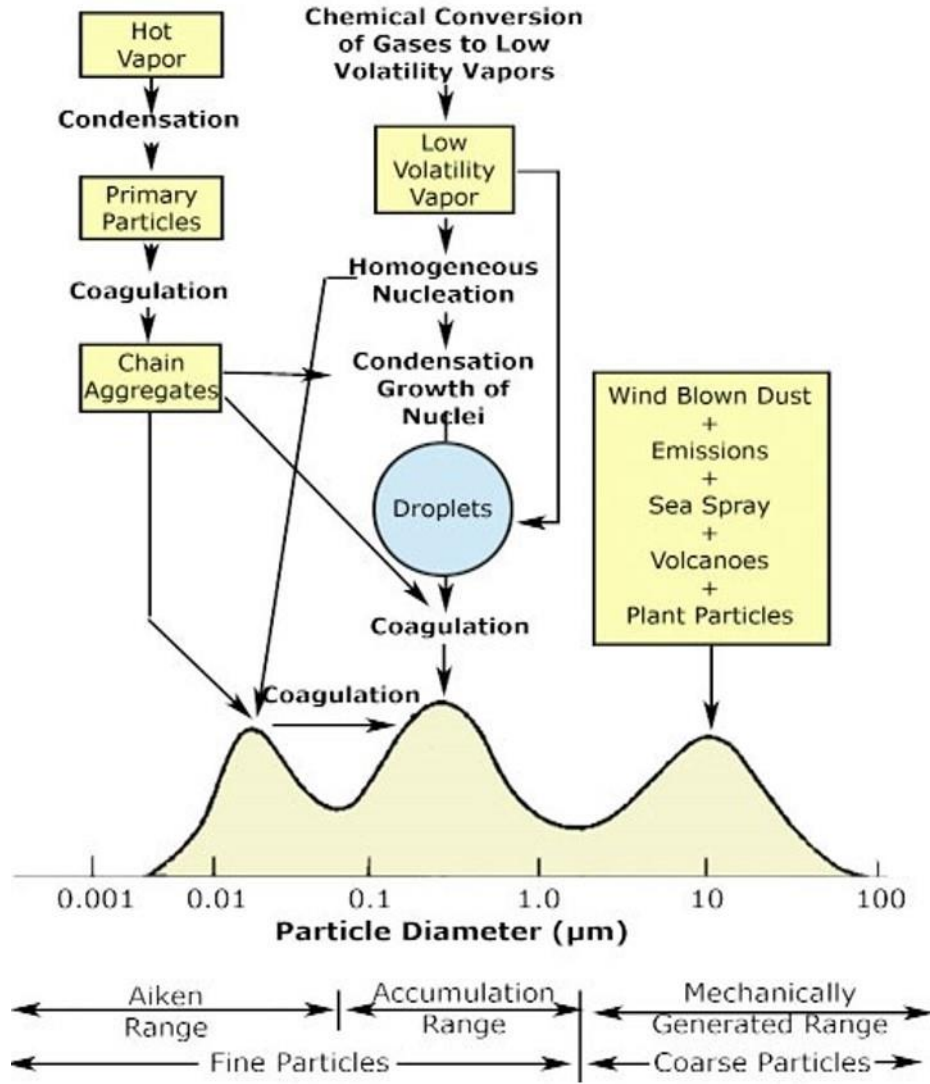
Atmosferde bulunan parçacıkların boyut dağılımı Şekil 1'de, her boyut aralığında öne çıkan kaynaklar ve oluşum mekanizmaları ise Şekil 2'de gösterilmiştir

1.3 PM kaynakları

Partiküler madde kirliliği doğal ve antropojenik (insan kaynaklı) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu kaynaklar birincil (doğrudan atmosfere salınan parçacıklar) ya da ikincil parçacıkların (çeşitli reaksiyonlar sonucu atmosferde oluşan) atmosfere salıma sebep olmaktadır.

EPA tarafından hazırlanan ABD Ulusal Emisyon Envanterindeki $\text{PM}_{2.5}$ ve PM_{10} salımlarının kaynaklarına göre dağılımı Şekil 3'de gösterilmiştir (EPA 2016c). Bu sonuçlara göre ABD'de en büyük $\text{PM}_{2.5}$ kaynağı yangınlar olup bunu toz parçacıkları ve tarımsal salımlar izlemektedir. PM_{10} salımlarında ise toz parçacıklarının açık farkla en büyük kaynak olduğu ve tozu tarımsal salımlar ve yangın kaynaklı salımların izlediği görülmektedir. Buradan doğal kaynakların

genellikle daha çok kaba parçacık, antropojenik kaynakların da daha çok ince parçacık salımı yaptığı sonucuna varmak mümkündür (EPA, 2016c).

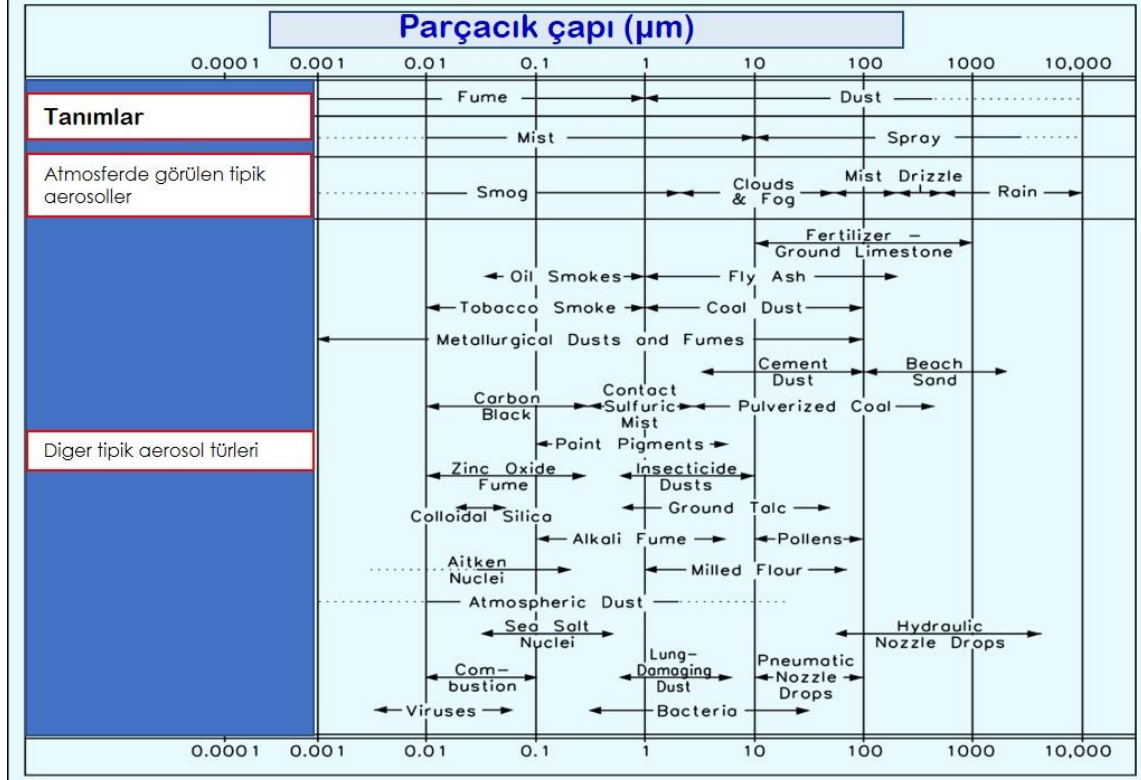


Şekil 1. Atmosferik parçacıkların boyut dağılımı

Atmosferde bulunan partiküller maddenin kütlece %90'ı doğal kaynaklardan gelmektedir (Voiland, 2010); ancak kalan %10'luk kısmı oluşturan antropojenik kaynaklar belirli yerlerde yoğunlaşmış olduğu için, kentlerde ve endüstri bölgelerinde ölçülen kirletici düzeyleri büyük ölçüde antropojenik kökenli olmaktadır (NRC, 2010; Voiland, 2010). Bunun temelinde yatan neden, antropojenik kaynaklardan yapılan Partiküller madde salımları ağırlıklı olarak ince ve çok ince parçacık gruplarına ait olmasıdır. Bu tür ince parçacıkların atmosferdeki yaşam süreleri daha uzun olduğundan gerek sayıları ve gerekse

kütlesel konsantrasyonları yüksek düzeylere ulaşabilmektedirler (Carruthers vd., 2005; NRC, 2010).

Çeşitli kaynakların kent atmosferindeki kirleticilerin önemli bir bölümünü



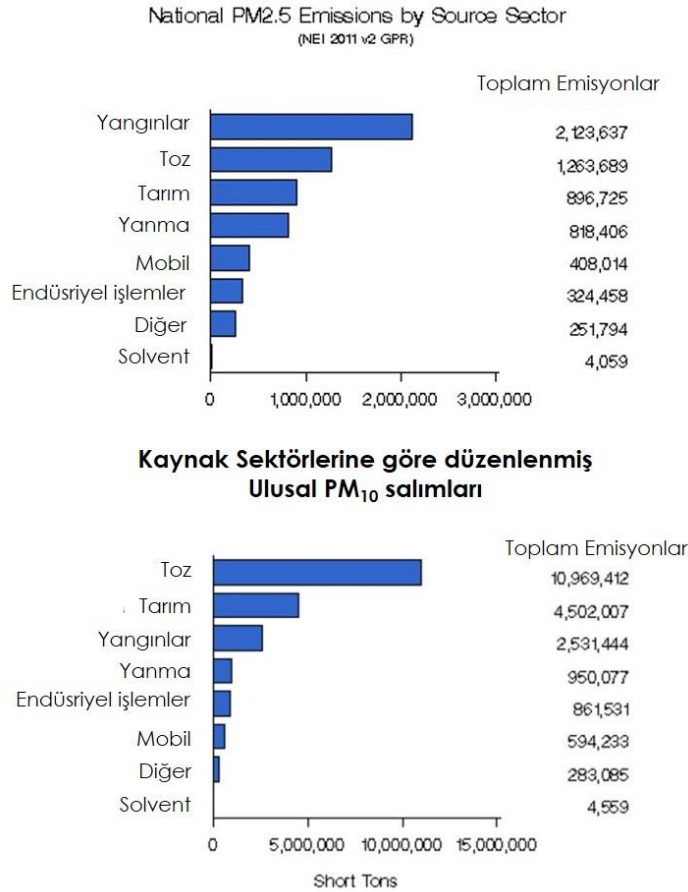
Şekil 2. Atmosferik parçacıkların boyut dağılımı ve tipik kaynakları (Malm, 1999).

oluşturan kükürt dioksit, amonyak, siyah karbon ve organik madde miktarına katkıları Şekil 4'de özetlenmiştir. Şekildeki noktaların boyutları söz konusu kaynağın, karşılık geldiği bileşenin salımına yaptığı katkıyı oransal olarak temsil etmektedir. Bu oranlama, her kolondaki alanların toplamının eşit bir alana karşılık gelecek şekilde yapılmıştır (NRC, 2010).

1.3.1 Doğal PM kaynakları

Atmosferde en yaygın olarak bulunan doğal parçacık türleri rüzgâr ile yerden kalkan toz parçacıkları, deniz ve okyanuslardan salınan deniz tuzu parçacıkları , volkanik kaynaklı parçacıklar ve doğal orman yangınları sonucu salınan parçacıklardır (NSW EPA, 2013). Bu türler arasında atmosferdeki konsantrasyonu en yüksek olanlar mineral tozu ve deniz tuzu parçacıklarıdır.

Bu iki en önemli kaynaktan biri olan mineral tozu, toprak erozyonu, kum fırtınaları, toprak parçacıklarının yol zemininden ve topraktan havalanması gibi olaylardan kaynaklanmaktadır (Fuzzi vd., 2015). Dünya üzerinde en önemli toz kaynağı çöller olup, çöller arasında da en çok çalışılan ve en iyi karakterize edilmiş olanı Sahra Çölüdür (Fuzzi vd., 2015). Doğal kökenli toz salımları PM_{10} grubu parçacık salımlarının oransal olarak en büyük kısmını oluşturmaktadır (EPA, 2016c; NSW EPA, 2013). Bu kaynaklar demir, alüminyum, silisyum, kalsiyum, potasyum, magnezyum, manganez, nadir toprak elementleri ve diğer litofilik elementlerin atmosferdeki en önemli kaynağıdır (Appel vd., 2013; Houghton vd., 2001; Perraud vd., 2012). Her ne kadar doğal olsa da toz parçacıkları bazı yerlerde hava kalitesi standartlarının aşılmasına neden olmaktadır. Buna örnek olarak Sahra kaynaklı toz taşınımının, Avrupa şehirlerinde, özellikle de Akdeniz kıyısındaki şehirlerde, partiküler madde için belirlenmiş hava kalitesi standartlarının aşılmasına neden olması gösterilebilir (Fuzzi vd., 2015)



Şekil 3: ABD'de $PM_{2.5}$ ve PM_{10} parçaların kaynak sınıflarına göre salımları (EPA, 2016c).

Toz salımlarının %75'i doğal kaynaklar tarafından yapılırken, kalan %25'inin insan aktivitelerinden kaynaklandığı görülmektedir (Fuzzi vd., 2015). Örneğin ormanların yakılması sonucu açılan arazilerden havalandan toz parçacıkları

doğal değil antropojenik kökenli sayılmaktadır. Bu tür kaynakların toplam toz salımına katkısı her geçen yıl artmaktadır.

		PM _{2.5} ve öncülleri			
		SO ₂	NH ₃	Karbon	Organik Madde
Enerji	Elektrik Üretimi	●	•	•	•
	Üretim Endüstrisi	●	•	●	●
	Taşımacılık	•	•	●	●
	Evler	•	•	●	●
	Tarım	•	●	•	•
Doğal Çevre	Orman Yangınları	•	•	●	●
	Biyojenik salımlar				●

Şekil 4 PM_{2.5} bileşenlerinin ve onların öncülerinin evrensel kaynakları (National Research Council, 2010)

Deniz ve okyanuslardan her yıl atmosfere 3 – 30 Pg (1 Pg = 10¹⁵g) deniz tuzu salınmaktadır (Lewis ve Schwartz, 2004). Atmosferdeki deniz tuzu parçacıkları hem güneş ışınlarını saçarak hem de bulut yoğunlaşma çekirdeği (CCN) olarak bulut oluşumunu arttırdığından dünyanın enerji bütçesinde önemli bir rol oynamaktadır (Grythe vd, 2014; Houghton vd., 2001).

Deniz tuzu parçacıklarının en önemli bileşeni sodyum klorür (NaCl) olsa da K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ gibi iyonlar, bazı eser elementleri ve çeşitli organik bileşikleri de içermektedir (O'Dowd vd., 2004). Deniz tuzu parçacıklarının oluşum mekanizmaları aşağıda sıralanmıştır (Grythe vd., 2014; Houghton vd., 2001; Monahan, vd. 1986):

- Köpüklü dalga oluşumu sırasında baloncuk patlaması; genelde 1µm'dan küçük olmak üzere ince parçacıklar oluşturmaktadır
- Okyanus yüzeyinde baloncuklar tarafından jet dolgusu; genellikle 1–10µm aralığında parçacıklar oluşturmaktadır



- Dalga tepelerindeki köpüklerin güçlü rüzgârlar tarafından yırtılması; daha kaba parçacıklar oluşturmaktadır, dolayısıyla oluşan parçacıkların atmosferde yaşam süreleri daha kısa olmaktadır.

Atmosferdeki parçacıkların diğer bir doğal kaynağı volkanlardır. Volkanlardan gaz ve partiküler fazda çeşitli bileşikler atmosfere salınsa da, ikisi çok önemlidir. Bunlardan birincisi, demir ve magnezyum bakımından zengin volkanik kül, ikincisi ise çoğunlukla SO₂ formunda olmak üzere gaz fazında kükürtdür (Houghton vd., 2001). Volkanik patlamalar sonucu salınan küller serbest troposfere ve hatta stratosfere kadar taşınabilmektedir. Volkanlar stratosferdeki sülfat tabakasının tek kaynağıdır. Doğrudan patlama kaynaklı salımların yanı sıra, volkanik küller yerleştikleri ortamlardan rüzgâr yoluyla havalanmakta ve atmosferik parçacıklara katılmaktadır (Langmann, 2013).

Orman yangınları da, ağaç ve çeşitli bitkilerin yanması yoluyla atmosfere çeşitli gazlar ve partiküler madde kompleksi saldıklarından atmosferdeki gaz ve parçacıkların doğal bir kaynağıdır (NSW EPA, 2013). Orman yangınlarından her yıl 20 Tg parçacık atmosfere salınmaktadır (Hinds, 1999) Orman yangınlarından kaynaklanan salımların büyük büyük bölümü eksik yanma ürünlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle de salınan parçacıkların çok büyük bir bölümü organik ve elementel karbondan oluşmaktadır (Franzi vd. 2011; Radke vd., 1991; Urbanski vd. 2009).

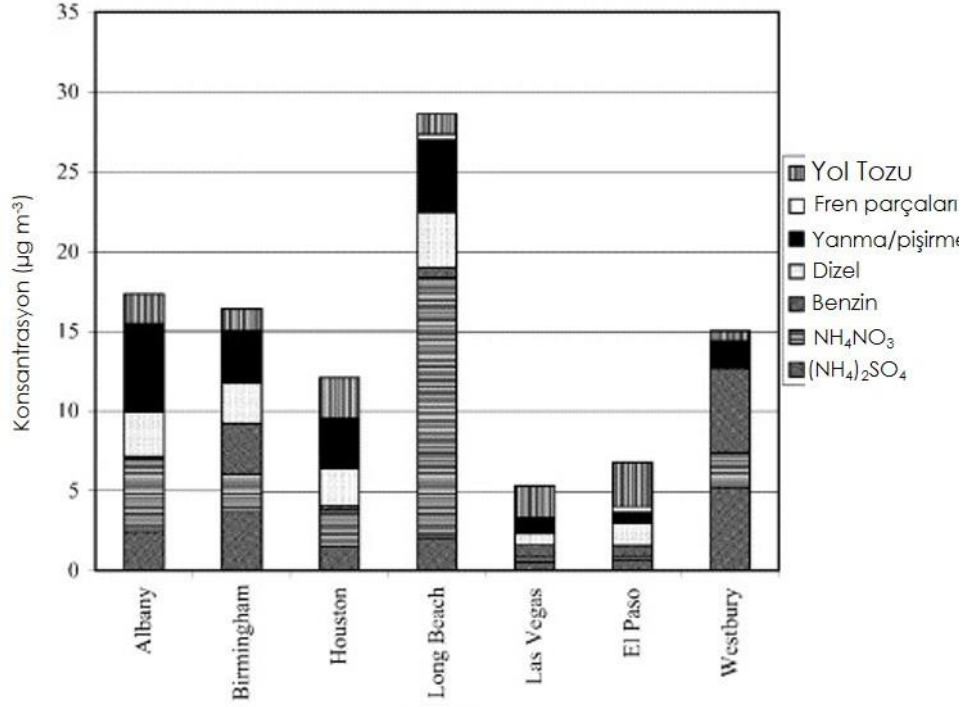
1.3.2 Antropojenik PM kaynakları

Antropojenik (insan kaynaklı) partikül madde kaynakları ikiye ayrılmaktadır; yerleşik (stationary) kaynaklar ve hareketli (mobile) kaynaklar. Yerleşik kaynaklar, evsel, ticari, tarımsal ve sanayi kaynaklardan oluşurken hareketli kaynaklar, otomobiller, uçaklar, trenler ve deniz araçları gibi motorlu taşıtlardan oluşmaktadır (EPA, 2015a; NRC, 2010).

İnsan kaynaklı partikül madde emisyonlarında yanma başı çeken kaynak olmaktadır (EPA, 2015a; NRC, 2010). Trafik kaynaklı emisyonlar, hem taşıtlardan doğrudan yapılan emisyonları, hem de taşıtların lastik ve fren aşınmaları, yollardaki yüzey tozlarının yeniden havalanması gibi dolaylı yoldan sebebiyet verdiği emisyonları kapsamaktadır (Avrupa Komisyonu, 1997). Motorlu taşıtlarda fosil yakıt kullanımı Fe, Al, Ca, Na, K, Ba, Se, S, Mn ve Pb gibi pek çok tehlikeli eser elementlerin atmosfere salınmasına neden olmaktadır (Lung ve Sheng, 2009; Omidvarborna vd., 2014; Robert vd., 2007).

Gertler (2005) tarafından Albany, Birmingham, Houston, Long Beach, El Paso and Westbury şehirlerinde yapılan çalışmada bu şehirlerdeki trafik kaynaklı partiküler madde emisyonlarının doğrudan ve dolaylı kaynaklara göre dağılımı Şekil 5'de gösterilmiştir.

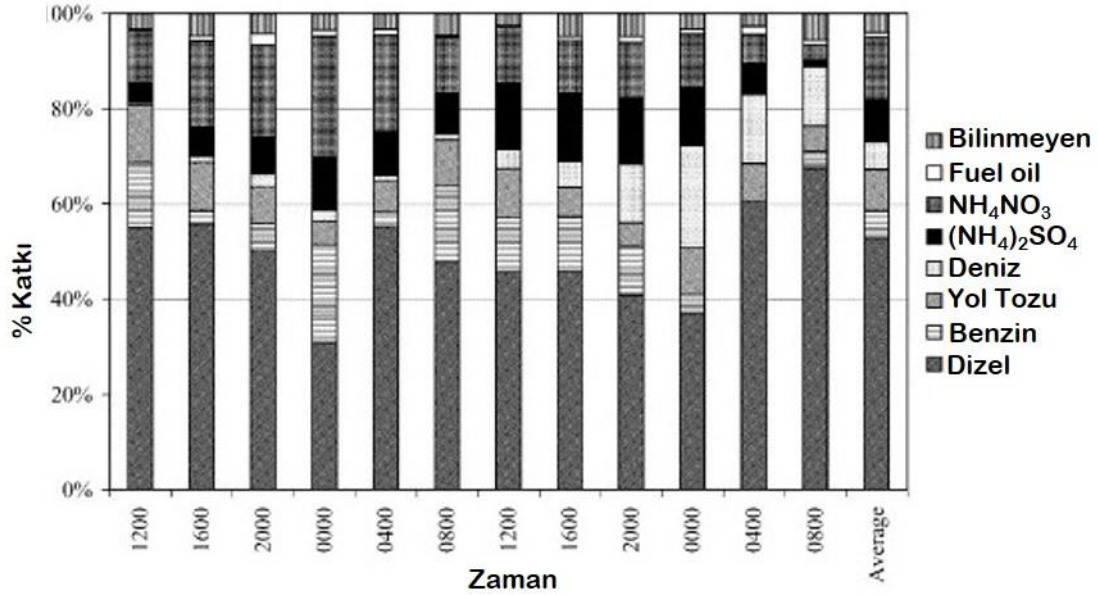
Şekilden de görülebileceği gibi, araç ezozlarından yapılan salımlar kent atmosferlerindeki en önemli parçacık kaynağıdır. Yapılan araştırmalar dizel kaynaklı emisyonların kentsel partiküler madde kirliliğinde diğerler kaynaklara göre daha yüksek bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Gertler (2005) New York'da PM ölçülen düzeylerine katkıda bulunan kaynaklar incelenmiş ve sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi trafik NY'da en önemli partikül madde kaynağıdır.



Şekil 5. 7 ABD şehrindeki trafik kaynaklı PM_{2.5} kaynak dağılımı (Gertler, 2005)

Güç santralleri, her tür hava kirleticisinin başlıca kaynaklarından biri olarak, partiküler madde emisyonlarında da önemli bir etkiye sahiptir ve özellikle de ince parçacık gruplarının salımında büyük bir öneme sahiptir (Avrupa komisyonu, 1997). Özellikle kömürlü güç santralleri, emisyonlarının çok büyük bir kısmını gerçekleştirmektedir. ABD Çevresel İşbirliği Komisyonu (CEC) raporuna göre, ABD'de partiküler madde salımına en çok katkıyı yapan 250 güç santralinden 241 tanesi (%96.4) yakıt olarak kömür kullanırken, sıvı yakıt (fuel-oil) kullananların sayısı 7 (%2.8), doğalgaz kullananların sayısı ise 2'dir (%0.8) (CEC, 2005). Kömür'lü güç santrallerinden yapılan partiküler madde emisyonlarının ana bileşenleri SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ olmaktadır (Zhang vd., 2005).

Evsel ısınma için kömür yakılması sırasında yapılan partikül madde salımları da üç santral kökenli salımlarla benzerlikler göstermektedir. Isınma bazlı partikül madde salımlarının büyük bir bölümü odun ve kömür yakılmasından kaynaklanmaktadır. Kömür karmaşık yapısında yüksek oranlarda karbon ve kükürt içerdiğinden, özellikle yanmanın tam olmadığı durumlarda yüksek partikül madde salımları gerçekleşebilmektedir. (EIA, 1999). Bu yakıtların aksine doğalgaz, basit kimyasal yapısı ve düşük karbon ve kükürt içeriği nedeniyle çok daha düşük seviyede partikül madde salımına neden olmaktadır (EPA, 1995). Nitekim birim enerji üretimi başına yapılan partikül madde emisyonu karşılaştırmaları da bunu göstermektedir. Buna göre, 1 milyar BTU enerji üretimi için partikül madde emisyonu miktarı, doğalgaz için 7 lb iken bu sayı petrol için 84 lb ve kömür için 2744 lb olmaktadır. Dolayısıyla doğalgaz, partikül madde emisyonları bazında kömüre göre 392 kat daha temiz bir yakıttır (EIA, 1999).



Şekil 6. New York, 1992 PM10 kaynak belirleme çalışmasının sonuçları (Gertler, 2005).

Endüstriyel işlemler sonucu yapılan salımlarda atmosferdeki partikül madde yüküne katkı sağlayan faktörlerden birisidir. Nitekim endüstri kökenli PM salımları İngiltere'deki toplam PM emisyonlarının %23 gibi önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Endüstri kökenli partikül madde emisyonlarına katkıda bulunan endüstri türleri; demir ve çelik dökümhaneleri, petrol rafinerileri cüruf tesisleri, yüksek fırınlar, çimento fabrikaları, kireç ocakları, cam fabrikaları, inşaat ve kazı işlemleri olarak sıralanmaktadır (Passant vd., 2002). Endüstri kökenli partikül madde arsenik, kadmiyum, krom, bakır, kurşun, çinko, cıva, nikel, selenyum ve

vanadyum gibi toksik eser elementlerce zengin olduğundan oluşturdukları sağlık riski de yüksektir (Passant vd., 2002).

1.4 PM'in çevresel etkileri

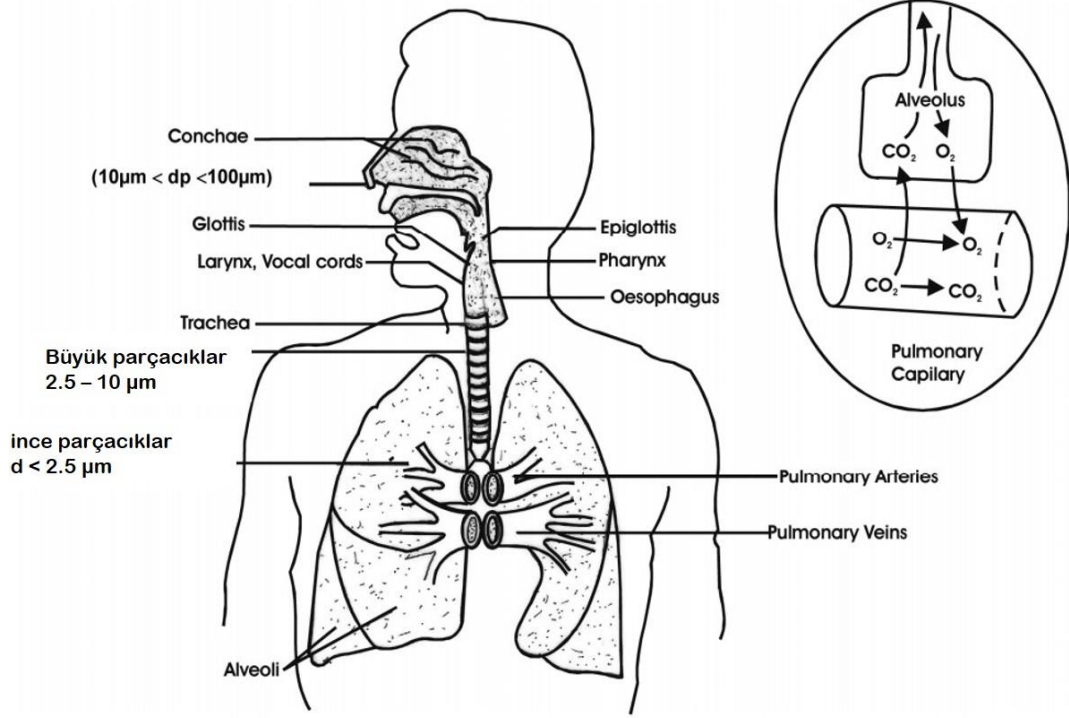
Partiküler madde kirliliğinin insan sağlığı ve bunun yanında çevresel olarak pek çok etkileri bulunmaktadır. Bu çevresel etkileri kısaca özetlemek gerekirse, görüş mesafesi azalması, bulut yoğunlaşma çekirdeği (CCN) oluşumu yoluyla hidrolojik döngüyü etkilemesi, ve iklim değişikliklerine etkileri şeklinde sıralanabilir (EPA, 2016b; WHO, 2003)

1.4.1 Atmosferdeki parçacıkların sağlık etkileri

Kötü hava kalitesi, tarih boyunca istenmeyen bir durum olagelmıştır. Özellikle de son yüzyılda, yaşanan ölümcül hava kirliliği olaylarından sonra, ciddi bir ilgi alanı ve araştırma konusu haline gelmiştir (Anderson vd., 2012). Tarihte kaydedilmiş ilk büyük çaplı ölümcül vaka Belçika'daki önemli bir ağır sanayi bölgesi olan Meuse Vadisi'nde gerçekleşmiştir. 1 – 5 Aralık, 1930 tarihleri arasında bölgeyi kalın bir sis tabakası kaplamıştır. Bu tarihler arasında yaklaşık 60 kişi solunum yolu rahatsızlıklarından hayatını kaybetmiştir (Nemery vd., 2001). Meuse Vadisi'ndeki olay bilinen ilk büyük vaka olsa da dünya çapında en çok bilinen ve hava kirliliği araştırmalarında adeta bir dönüm noktası olan vaka 1952'de Londra'da gerçekleşmiştir. Büyük Sis (The Great Smog) olarak da bilinen bu olayda 1952 yılı aralık ayının ilk haftasında Londra'da yoğun bir sis oluşmuş ve bir hafta süresince şehrin üzerinde kalmıştır. Bu süre zarfında atmosferde yüksek konsantrasyonlarda (yaklaşık 4 mg m^{-3}) bulunan SO_2 yavaş yavaş sülfürik aside dönüşmüş ve insanlar uzun bir süre H_2SO_4 solumuştur. Bu süreç yaklaşık 4000 insanın ölümüne sebep olmuştur (Timms, 2012). Bu felaket, atmosferik çalışmalarda bir dönüm noktası olmuş, hava kirliliğinin insanı öldürebileceği gözler önüne serilmiş ve bu konuda ciddi çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu olaydan sonra 1956 yılında Birleşik Krallık'ta, 1970 yılında da ABD'de yürürlüğe giren Temiz Hava Kanunu (The Clean Air Act) gibi yasal düzenlemelerle kentlerdeki hava kalitesinin artırılmasına çalışılmış ve 1970'li yılların sonlarına gelindiğinde bu çabalar büyük ölçüde sonuç vermiştir (Anderson vd., 2012; Timms, 2012).

Partiküler maddenin sağlık etkilerini belirleyen en önemli parametre parçacıkların aerodinamik çaplarıdır, zira parçacıkların atmosferdeki yaşam sürelerini ve insanlar üzerindeki maruziyetlerinin derecesi parçacıkların boyutuna bağlıdır (EPA, 2016b). Çapları $>10 \mu\text{m}$ olan parçacıklar ıslak ve kuru çökeltme mekanizmalarıyla atmosferden kısa sürede uzaklaştırıldıklarından ve insanlarda üst solunum yollarında tutulduklarından sağlık etkileri düşüktür. Nitekim PM_{10} standardı da bu nedenele oluşturulmuştur (Anderson vd., 2012). Ancak, çapları $<2.5 \mu\text{m}$ olan ince parçacıklar ve çapları $<0.1 \mu\text{m}$ olan ultra ince parçacıklar solunum sisteminde derinlere kadar ilerleyebildiği ve hatta kana

karışabildiği için insan sağlığına en büyük tehdit bu tür çok küçük çaplı parçacıklar tarafından oluşturmaktadır (EPA, 2016b). Parçacıkların boyutlarına göre solunum sisteminde nerelere gideceği Şekil 7'de gösterilmiştir.

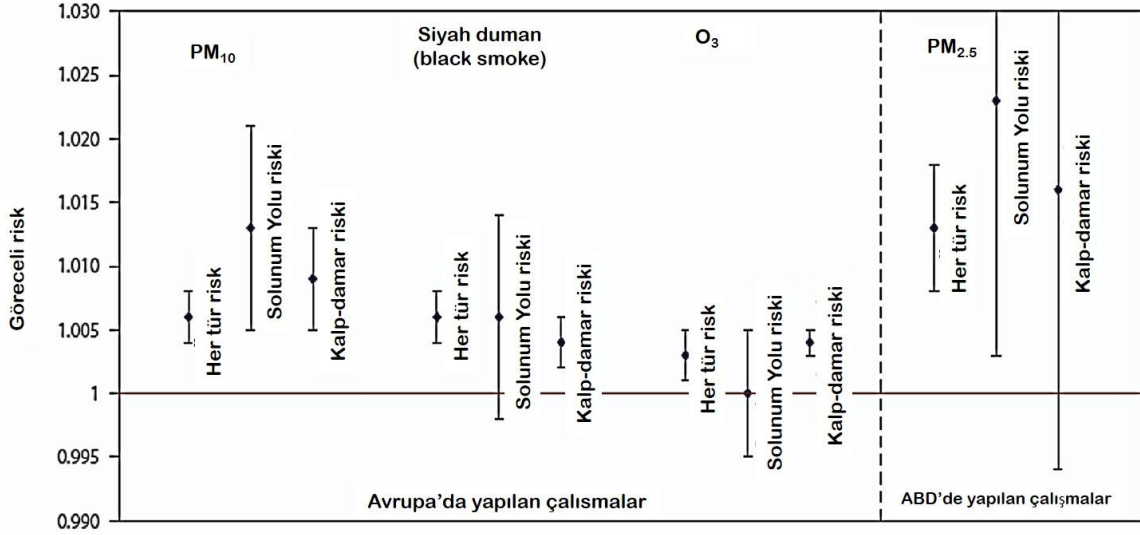


Şekil 7. Parçacıkların boyutlarına göre solunum sistemine nüfuzları (Jimoda, 2012)

Atmosferdeki partiküllerin insan sağlığına doğrudan etkilerinin yanında, parçacıkların üzerinde bulunan toksik elementler PAH'lar gibi kirleticilerin dolaylı etkileri de söz konusu olmaktadır (Kim vd., 2015). Partiküler maddenin kimyasal bileşimi geniş bir aralıkta çeşitlilik göstermektedir; nitratlar, sülfatlar, asitler organik maddeler ve ağır metaller bunların başlıcalarıdır (WHO, 2003). Partiküler maddenin sebep olduğu başlıca sağlık problemleri: Erken doğumlar (prematüre), bebek ölümleri, ölümcül olmayan kalp krizleri, kalp atışı düzensizlikleri, astım rahatsızlıkları, akciğer fonksiyon kaybı, nefes darlığı ve solunum yolları tahribatı olarak sıralanabilir (Anderson vd., 2012; EPA, 2016b; Kim vd., 2015; WHO, 2003).

Avrupa'da yapılan maruziyet-tepki (exposure-response) çalışmalarında PM₁₀ konsantrasyonundaki her 10 µg/m³ artışın ölüm oranında toplam %6'lık bir artış gerçekleştirdiği gösterilmiştir. Ayrıca Avusturya, Fransa ve İsviçre çapında yetişkinlerde gözlenen 25 bin yeni kronik bronşit vakası, çocuklarda gözlenen 290 bin bronşit vakası, 500 binden fazla astım atağı ve 16 milyondan fazla sınırlı aktivite kaybı vakaları hava kirliliğine bağlanmıştır (Künzli vd., 2000; Houghton vd., 2001). Daha yakın tarihli çalışmalara göre; PM₁₀ konsantrasyonundaki her

10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ artışın günlük ölüm oranında %0.21 artışa sebep olduğu, $\text{PM}_{2.5}$ konsantrasyonundaki her 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ artışın ise uzun vadede ölüm riskini %4 - %8 oranında arttırdığı saptanmıştır (Kaiser, 2005; Krewski vd., 2009). Pope vd., (2009) tarafından yapılan çalışmaya göre ise, $\text{PM}_{2.5}$ konsantrasyonundaki her 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ azalış ortalama ömrü 0.61 ± 0.20 yıl uzatmaktadır. Kirleticilerin neden oldukları sağlık risklerinin boyutları Şekil 8'de görülmektedir



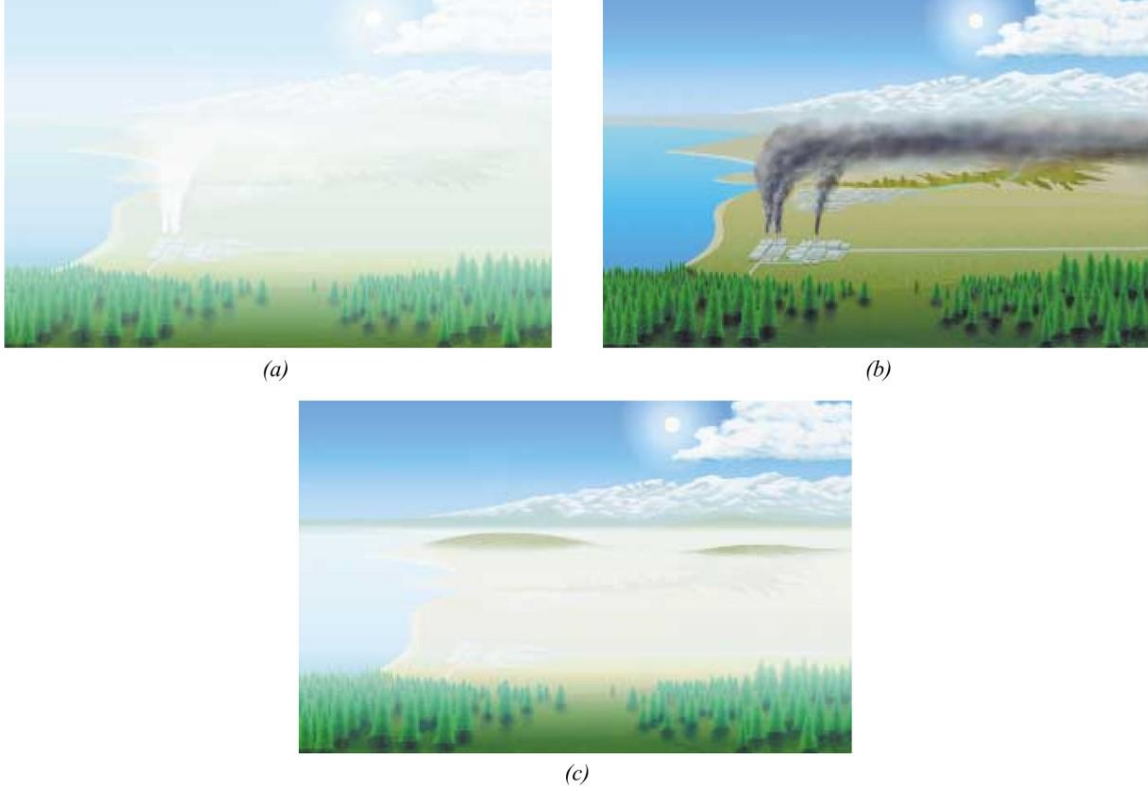
Şekil 8. Farklı hava kirleticilerinin her 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ artışı için bağıl ölüm riskleri (WHO, 2003).

1.4.2 Parçacıkların pus (haze) oluşumuna etkileri

Görüş mesafesi, açık havada çıplak gözle görülebilen en uzak mesafe olarak tanımlanmaktadır (Zhao vd., 2013). Havadaki partiküler maddenin görüş mesafesini etkilediği bilinmektedir. Bu durum pus (haze) şeklinde tanımlanmaktadır (Cheng vd., 2013; Malm, 1999). Pus ışığın absorbe edilmesi ya da saçılması nedeniyle olabilmektedir. Pus oluşumuna neden olan koşullar Şekil 9'da şematik olarak gösterilmiştir.

Her ne kadar hem doğal hem de antropojenik kaynaklar pus oluşturabilse de, ince parçacıklar bu oluşumu daha fazla etkilediği için antropojenik kaynakların pus oluşumunda daha büyük bir rolü olduğu söylenebilir (EPA, 2016d; Zhao vd., 2013). Motorlu taşıtlardan yapılan salımlar, güç santrallerinin salımları (özellikle kömürlü güç santrallerinden kaynaklanan salımlar) ve çeşitli endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan salımlar pus oluşumunun ve görüş mesafesi kısılmasının başlıca sorumlusu olarak österilmektedir (Malm, 1999). Partikül madde içinde pus oluşumuna sebep olan başlıca bileşenler sülfat parçacıkları, nitrat parçacıkları ve çeşitli organik parçacıklar olduğu için, bu maddelerin yoğun olarak bulunduğu kalabalık kentsel alanlarda pus sorunu daha yaygın ve daha yoğun olarak görülmektedir (Zhao vd., 2013). Çin'in deki yerleşimin en

yoğun olduğu bölgelerden birisi olan Yangtze Nehri Deltasında yapılan çalışmalar bu bölgede pus oluşumu sebebiyle son 30 yılda görüş mesafesinin 25 km civarından 20 km'nin altına düştüğünü göstermektedir (Zhao vd., 2013).



Şekil 9. Kirlenmelerin pus oluşturarak görüş mesafesi kısaltma mekanizmaları (Malm, 1999)

1.4.3 Partiküler maddenin hidrolojik döngüye etkileri

Parçacıklardan tamamen arınmış bir ortamda, su buharının yoğunlaşarak su damlalarına dönüşebilmesi için %400 civarında aşırı doymunluğa ulaşması gerekmektedir ki atmosferik koşullarda bu mümkün değildir. Su buharının su damlalarına dönüşmesi işleminin atmosferik koşullarda gerçekleşebilmesi için çekirdek görevi görece parçacıklar gerekmektedir. Belirli bir aşırı doymunlukta (supersaturation) bulut yoğunlaşmasını tetikleyebilen parçacıklar, o aşırı doymunluk için bulut yoğunlaşma çekirdekleri (CCN) olarak tanımlanır (Seinfeld ve Pandis, 2006). Sıradan bir yağmur damlacığı yaklaşık 2 mm çapındayken, sıradan bir bulut damlacığı 0.02 mm, sıradan bir yoğunlaşma çekirdeği (aerosolu) 0.0001 mm (0.1 μm) mertebesindedir. Havadaki yoğunlaşma parçacığı sayısı 100 ila 1000 cm^{-3} olarak ölçülmektedir (Seinfeld ve Pandis, 2006).

CCN olarak hareket edebilen atmosferik parçacıkların çok farklı türleri vardır. Bu parçacıkların içeriği toz ya da kil, yeşillik veya orman yangınlarından

kaynaklanan elementel karbon, okyanus lardan kaynaklanan deniz tuzu, volkanik aktivite kaynaklı sülfat, organik bileşiklerin oksitlenmesi ile oluşturulan organik madde gibi pek çok farklı maddeden oluşabilir. Farklı bileşenlerin hidroskopik (nem tutma) özellikleri çok farklı olduğu için, bu farklı tipteki parçacıkların bulut damlacıkları oluşturma kabiliyetleri parçacıkların boyutlarına ve kimyasal yapılarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Örneğin, sülfat ve deniz tuzu nemi kolayca tutabilirken, is (soot) organik karbon ve mineral parçacıkları aynı düzeyde nem tutmamaktadır. Parçacıkların pek çok kimyasal maddenin karışımını taşıması, bu mekanizmayı daha da anlaşılması güç hale getirmektedir (Houghton vd., 2001).

Taze is parçacıklarının hidrofobik (su itici) olduğu bilinse de, atmosferde yeterince yaşlanarak hidrofilik bir yapıya bürünebilir ve yoğunlaşma çekirdeği olarak hareket edebilir. Laboratuvar ölçekli bir çalışmada düzeneğe enjekte edilen is parçacıklarının yaklaşık 40 dakikalık bir aktivasyon süresinin ardından yoğunlaşma çekirdeği özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir (Ma ve Kim, 2014).

Atmosferdeki yoğunlaşma çekirdeği özelliği gösteren birincil (doğrudan salınan) parçacıklar olabileceği gibi ikincil (atmosferde oluşan) parçacıklar da olabilir (Kalivitis vd., 2015; Kerminen vd., 2012; Merikanto, Spracklen, Mann, Pickering, & Carslaw, 2009). Atmosferde yeni parçacıkların oluşumu 1 – 2 nm çapında başlar. Bu şekilde oluşan molekül kümeleri koagülasyon yoluyla hızlıca büyüyerek kaarlı yoğunlaşma çekirdeği oluştururlar (Fuzzi vd., 2015; Kerminen vd., 2012). Modelleme çalışmaları yeni parçacık oluşumunun (ikincil parçacıklar) atmosferdeki yoğunlaşma çekirdeği miktarının en önemli bölümünü oluşturduğunu göstermiştir (Fuzzi vd., 2015; Kalivitis vd., 2015; Kerminen vd., 2012). Merikanto vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada %0.2 aşırı doygunluktaki düşük seviye bulut yoğunlaşma çekirdeklerinin %45'inin çekirdeklenme (nucleation) yoluyla oluştuğunu gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, deniz sınır tabakasında %0.2 aşırı doygunlukta yoğunlaşma çekirdeklerinin %55'inin çekirdeklenme yoluyla oluştuğu ve bunun %45'lik kısmının serbest troposferden geldiği, %10 kadarlık bölümünün ise doğrudan sınır katmanında oluştuğu gösterilmiştir (Merikanto vd., 2009). Diğer bir çalışmada ise %0.2 aşırı doygunluktaki düşük bulut yoğunlaşma çekirdeklerinin %45 ila %78 arasında (seçilen simülasyon senaryosuna bağlı olarak değişmek üzere) bir kısmının çekirdeklenme yoluyla oluştuğunu göstermektedir (Westervelt vd., 2014).

1.4.4 Partiküler maddenin iklim değişikliğindeki rolü

Diğer tüm hava kirleticiler gibi, partiküler maddenin atmosfere salınması hiç şüphesiz iklim değişikliğinde rol oynamaktadır. Partiküler madde emisyonlarının en gözle görülür etkisi yeryüzünün ışıma bütçesinde yarattığı etkilerdir (EPA, 2016a). Ancak, partiküler maddenin ışıma bütçesini etkileme şekli çeşitli



faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu faktörler, parçacıkların boyutu şekli ve kimyasal bileşimidir (Jimoda, 2012; NRC, 2010).

Aerosoller yeryüzünün ışıma bütçesini güneş ışıklarını yansıtarak ya da absorbe ederek etkilemektedir. Güneş ışıklarını yansıtma durumunda, ışıma bütçesinde net negatif bir değişim yapmakta ve dünyanın soğumasına neden olmaktadır. Bu durum düşük karbon içerikli parçacıkların baskın geldiği durumlarda (sülfat parçacıkları ve deniz tuzu parçacıkları gibi) gerçekleşmektedir (UCSUSA, 2015). Güneş ışıklarının parçacıklar tarafından absorbe edilmesi durumunda, ışıma bütçesinde net pozitif bir değişim oluşmakta ve dünyanın ısınması sonucunu doğurmaktadır. Bu durum daha çok çöl tozu parçacıklarının ve elementel karbon konsantrasyonlarının yüksek olduğu durumlarda gerçekleşmektedir (Fuzzi vd., 2015)

Aerosoller, güneş ışınlarıyla ya da dünyadan yayılan kızılötesi ışınlarıyla etkileşime girebilmektedir (Jimoda, 2012). Siyah karbon bakımından zengin aerosoller, ışınım etkilerinin yanı sıra, dünyanın albedosunu (yansıtabilirlik) değiştirme etkisiyle de dünyanın enerji bütçesinde rol oynamaktadır. Elementel karbon, kar ve buz yüzeylerine çöktüğünde yüzeyleri karartarak albedolarını düşürmekte ve böylece kara ve dağ buzullarının daha fazla güneş ışığı absorbe etmelerine sebep olarak erimelerini hızlandırmaktadır (Fuzzi vd., 2015; NRC, 2010).

İklim çalışmalarına göre bazı aerosol çeşitlerinin ışımsal zorlamaları (radiative forcing); sülfat aerosolleri için -0.26 ila -0.82 W/m^2 , siyah karbon için $+0.16$ ila $+0.42$ W/m^2 , mineral tozları içinse $+0.9$ ila -0.46 W/m^2 olarak tespit edilmiştir (Haywood & Boucher, 2000).

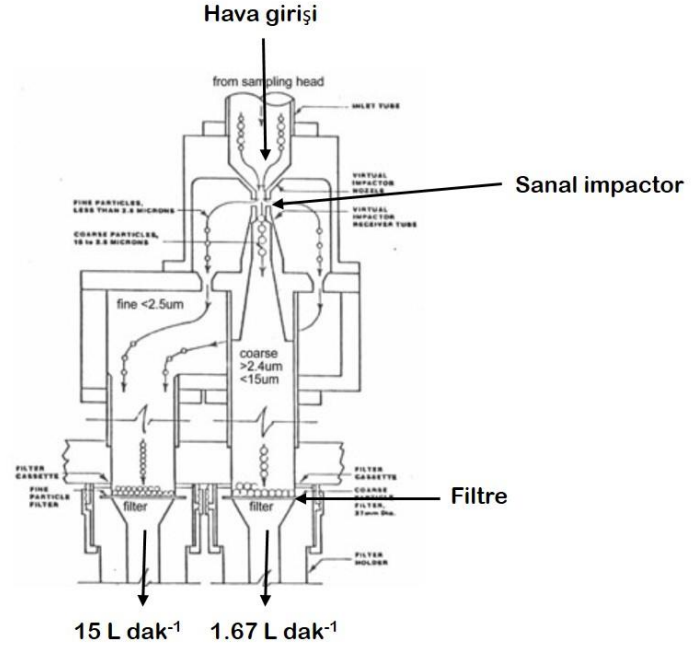
1.5 PM örnekleme sistemleri

1.5.1 Düşük hacimli örnekleme sistemleri

Dichotomous hava örnekleycisi

Dichotomous Örnekleyci, EPA tarafından belirlenen $PM_{2.5}$ (ince)ve $PM_{2.5-10}$ (kaba) parçacık fraksiyonlarının örneklenmesi için bir referans metottur. Örnekleyci, parçacıkları sanal impaktör (virtual impactor) yöntemiyle ayırarak kaba ve ince olmak üzere iki ayrı filtre üzerinde eş zamanlı olarak toplamaktadır. Pompa her 24 saatte 24 metreküp hava çekmektedir, bu da 16.7 L/dakika gibi bir akış hızına karşılık gelmektedir. Bu pompadan gelen akış, ana girişten sonra ikiye bölünmektedir. Bu bölünme, birincil örneğe ($PM_{2.5}$) 15 L/dakika, ikincil örneğe (kaba) 1.67 L/dakika hava akışı sağlanacak şekilde olmaktadır. Parçacıkları toplayıcı ortam olarak da 47 mm çapında ve of 2 μm gözenek büyüklüğünde politetrafloroetilen (PTFE veya Teflon) filtreler kullanılmaktadır. (QC, 2013; ThermoScientific, 2015c).

Cihazın güncel modellerinde 47 mm kullanılsa da, bölümümüzde bulunan dichotomous örnekleyicide 37 mm çaplı filtereler kullanılmaktadır. Yeni model bir dichotomous örnekleyici Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Dichotomous hava örnekleyici

GENT Stacked Filter Unit (SFU)

Bu cihazda hava, 10 µm kesim noktalı (cutpoint) bir ön-impaktörden geçerek, içerisinde birisi 8 µm diğeri 0.4 µm gözenek genişliği olan iki Nuclepore (polikarbonat) filtre bulunan bir kaste ulaşmaktadır. Parçacıklar, önce 8 µm gözenek genişliği olan kaba filtreden geçmekte ve Nuclepore filtrelerin özel yapısından dolayı çapları 10 ile 2.5 µm arasında olan parçacıklar bu filtrede tutulmaktadır. Hava akış hızının 16.7 L dak⁻¹ da sabit tutulabilmesi halinde çapı 2.5 µm'den küçük olan parçacıklar bu filtrede tutulmamakta ve filtreyi geçerek gözenek çapı 0.4 µm olan ikinci filtreye ulaşmakta ve burada tutulmaktadır. Bu şekilde parçacıklar iki farklı boyut aralığında örneklenmiş olmaktadır. Hem kaba hem ince filtreler 47 mm çapında Nucleopore membran filtrelerdir. Sistemin girişinde bulunan PM₁₀ impaktör 16.7 L dak⁻¹ akış hızı için kalibre edilmiştir. SFU da dikkat edilmesi gereken nokta hava akış hızının 16.7 L dak⁻¹da sabit tutulmasıdır (Maenhaut vd., 1994). Bu örnekleyici ticari olarak piyasada bulunan bir örnekleyici değildir. SFU'nun şematik görünümü Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. "Stack Filter Unit" (SFU) örnekleme sistemi

İmpaktörler de parçacıkları değişik boyutlarda, eş zamanlı olarak toplamakta kullanılabilir. Caskad impaktörler değişik sayıda katmandan oluşan ve impaksiyon ilkesine göre çalışan cihazlardır. İmpaktörün her katmanı bir dizi nozül ve nozüllerin karşısındaki yüzeylerden oluşmaktadır. Her katmanda nozül çapı küçülmekte ve/veya nozül ile karşısındaki yüzey arasındaki mesafe küçülmektedir. Hava nozülden geçer, yüzeye çarparak yön değiştirir ve bir sonraki katmana gider. Parçacıklarda havayı takip etmeye çalışır. Hava molekülleri ile birlikte yüzeye çarptıktan sonraki dönüşü yapabilen küçük parçacıklar bir sonraki katmana geçmekte, bu dönüşü yapamayan büyük parçacıklar ise karşıdaki yüzeye çarpmakta ve orada tutulmaktadır. Bir sonraki yüzeyde nozül daha küçük çaplı ve nozül-yüzey mesafesi bir önceki katmandakine göre daha az olduğundan havanın hızı artmakta ve dönüş daha keskin ve daha hızlı olmaktadır. Bir önceki katmandan gelen parçacıkların nispeten büyük olan bölümü havayı takip etmeye çalışırken hava moleküllerinin yaptığı dönüşü yapamayıp yüzeye çarpmakta ve orada tutulmaktadır. Yeterince küçük olanlar ise hava ile birlikte hareket ederek bir sonraki katmana gitmektedir. Bu işlem impaktördeki katman sayısına bağlı olarak 8 – 12 defa tekrarlanmakta ve bu şekilde, parçacıklar 12 boyut aralığında toplanabilmektedir. (Park vd., 2009; Copley Scientific, 2016; ThermoScientific, 2015d). Tipik bir impaktör şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. 8 kademeli Andersen basamaklı impactor (ThermoScientific, 2015d)

RespiCon

RespiCon çoklu kademeli, impaktör bazlı bir atmosferik parçacık örnekleme sistemidir. İlk sanal impaktör $2.5 \mu\text{m}$ 'dan küçük parçacıkları toplamakta. İkinci katman $10 \mu\text{m}$ 'dan küçükleri, üçüncü katman ise geriye kalan parçacıkları toplamaktadır. Örnekler üç ayrı filtrede, 3.11 L dak^{-1} akış hızında toplanmaktadır. Kullanılan filtreler 37 mm çapında cam elyafından ya da $5 \mu\text{m}$ gözenekli PVC'den yapılmaktadır. Yaygın kullanım alanları; epidemiyolojik çalışmalar, kişisel işyeri örnekleme, işyerlerinde yapılan iç ortam örnekleme, süreç izleme çalışmaları, parçacık boyut analizine yönelik çalışmalar olmaktadır (Park vd., 2009; TSI, 2008). RespiCon örnekleme Şekil 13'de verilmiştir.

Marple kişisel impaktör

Marple İmpaktörü çoklu püskürtmeli (multi-jet) ve çok katmanlı bir örnekleme sistemidir. Örnekleme sisteminin nominal hava akış hızı 2 L dak^{-1} , önerilen akış hızı ise $1 - 3 \text{ L dak}^{-1}$ olmaktadır. 8 kademeli bir Marple İmpaktöründe bulunan kesim noktaları; $>21.3 \mu\text{m}$, $14.8 \mu\text{m}$, $9.8 \mu\text{m}$, $6.0 \mu\text{m}$, $3.5 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$, $0.93 \mu\text{m}$, $0.52 \mu\text{m}$ 'dir. Geriye kalan parçacıklar ise en sonda yer alan bir filtrede toplanmaktadır. Parçacıklar, 34 mm çapında cam elyaf ya da $5 \mu\text{m}$ gözenekli PVC filtreler üzerinde toplanmaktadır.

Yaygın kullanım alanları; odun tozu, kömür tozu, silis tozu, solunabilir toz örnekleme, solunum toksikolojisi, aerobakteriyoloji, iç mekan hava kirliliği, çok noktalı örnekleme ve aerosol araştırmaları olmuştur (ThermoScientific, 2015b). Sağlık çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bu impaktör Şekil 14'de gösterilmiştir



Şekil 13. RespiCon parçacık örnekleme (TSI, 2008)

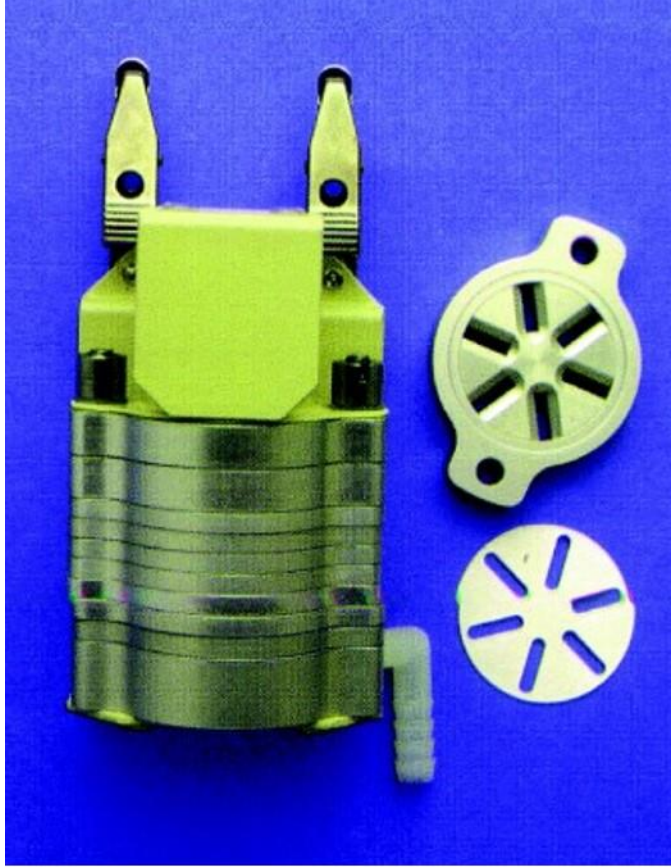
1.5.2 Yüksek hacimli örnekleme sistemleri

Yüksek hacimli örnekleme sistemleri dakikada yaklaşık 1 m³ hava çeken örnekleme sistemleridir. Bu tür örnekleme sistemleri atmosferdeki parçacık yükünün düşük olduğu kırsal bölgelerde yapılan çalışmalara çok uygundur. HiVol örnekleme sistemleri olarak bilinen yüksek hacimli örnekleme sistemleri havadaki bütün parçacıkları toplayacak şekilde (TSP örnekleme sistemi) tasarlanabildiği gibi, bir ön impaktör kullanılarak PM₁₀ ve PM_{2.5} örnekleme yapabilecek hale de getirilebilmektedir.

Toplam askıda partiküler madde (TSP) örnekleme sistemi

Toplam askıda partiküler madde (TSP) örnekleme sistemi, atmosferdeki toplam partiküler maddeleri boyut gruplarına göre ayırmadan örnekleme yapar. Bu yöntem EPA-TSP standardı için referans metod olarak geliştirilmiştir. Örnekleme sisteminde bulunan yüksek hacimli pompa günde yaklaşık 1630 metreküp hava çekmektedir, bu da yaklaşık 1132.67 L dak⁻¹ (40 cfm) gibi bir debiye karşılık

gelmektedir. Parçacıklar selüloz, cam veya kuartz fiber filtrelerde toplanır. Filtreler, örneklemeden önce ve sonra tartılarak partiküler madde kütlesi bulunur ve bu kütle pompayla çekilen havanın hacmine bölünerek partiküler madde konsantrasyonu hesaplanmış olur (Park vd., 2009; QG, 2013; ThermoScientific, 2015a). Bu tür yüksek hacimli örnekleycilere bir örnek Şekil 15'de verilmiştir

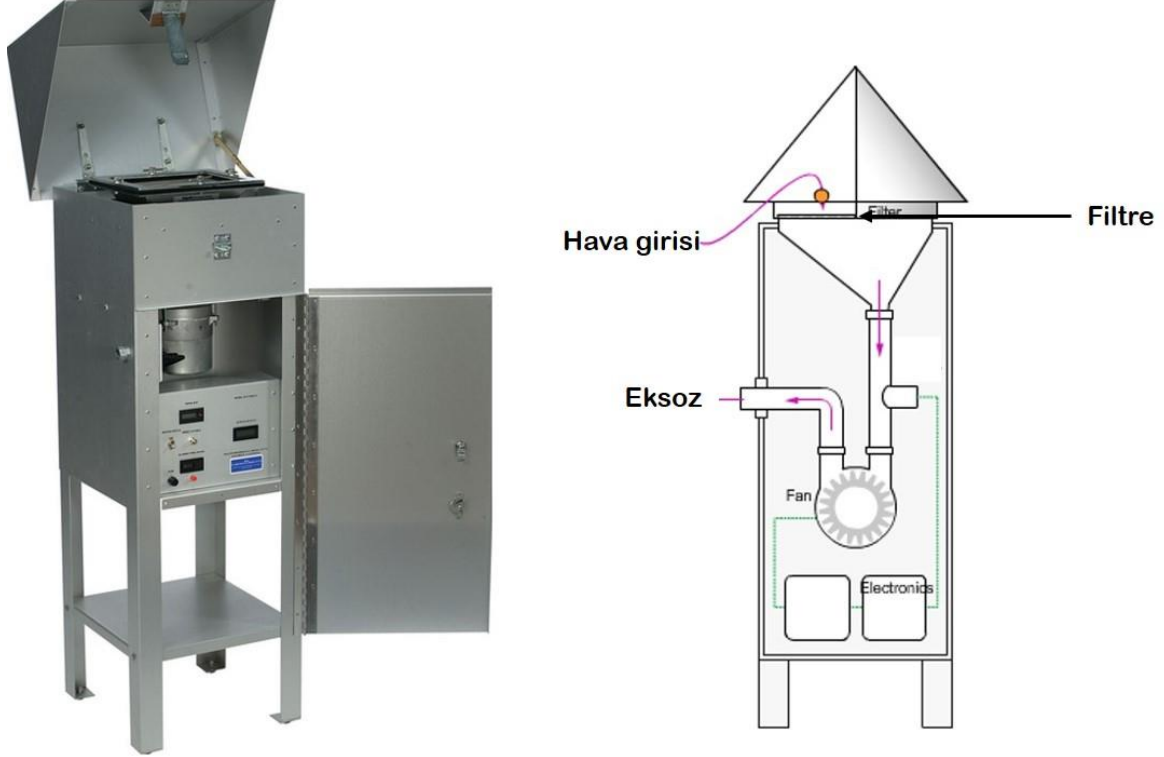


Şekil 14: Model 290 Marple kişisel basamaklı impaktör (ThermoScientific, 2015b)

Yüksek hacimli PM₁₀ örnekleyci

Çalışma prensibi bir önceki bölümde anlatılan TSP örnekleycisine çok benzemektedir. TSP'ye ek olarak, bu örnekleycide 10 μm 'dan büyük parçacıkların geçişini engelleyen bir giriş kafası (ön impaktör) vardır, bu impaktör çapı 10 μm 'den büyük olan parçacıkların filtreye ulaşmasını önlemektedir. Örnekleycide bulunan yüksek hacimli pompa 1132.67 L/dakika (40 cfm) akış hızıyla çalışmaktadır. Parçacıklar, TSP örnekleycide olduğu gibi, selüloz, cam

veya kuartz fiber filtreler üzerinde toplanmaktadır. Filtreler, örneklemeden önce ve sonra tartılarak partikül madde kütlesi bulunmakta ve bu kütle pompayla çekilen havanın hacmine bölünerek partikül madde konsantrasyonu hesaplanmaktadır (Park vd., 2009; ThermoScientific, 2015a). Yüksek hacimli PM_{10} örnekleme cihazına bir örnek Şekil 16'da gösterilmiştir.

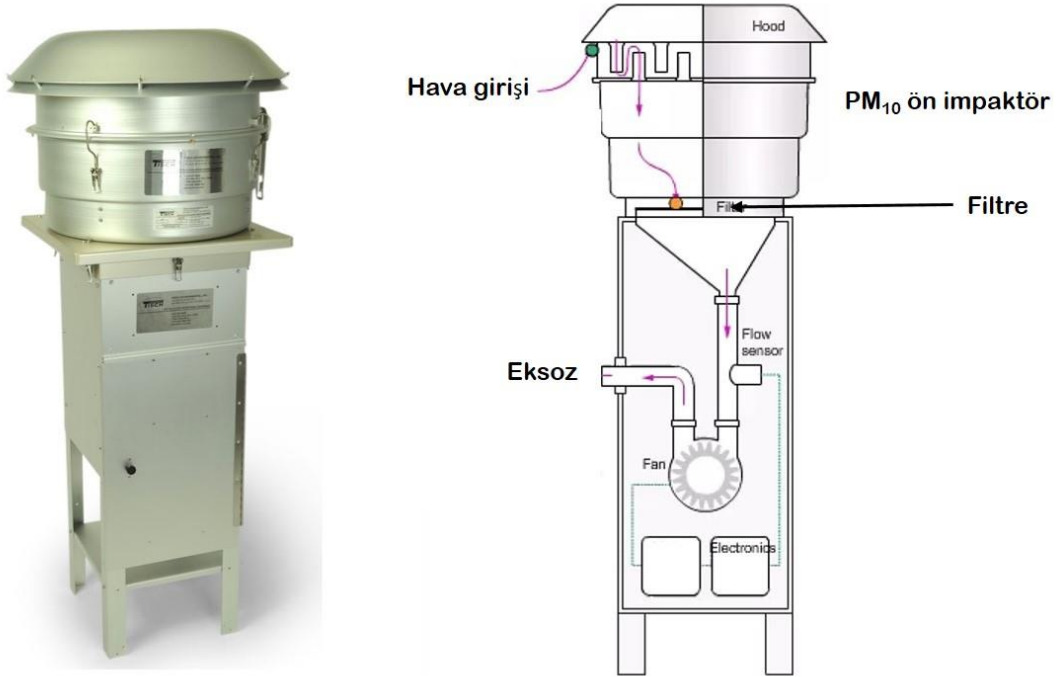


Şekil 15. Toplam askıda partikül madde (TSP) örnekleme cihazı (QG, 2013)

Trichotomous örnekleme cihazı

Trichotomous örnekleme cihazı PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 gruplarını eş zamanlı olarak toplamak amacıyla geliştirilmiş sanal impaktör bazlı bir örnekleme cihazıdır. ABD'deki Minnesota Üniversitesi'nden Dr. Virgil A. Marple tarafından geliştirilmiştir (Lundgren vd., 1996). Bu örnekleme cihazı, yukarıda belirtilen üç kesim noktasının yanı sıra ara kesim noktalarındaki parçacıkları ($PM_{1-2.5}$, $PM_{2.5-10}$) da toplayabilmektedir (Lundgren vd., 1996). Örnekleme cihazında, 2.5 μm ve 1.0 μm kesim noktalı Yüksek Hacimli Sanal İmpaktörler (HVVIs), PM_{10} boyut seçici giriş ve standart PM_{10} örnekleme filtresi (20×25 cm) arasına yerleştirilmiştir. Diğer yüksek hacimli örnekleme cihazları gibi Trichotomous örnekleme cihazı da 1132.67 L/dakika (40 cfm) debiyle çalışmaktadır (Marple vd., 2014). Yeterli sayıda filtre kullanılarak, örnekleme cihazının toplayabildiği aralıklar olan PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$, $PM_{1-2.5}$, ve PM_1 boyut gruplarında ayrı filtrelerde örnek toplamak mümkündür.

Trichotomous örnekleyicide, pompadan çekilen hava ilk olarak 2.5 µm impaktöre gelir. Bu aşamadaki küçük hava akışıyla (minor flow), 2.5 µm'dan büyük 10 µm'dan küçük (PM_{2.5-10}) parçacıklar durgun hazneye atılır ve burada iki filtre tarafından toplanır. 2.5 µm'dan küçük parçacıklar büyük hava akışıyla (major flow) impaktörü terkeder ve 1 µm impaktöre doğru yol alır. Bu esnada hava akışının küçük bir kısmı PM_{2.5} toplanan filtreye yönlendirilir. Başka bir küçük kısmı da PM₁ toplanan filtrelere yönlendirilir. En sonunda, geri kalan hava akışı impaktör haznesinin tabanındaki dikdörtgen filtreden geçer (Lundgren vd., 1996). Şekil 17'de gösterilen bu cihaz, kullanım zorluğu nedeniyle çok yaygın bir hale gelememiştir. Ticari olarak da stışı yapılmamaktadır



Şekil 16. Yüksek hacimli PM₁₀ örnekleyici (QG, 2013)

1.5.3 Örneklemede kullanılan filtreler

Partiküler madde örneklemesinde genel olarak kullanılan filtre türleri şunlardır

Membran filtreler

En sık kullanılan filtre tipidir. PTFE (Teflon), Selüloz Ester, PVC filtreler bu sınıfta yer almaktadır. Bu tür filtrelerle partiküler madde, asbest, PAH, mineraller, ve ICP analizi için eser elementler gibi kirleticileri örnekleme mümkündür (Mccammon vd., 1998).

Cam ve kuvars elyaf filtreler

Merkaptanlar ve dizel emisyonları gibi uygulama alanları bulunmaktadır. Kuvars filtre pek çok alanda yerini cam elyaf filtrenin yerini almıştır (Mccammon vd., 1998). Kuvars filtrelerin blank değerleri daha düşüktür.



Şekil 17: PM1.0/2.5/10 Trichotomous örnekleyici. a) Monte edilmiş örnekleyici; b) 2.5 µm HVVI; c) 1.0 µm HVVI. A- PM10 giriş; B- Ara hazne; C- taban; D- 2.5 µm HVVI; E- 1.0 µm HVVI; F-Nihai filtre (Marple vd., 2014).

Polikarbonat filtreler

Bu filtreler karakteristik özelliklerinden dolayı elektron mikroskopu ve x-ray flüoresans ile analiz edilecek parçacıkların toplanması için uygundur (Mccammon vd., 1998).

Bu proje kapsamındaki örnekleme çalışmalarında 46.2 mm çaplı 2 µm gözenekli Whatman™ 7592-104 PTFE filtreler kullanılmıştır. Bu ürün yüksek saflıkta PTFE membrandan yapılmış olup kimyasallara dirençli polipropilen destek halkası sayesinde her türlü kullanıma uygundur. Ayrıca, düşük dara ağırlığına sahip olduğundan hassas gravimetrik analizler için tercih edilmektedir. Blank değerlerinin düşük olması, özellikle eser element analizi içeren çalışmalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Tek dezavantajı fiyatının yüksek olmasıdır. Bu



gün piyasada satılan 47 mm çapındaki filtreler arasında en pahalısı olduğu söylenebilir.

1.6 PM örneklemesinde hava akış hızının önemi ve kontrolü

Bir hava kirleticisinin hassas bir şekilde örneklenmesi ve konsantrasyonunun belirlenmesi ancak hava akış hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesiyle mümkün olur. Zira, partiküler madde örneklenmesinde yapılan boyut sınıflandırmalarında örnekleme ekipmanları, arzu edilen boyut gruplarını ancak belirli bir sabit hava akış hızında (flow rate) toplayacak şekilde dizaynı ve kalibrasyonu yapılmaktadır. Yani, ister impaktör bazlı olsun, ister siklon bazlı olsun, hassas ve doğru bir örnekleme için hava akışının kontrolü olmazsa olmazdır. Aksi takdirde örnekleme ekipmanında toplanan parçacıklar arzu edilen parçacık grupları olmayacak, bu da yanlış veri ve yanlış sonuçlara neden olacaktır.

Bu proje kapsamında hava akış kontrolü için iki ekipman kullanılmıştır. Projenin birinci fazında kütleli hava akış kontrol ünitesi (Mass Flow Controller – MFC), ikinci fazında ise kritik orifisler kullanılmıştır. Bu ekipmanların ve hava pompalarının kalibrasyonu rotametre ile yapılmıştır.

1.6.1 Kütleli hava akış kontrol üniteleri (Mass Flow Controller – MFC)

Kütleli hava akış kontrol ünitesi (MFC) sıvı ve gazların akış debilerinin kontrolü için kullanılan bir cihazdır. Bu cihazlar genellikle spesifik bir sıvı veya gaz(lar)ı kontrol etmek için kalibre edilirler, o yüzden yapılacak örnekleme için uygun MFC seçimi hayati önem taşımaktadır. MFC'ler tam ölçeklerinin %0'ı ile %100'ü arasında istenen değer (setpoint) atanarak hava akışını arzu edilen değerde sabitlemekte, pompa veya başka elemanlardan kaynaklı hava akışı dalgalanmalarını (fluctuation) en aza indirmektedir. MFC'ler hem akış göstergesi (flow meter) hem de kontrol ünitesi görevi görmesinden dolayı kullanımı oldukça kolaydır ve ek bir göstergeye ihtiyaç duymaz.

Kütleli hava akış kontrol üniteleri; bir giriş yuvası, bir çıkış yuvası, bir kütle akış sensörü ve orantısal kontrol vanasından oluşur. Böylece kütle akış sensöründen aldığı sinyali belirlenmiş değerle karşılaştırarak hava akış vanasını ayarlar ve bu hava akışını belirlenen değere en yakın tutmaya çalışır.

Bu proje kapsamında yapılan örneklemelelerde Sierra Instruments' SmartTrak® 50 Series Kütle Hava Akış Üniteleri kullanılmıştır

1.6.2 Hava akışının kritik orifis kullanılarak kontrol edilmesi

Kritik orifisler, hava akışını mekanik olarak kontrol eden aletlerdir. Temel olarak biri giriş, biri çıkış olmak üzere iki uç ve bu uçların arasında hava akışını kısıtlayan çok küçük bir delik (orifice plate) bulunur. Tıpkı bir Venturi nozülü gibi Bernoulli



Prensibi'ne dayanır, yani içinden geçen hava akışı uçlar arasındaki basınç farkıyla doğru orantılıdır.

Kritik orifislerin tam anlaşılabilmesi için öncelikle kritik akış (critical flow – choked flow) kavramının anlaşılması önem arz etmektedir. Orifis içinden gaz akışı sırasında uçlar arasında basınç farkı arttıkça hava akışı da artar, ancak orifisin içinden geçen havanın ses hızına ulaştığı noktadan sonra bu artış durur ve bu noktadan sonra basınç farkı artışından bağımsız olarak hava akışı sabit kalır. Bu noktadaki hava akışına kritik akış, bu şekilde çalışan orifislere kritik orifis denir. Kritik akış, giriş ve çıkış uçlarındaki mutlak basınçların oranının 0.528 ve daha büyük olduğu, bir diğer deyişle, normal şartlar altında, iki uç arasındaki mutlak basınç farkının 15 – 18 inç cıva olduğu durumda gerçekleşir ve bunun gerçekleştiği basınca kritik basınç denir. Bu noktada orifis içinden geçen havanın hızı ses hızına eşittir ve bu hızın üzerine çıkmayacaktır. Debi ise hız ve yüzey alanının bir fonksiyonu olduğu için debi de saha fazla artmayacaktır. Bu özellik, kritik orifislerin çok dengeli bir hava akışı göstermesini sağlar ve dalgalanmaları en aza indirir.

Kritik orifislerin MFC'lere göre avantajları; daha küçük ve kompakt olması, daha az bakım ve onarım gerektirmesi ve fiyat olarak da çok daha ucuz olmasıdır. Dezavantajları ise, MFC'ler istenilen ayar değerine saniyeler içinde ayarlanabilirken kritik orifislerin bu esnekliği sunmaması, tek bir değere göre kalibre edilmiş olması. Bunun yanı sıra, orifisler analog cihazlar olduğu için hava akış verilerini anlık olarak takip etmek veya verilerin kaydını tutmak mümkün olmamaktadır.

4. Deneysel

4.1. Çalışmanın yapıldığı yer.

Çalışma daha çok laboratuvarlarda yürütülen cihaz geliştirme türünden bir çalışma olsa da, validasyon amaçlı üç ay süre ile alanda yapılan örnekleme ve ölçüm çalışmasını da içerdiğinden çalışmanın yapıldığı yerin tanımlanması gerekli görülmüştür.

Çalışmanın gerek laboratuvarlarda yapılan bölümü ve gerekse örnekleme ve ölçüm bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yürütülmüştür. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, şehrin Banliyö bölgesinde, Kızılay'a yaklaşık on km mesafede, yer almaktadır. Çevre Mühendisliği bölümü ise üniversite yerleşkesinin en güneyindeki binalardan birisidir. Bölümün Eskişehir yoluna mesafesi yaklaşık 2.5 km, diğer kalabalık bir yol olan Mevlana Bulvarı'na mesafesi ise, yine yaklaşık olarak, 3 km'dir.

Üniversite genel hatlarıyla yoğun bir yerleşim bölgesinde değildir. 1960'lı yıllarda şehrin tamamen dışında olan orta Doğu Teknik Üniversitesi, zaman içerisinde Ankara'daki yerleşimin Eskişehir yolu boyunca yoğunlaşması nedeniyle eski konumunu kaybetmiş ise de, bölgedeki yerleşim yoğunluğu yine de şehirdeki kadar değildir. Bu nedenle de Üniversitenin konumunu "banliyö" olarak tanımlamak yanlış olmayacaktır. Üniversitenin, Ankara içerisindeki konumu ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nün ODTÜ içerisindeki yeri Şekil 18'de gösterilmiştir.

Şekil 18. Çalışmada kullanılan istasyonun yeri

Tasarım çalışmaları doğal olarak bölüm laboratuvarlarında yapılırken, örnekleme ve ölçüm çalışmaları ise bölümün arkasında oluşturulan bir istasyonda gerçekleştirilmiştir.

Bu güne kadar bu çalışmanın ölçüm kısmında da kullanılan istasyon birçok çalışmada kullanılmıştır. Elde edilmiş olan sonuçlar ODTÜ, Çevre Mühendisliği bölümündeki istasyonun tipik bir banliyö (suburban) istasyon özelliği taşıdığını göstermiştir. Burada ölçülen kirletici konsantrasyonları (eser elementler, uçucu organik bileşikler, organik parçacıklar gibi) Ankara'nın içerisinde ölçülen konsantrasyonlardan genellikle düşüktür. Buna karşılık, Türkiye'nin kırsal bölgelerinde yaptığımız ölçümlerle karşılaştırıldığında, ÇM bölümünde ölçülen konsantrasyonların daha yüksek olduğu görülmektedir. İstasyonun bir fotoğrafı Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 18. Çalışmada kullanılan istasyonun yeri

4.2. Cihazın yapımında uygulanan genel strateji

Geliştirilen örnekleyicinin genel tanımı ve neden böyle bir cihazın gerektiği konuları Bölüm 1.5'de anlatılmıştır. Cihazın oluşturulmasında dokuz aşamalı bir strateji uygulanmıştır.

- Cihazın genel yapısının oluşturulması
- Hangi bileşenlerin kullanılacağına tespiti
- Bileşenlerin temini
- Cihazın MFC kullanılarak oluşturulması
- Akım kontrollerinin yapılması ve cihazın çalışır hale getirilmesi
- MFC'lerin kritik orifislerle değiştirilmesi
- Örnekleyiciden geçen hava akım hızını dakikalık olarak kaydedecek bir kontrol ünitesinin tasarımı ve yapılması
- Cihazın bir kabin içerisine yerleştirilmesi
- Validasyon çalışmaları

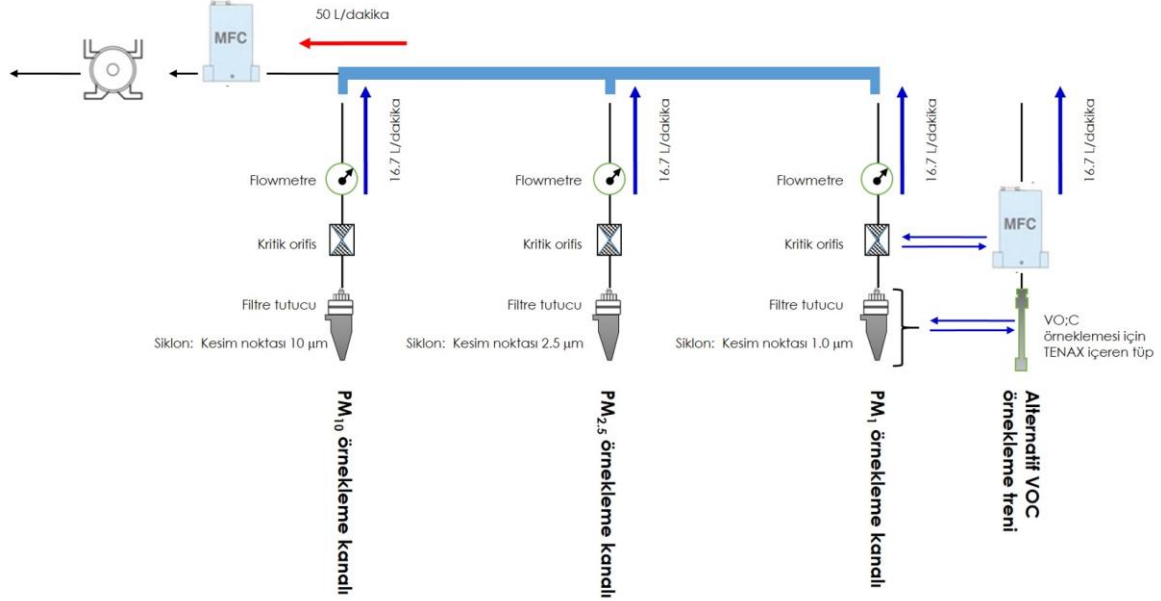
4.2.1. Cihazın genel yapısının oluşturulması

Çalışmanın ilk aşaması düşünülen örnekleyicinin genel olarak nasıl bir yapıda olacağı belirlenmesi olmuştur. Her ne kadar oluşturulacak örnekleyicinin üç kanallı olacağı ve her kanalda farklı PM fraksiyonlarını toplayacağı, projenin oluşturulma nedeni olduğu için baştan biniyorduysa da, bunlar çok farklı bileşenler kullanılarak farklı şekillerde sağlanabilecek olması bir ön planlama aşamasını gerekli kılmıştır. Örneğin her kanalda toplanacak PM fraksiyonları, siklonlarla belirlenebileceği gibi ön impaktör olarak tanımlanan ayırıcılarla belirlenebilmektedir. Yine aynı şekilde her kanaldan geçen hava akım hızının ölçülmesi ve kontrol edilmesi basit rotametrelerden, başlayıp karmaşık kütleli debi kontrol ünitelerine kadar uzanan geniş bir yelpazedeki ünitelerle sağlanabilir. Hatta parçacıkların üzerlerinde toplanacağı filtreleri içeren filtre tutucular bile böyle bir sistem içerisinde farklı yerlere konulabilir. Bütün bu değişik seçenekler farklı tasarımlar doğuracak ve her birisinin istenen amaca ulaşmaktaki başarısı da farklı olacaktır. Bu nedenle oluşturulacak örnekleyicinin genel yapısının ve hatta cihazı oluşturacak bileşenlerin önceden biliniyor olması varılacak sonuç için önemli bir ilk aşamadır.



Şekil 19. Çalışmada kullanılan İstasyonun fotoğrafı

Bu çalışmada oluşturulacak örnekleme sisteminin genel yapısı daha proje başlamadan, teklif aşamasında belirlenmiştir. Hatta bu konuda kaba bir çizim proje teklifinde de sunulmuştur. Aklımızda ne olduğunu gösteren bu çizim Şekil 20'de gösterilmiştir. Tabii ki bu şekil ve bileşenler proje sürecinde karşılaşılan problemleri çözmek üzere bazı değişimlerden geçmiştir. Projenin başlangıcında hedeflenenlerle sonunda oluşan örnekleme sistemi arasındaki farklar raporun son bölümünde tartışılmıştır.



Şekil 20. Proje teklifinde sunulan tasarım

4.2.2. Hangi bileşenlerin kullanılacağına tespiti

Örnekleme sisteminin genel hatları ve kullanılacak bileşenler belli olsa bile piyasada her bileşen için pek çok farklı seçenek mevcuttur. Örneğin, örnekleme sisteminde PM fraksiyonlarını siklon kullanılarak ayrılması kararlaştırılmıştır. Ancak bu amaçla kullanılabilir pek çok çeşit siklon bulunmaktadır. Aynı şekilde filtre tutucuların, hava akım hızı ölçüm cihazlarının, pompaların pek çok çeşidi mevcuttur. Projenin ikinci aşamasında piyasada pek çok çeşidi bulunan bileşenlerden hangilerinin kullanılacağı belirlenmiştir. Hangi bileşenlerin kullanıldığı ve bu tercihlerin gerekçeleri bölüm 2.3.1'de tartışıldığından, projede uygulanan genel stratejinin tartışıldığı bu bölümde örnekleyicinin bileşenleri ile ilgili bir tartışma yapılmamıştır.

4.2.3. Bileşenlerin temini



Projedeki üçüncü etapta belirlenen bileşenler temin edilmiştir. Ön ayırıcı olarak kullanılan siklonlar, hava akış hızını her kanalda kontrol etmeye yarayan kütleli debi kontrol üniteleri, hava akış hızını ölçmeye yarayan dijital ölçerler yurt dışından gelen cihazlar olduğundan bu projede yurt dışı alımlar önemli bir yer tutmuş, özellikle çalışmanın ilk döneminde, projenin gelişme hızını belirleyen en önemli faktör olmuştur.

Yurtdışından alımı yapılan 4 kalem malzeme olmuştur. Bunlar:

Siklonlar

Filtre tutucular

Kütleli debi kontrol üniteleri (Mass flow controller, veya MFC)

Dijital hava akım ölçerler (flowmetre)

Kritik orifisler (critical orifice)

Bunlardan siklon ve filtre tutucuların alımı tek bir kalem olarak yapılmış, MFC'ler ve hava akım ölçerler ikinci bir kalem olarak alınmış, kritik orifisler ise üçüncü bir kalem olarak temin edilmiştir.

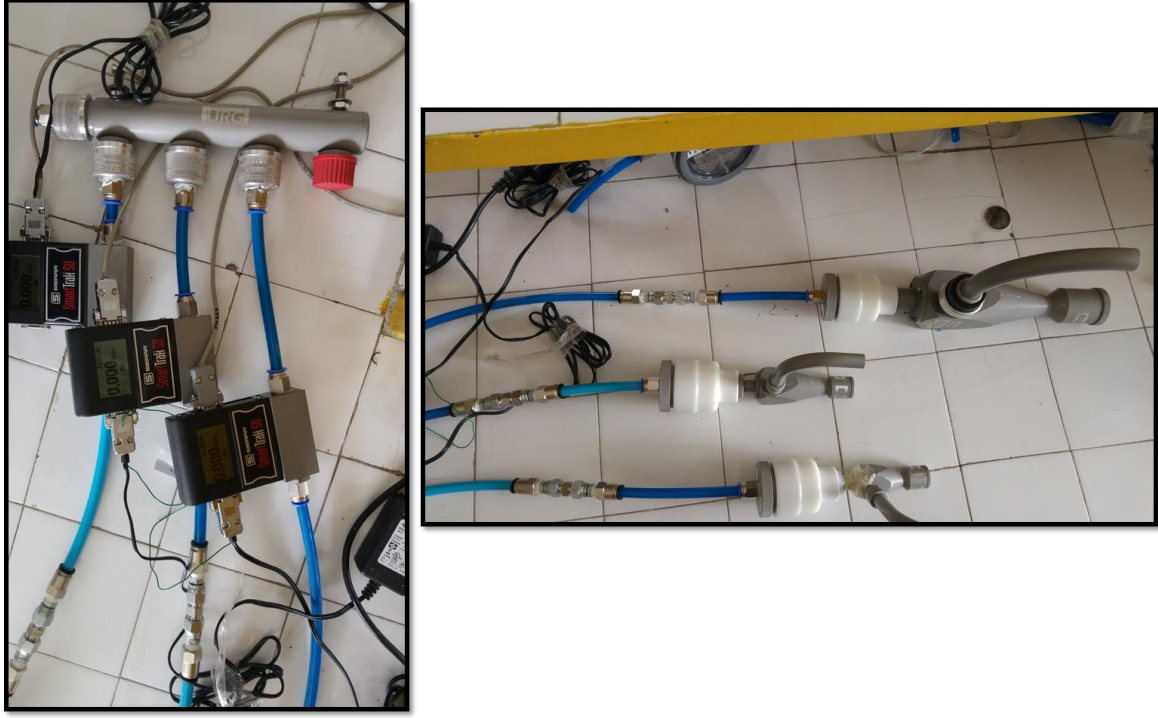
MFC'ler ve hava akım ünitelerinin satın alımları herhangi bir sorun olmadan ilk üç ay içerisinde gerçekleşmiştir. Aynı şekilde kritik orifislerin alımlarında da herhangi bir sorun yaşanmamıştır. Bunlarda planlandığı gibi dört ay içerisinde elimize ulaşmıştır. Ancak siklon ve filtre tutucuların temininde bir sorun çıkmış ve bu cihazların alımları gecikmiştir. Çıkan sorun ABD'deki firmanın yolladığı siklonlardan iki tanesinin bizim talep ettiğimiz modeller olmaması olmuştur. Bunlar geri yollanmış, yerlerine doğru modeller getirtilmiştir. Bütün parçaların temini için proje teklifinde ayrılan süre dört ay olduğundan bu gönderme ve geri getirme işlemi yaklaşık üç aylık bir gecikmeye neden olmuştur. Ancak proje süresince zaman içerisinde bu açık kapatılmış ve cihazların teminindeki bu üç aylık gecikme projenin tamamlanmasında bir gecikmeye neden olmamıştır.

4.2.4. Cihazın MFC kullanılarak oluşturulması

Örnekleycinin bileşenlerinin teminini takip eden aşama cihazın ilk defa bir araya getirilmesi olmuştur. Bu işlem ilk aşamada her kanalda birer tane kütleli debi kontrol ünitesi kullanarak yapılmıştır. İlk montaj çalışmaları laboratuvarında, masaların üzerinde yapılmıştır. Bu aşamayı gösteren bir fotoğraf Şekil 21'de görülmektedir.

Bu çalışmalar sırasında filtrelerin dolması ve gözeneklerin tıkanmaya başlaması sonucu, kütleli debi kontrol ünitelerinin bir müddet sonra hava akım hızını sabit tutmakta zorlandığı ve daha sonraki aşamalarda da debinin düşmeye

başladığı görülmüştür. Bunun önüne geçebilmek için kütleli debi kontrol ünitesinden gelen debi sinyalini sabit tutacak şekilde pompayı hızlandırıp yavaşlatan bir geri beleme ünitesi yaptırılmıştır. Bu ünitenin kullanılmasıyla örnekleyicinin her kanalında hava akış hızını 16.7 L dakika⁻¹ da sabitlemek mümkün olmuştur. Söz konusu geri besleme ünitesi ile ilgili olarak ileriki bölümlerde daha geniş bilgi verilecektir.



Şekil 21. Cihazın ilk montaj çalışmaları sırasındaki durumu

4.2.5. Akım kontrollerinin yapılması ve cihazın çalışır hale getirilmesi

Örnekleyicinin kütleli debi kontrol üniteleri ile çalışır hale gelmesini takiben kütleli debi kontrol ünitelerinin üzerinde görülen hava akış hızları kalibre edilmiş bir rotametre kullanılarak kalibre edilmiştir.

Gerek kütleli debi ölçüm üniteleri ve gerekse hava akış hızını ölçen cihazlar (flowmetre) giriş veya çıkışları atmosfere açık olduğunda doğru ölçümleri yaparlar. Ancak bu sistemde MFC'ler ve daha sonraki aşamalarda kullanılacak akış hızı ölçerler (flowmetre) filtre tutucusu ile pompa arasına yerleştirildiğinden vakum altında çalışmaktadır. Tabii vakum altında havanın hacmi 1 atm basınçtakinden farklı olacağından ölçülen hacim farklı olacaktır. Bu çalışmada MFC'ler ve akış hızı ölçüm cihazları (flowmetre) ismarlarken sistemde konulacakları noktalarda vakum (basınç) ölçümü yapılmış ve bu bilgiyi MFC ve



FM'leri satacak firmaya bildirilmiştir. Firma da cihazları belirttiğimiz vakum koşullarında doğru ölçüm yapacak şekilde hazırlayarak yolladığından MFC ve FM'lerin gösterdiği akış hacimlerinin doğru olması gerekmektedir. Kalibrasyon eğrileri MFC'lerde ve hava akış hızı ölçerlerin ekranlarında görülen değerleri teyit etmek amacıyla hazırlanmıştır. Çünkü daha sonraki aşamalarda bütün tasarım bu değerlerin doğru olduğu varsayımı ile yürütülecektir.

Örnekleyicinin kütleli debi kontrol üniteleri kullanılarak çalıştırıldığı ilk bölümde yapılan son çalışma sistemi bir müddet stack filter unit olarak bilinen ve PM₁₀ ile PM_{2.5} örneklerini eş zamanlı toplayabilen bir örnekleyiciye paralel olarak çalıştırıp aynı kütleli konsantrasyonları ölçüp ölçmediklerini belirlemek olmuştur. Bu küçük eksersizin yapılabilmesi için küçük bir kabin yaptırılmış ve kütleli debi kontrol üniteleri bu kabin içerisine konmuştur. Söz konusu kabin proje teklifinde belirtilen, cihazın nihai olarak içerisine yerleştirileceği kabin olmayıp, karşılaştırma çalışmalarında kullanılmak üzere, geçici olarak kullanmak üzere yaptırılan daha basit bir kabindir.

4.2.6. MFC'lerin kritik orifislerle değiştirilmesi

Projedeki genel gelişmelerle ilgili olarak buraya kadar anlatılanlar projenin birinci yılında tamamlanan çalışmalar olup Kasım ayında sunulan ara raporda verilmiştir. Bundan sonraki anlatılacak olanlar ise Kasım 2015 ile Mayıs 2016 arasındaki gelişmeleri içermektedir.

Tasarlanan örnekleyicinin kütleli debi kontrol üniteleri kullanılarak çalıştırılmasından sonraki aşama bu ünitelerin cihazın fiyatını daha makul bir düzeye çekebilmek için kritik orifislerle değiştirilmesi olmuştur.

Her kanala kritik orifisler yerleştirildikten sonra hava akış hızının her kanalda ne olduğu ve ne ölçüde sabit kaldığı ölçülmüştür.

Gerek MFC ve gerekse kritik orifis kullanılırken filtreler toplanan parçacıklarla çok dolduğunda ve gözenekler iyice tıkanıldığında hava akış hızı düşmektedir. Yapılan çalışmalar sırasında hava akış hızının düşmeye başladığı sürenin filtrenin türü ile değiştiği gözlenmiştir. Bunun nedeni farklı filtrelerin hava akışına farklı direnç göstermesidir. Bu nedenle kritik orifisin farklı filtrelerde hava akış hızını hangi sürelerle sabit tutabildiği küçük bir deney ile belirlenmiştir.

4.2.7. Örnekleyiciden geçen hava akım hızını dakikalık olarak kaydedecek bir kontrol ünitesinin tasarımı ve yaptırılması

Çalışmanın bundan sonraki aşaması örnekleme sırasında her kanaldan geçen toplam hava hacmini ve hava akış hızını ölçen bir kontrol ünitesi tasarımı içermektedir. Gerek kritik orifisler ve gerekse kütleli debi kontrol üniteleri ile hava akış hızını sabit tutmak mümkün olsa da cihazın kullanılabilir olabilmesi için

her örnekleme süresi sonunda, en azından filtreden geçmiş olan toplam hava hacminin bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgi ne MFC'ler ne de kritik orifisler tarafından sağlanmadığı için, dijital hava akış hızı ölçerlerden (flowmetre) aldığı sinyali kullanarak her kanaldan geçen havayı örnekleme süresince toplayan ve örnekleme sona erdiğinde her kanaldan geçen hava hacmini gösteren bir kontrol ünitesi tasarlanarak örnekleme sistemine entegre edilmiştir. Aynı ünite örnekleme süresince her kanaldaki hava akış hızını on saniyelik ortalamalar halinde takip etmekte ve örnekleme sona erdiğinde bu bilgilerin hepsi bilgisayara aktarılabilmektedir.

4.2.8. Cihazın bir kabin içerisine yerleştirilmesi

Çalışmanın son aşamasını bütün sistemin (pompa, hava akış hızı ölçerler, kontrol modülünün elektronik donanımı) koruyucu bir kabine yerleştirilmesi oluşturulmuştur. Bu sistemde sadece siklonlar ve filtre tutucuları kabinin dışında bırakılmıştır. Siklonların hava girişi hava örneklemeinde standart yükseklik olan 2 m'ye yerleştirilmiştir.

4.2.9. Validasyon çalışmaları

Projenin sonunda tasarımı gerçekleştirilmiş olan örnekleycinin literatürde yaygın olarak kullanılan iki benzer örnekleyci ile paralel olarak çalıştırılıp, bu çalışmada oluşturulan örnekleycinin diğerleri ile aynı $PM_{2.5}$ ve PM_{10} kütleli konsantrasyonlarını ölçtüğünü göstermek olmuştur. Cihazla paralel çalıştırılan ve PM_{10} , $PM_{2.5}$ örnekleme yapabilen iki örnekleyci literatürde “dichotomous sampler” ve “stack filter unit” olarak bilinen iki örnekleyci olmuştur.

Her ne kadar tasarlanan örnekleyci PM_1 örnekleri de topluyorsa da, Türkiye’de PM_1 örneği toplayabilen başka bir örnekleyci bulunamadığından tasarlanan örnekleycide toplanan PM_1 parçacık kütleli konsantrasyonlarını başka bir cihazla toplanan PM_1 konsantrasyonları ile karşılaştırmak mümkün olmamıştır.

4.3. Örnekleycinin bileşenleri

4.3.1. Bileşenlerin tanıtılması

Cihazı oluşturan bileşenler aşağıda kısaca anlatılmıştır

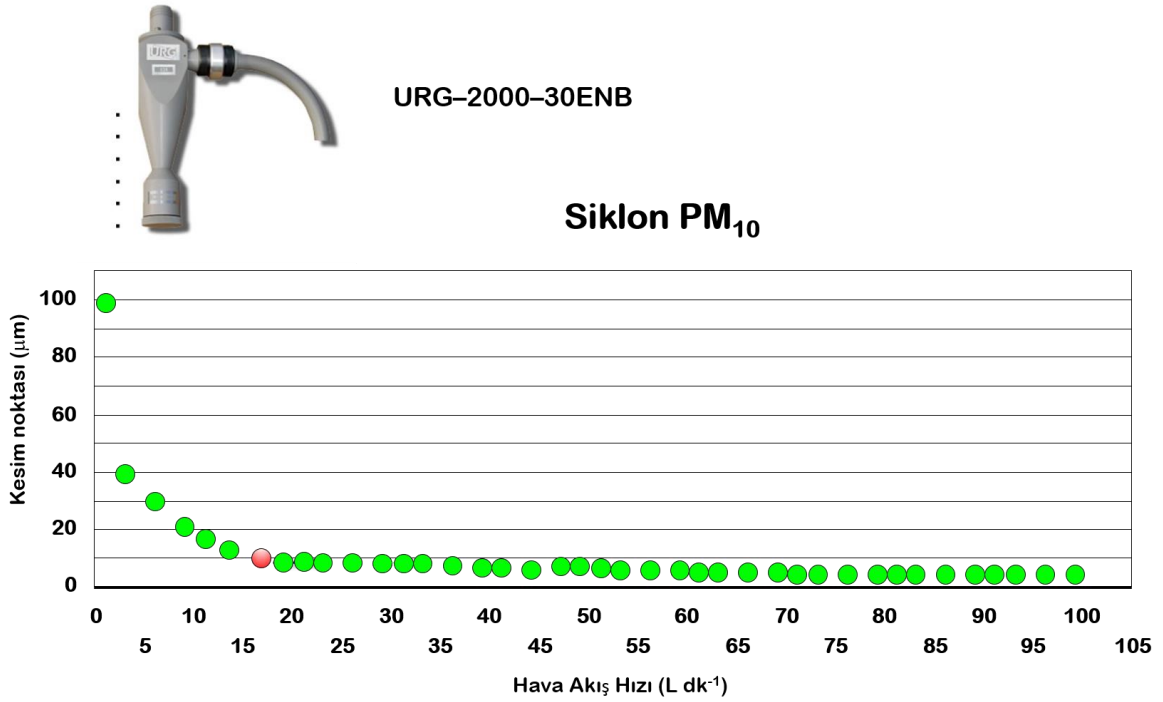
Siklonlar

Bu çalışmada siklonlar PM fraksiyonlarını ayırmada en önemli rolü olan bileşenlerdir. Siklonların çalışma prensibi daha önceki bölümlerde anlatıldığından burada geniş olarak tartışılmayacaktır.

Bu çalışmada URG firmasından temin edilen ve hava akım hızı 16.7 L dak^{-1} olduğunda kesim noktaları sırasıyla $10 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$ ve $1.0 \mu\text{m}$ olan üç siklon

kullanılmıştır. Kesim noktası çapı daha küçük olan parçacıkların siklondan geçtiği, çapı daha büyük olan parçacıkların ise siklon tarafından tutulduğu çaptır (literatürde "cut-point" olarak geçmektedir)

Hava akış hızı 16.7 L dk^{-1} olduğunda çapı $10 \mu\text{m}$ den küçük olan parçacıkların filtreye ulaşmasına izin veren, çapı daha büyük olan parçacıkları ise tutan siklon ile üretici firma tarafından sağlanan ve hava akış hızı ile siklonunun kesim noktası (cut point) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 22'te görülmektedir. Bu siklon raporun bundan sonraki bölümlerinde "PM₁₀ siklon" olarak geçmektedir.



Şekil 22. PM10 siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi

PM₁₀ siklon URG-2000-30ENB modeli bir siklondur. Siklonun Al olan gövdesi teflon kaplanmıştır. Altındaki bir kapak vasıtasıyla içerisinde biriken parçacıklar temizlenebilmektedir. Siklonun çıkışı vidalı olup filtre tutucusu doğrudan siklona vidalanabilmektedir. Parçacıklar bir yerden diğerine borular yardımıyla taşınırken duvarlara yapışıp eksik örnekleme neden olabileceği örneklemede iyi bilinen sorunlardan birisidir. Bu nedenle filtre tutucuların doğrudan doğruya siklona bağlanması parçacıkların taşınacağı mesafeyi kısalttığından eksik örnekleme ihtimalini azaltmaktadır. PM₁₀ siklonun boyutları 29.8 cm x 26 cm x 6.4 cm dir. Ağırlığı ise 1.4 kg'dır. PM₁₀ siklonu boyutları itibarıyla diğer kanallarda kullanılan siklonlardan daha büyüktür. Örnekleme sırasında yağmurun veya çökelen parçacıkların siklona ulaşmasının önüne geçebilmek amacıyla siklonun girişi 90° bir açı yaparak yere bakacak şekilde tasarlanmıştır.

Siklonun gövdesinin teflon kaplı olması eser element analizi amacıyla yapılan örneklemelelerde çok yararlı olmaktadır. Gövdesi metal olan siklonlarda, parçacıklar siklonu terk etmeden önce siklonun gövdesine sürtündüklerinden, metal kontaminasyonu söz konusu olabilmesine karşılık, gövdesi teflon veya polimer yapısında olan siklonlarda veya bu çalışmada kullanılanlarda olduğu gibi teflon kaplı siklonlarda parçacıkların gövdeye sürtünmesinden kaynaklanan bir kontaminasyon söz konusu olmamaktadır. Zaten bu çalışmada da gövdesi Teflon kaplanmış Al olan siklonlar bu nedenle kullanılmıştır. Yalnız bu tür siklonlar farklı türlerdeki siklon fiyatları göz önüne alındığında yüksek fiyatlı siklonlar grubuna girmektedir.

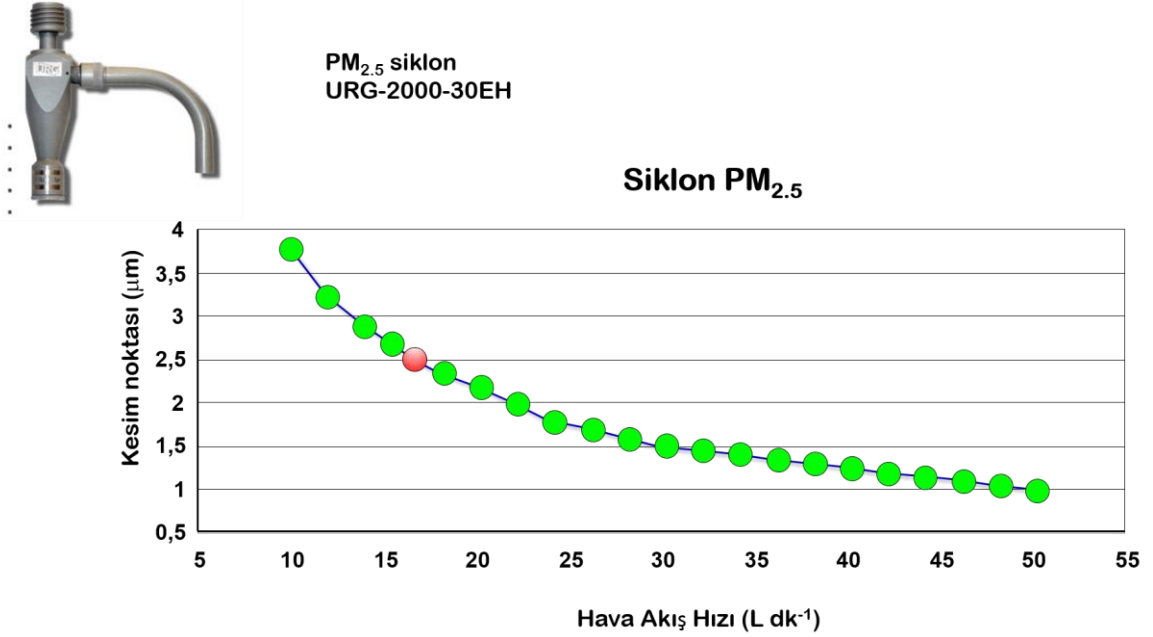
Şekilde görülen grafik siklonu üreten URG firması tarafından sağlanmıştır. Şekilden de görülebileceği gibi hava akış hızının 16.7 L dak^{-1} olduğu zaman siklonun kesim noktası $10 \mu\text{m}$ olmakta ve siklon çapları $10 \mu\text{m}$ den büyük olan parçacıkları tutarken daha küçük parçacıkların filtreye ulaşmasına engel olmamaktadır.

Yine şekilden görülebileceği gibi siklonun kesim noktası hava akış hızı ile değişmektedir. Düşük hava akış hızlarında çapları $10 \mu\text{m}$ 'den daha büyük olan parçacıklarda filtreye ulaşabilmektedir. Aynı şekilde daha yüksek hava akış hızlarında ise çapları $10 \mu\text{m}$ 'den küçük olan parçacıklarda siklon tarafından tutulmakta ve filtreye ulaşmaları mümkün olmamaktadır. Zaten bu nedenle bu çalışmada hava akış hızının her kanalda 16.7 L dak^{-1} değerine mümkün olduğunca yakın olmasına çaba sarf edilmiştir. Şekilde verilen grafikten de görülebileceği gibi, hava akış hızındaki azalma sonucu siklonda tutulan parçacıkların çapındaki artış, yüksek hava akış hızlarında daha küçük parçacıkların siklonda tutulmasından daha önemli bir sorundur. Örneğin, hava akış hızı $7 - 8 \text{ L dak}^{-1}$ 'ya düştüğünde siklonun kesim noktası $20 \mu\text{m}$ 'ye çıkarken, hava akış hızı 30 L dak^{-1} 'ya çıktığında ise kesim noktası $8 \mu\text{m}$ olmaktadır.

Filtreler parçacıklarla yüklendikçe gözenekleri tıkanmakta filtreden geçen hava akış hızı da düşmektedir. Dolayısı ile, hava akış hızının örnekleme süresince azalma ihtimali artma ihtimalinden çok daha fazladır. İyi bir hava akış kontrolü sistemi kullanılarak bu düşüşü geciktirmek mümkün de tamamen önüne geçmek mümkün değildir. Bir müddet sonra filtrenin gözenekleri tıkanmakta ve ne kadar gelişmiş bir hava akış hızı kontrol sistemi kullanılırsa kullanılsın hava akış hızındaki azalmaya başlamaktadır. Bu çalışmada PM_{10} kanalında hava akış hızının, en azından tipik örnekleme süresi olan 24 saat boyunca, 13 L dak^{-1} ile 20 L dak^{-1} arasında çaba sarf edilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar ve gelinen nokta raporun ileriki bölümlerinde tartışılmıştır.

$\text{PM}_{2.5}$ kanalında kullanılan siklon ve hava akış hızı ile parçacık çapı kesim noktası arasındaki ilişki Şekil 23'da gösterilmiştir. Siklon URG firması tarafından üretilen 2000-30EH modeli bir siklondur. Boyutları biraz daha ufak olmakla beraber (16.5

cm x 15.6 cm x 3.8 cm, ağırlığı 0.3 kg), görünüş itibarıyla PM₁₀ kanalında kullanılan siklonun tamamen aynıdır. Bu siklonun da gövdesi metal kontaminasyonunu en aza indirmek amacıyla teflon kaplanmıştır. Çıkışı, parçacıkların taşınması sırasında olabilecek parçacık kayıplarının önüne geçebilmek için, filtre tutucuya doğrudan bağlanabilecek şekilde vidalı olarak yapılmıştır.

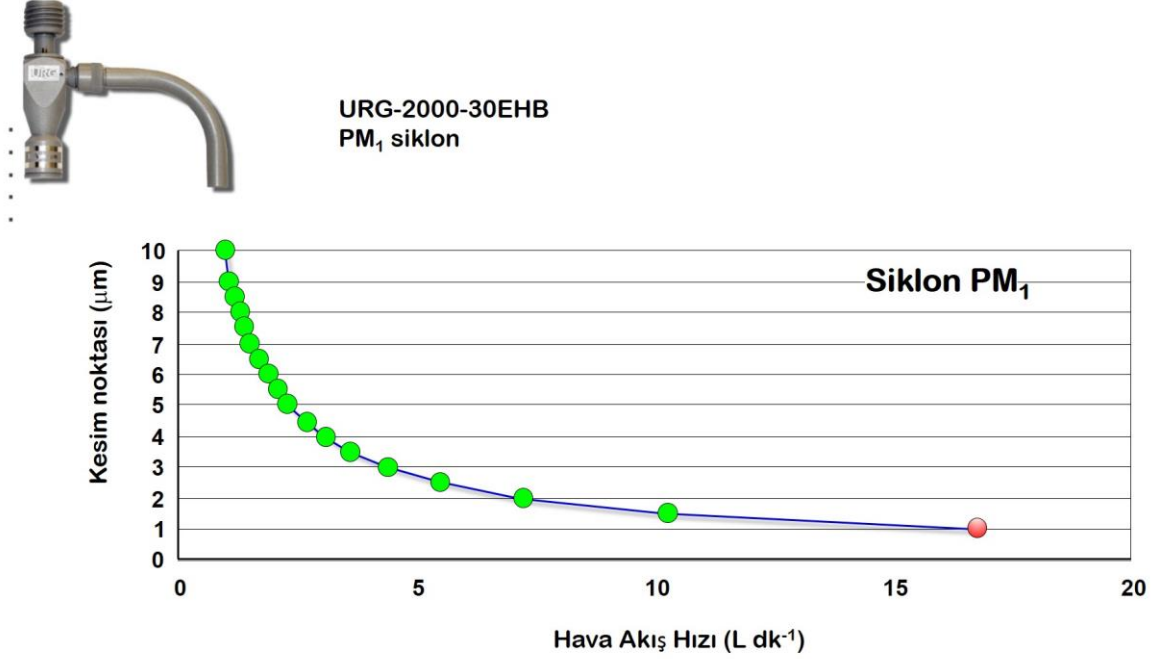


Şekil 23 PM_{2.5} siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi

PM_{2.5} kanalında kullanılan siklon için hava akış hızı ile parçacık çapı kesim noktası arasındaki ilişkiye bakıldığında, bu siklonun kesim noktasının hava akış hızına PM₁₀ siklona göre daha duyarlı bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. 16.7 L dak⁻¹ hava akış hızında 2.5 µm olan kesim noktası 13 L dak⁻¹ akış hızında 2.8 µm, 15 L dak⁻¹ akış hızında ise 2.7 µm olmaktadır. 20 L dak⁻¹ akış hızında ise kesim noktası 2.2 µm'dir. Bu çalışmada siklondan geçen hava akış hızının en az 24 saatlik örnekleme süresinde 13 L dak⁻¹'nin üzerinde olmasına çalışılmıştır.

PM₁ kanalında yine URG firması tarafından üretilen 2000-30EHB modeli bir siklon kullanılmıştır. Siklonun kendisi ve bu siklon için hava akış hızı ile parçacık çapı kesim noktası arasındaki ilişki Şekil 24'de görülmektedir. Kullanılan siklon boyut olarak PM₁₀ ve PM_{2.5} kanallarında kullanılan siklonlardan daha küçükse de (13.3 cm x 14.9 cm x 3.2 cm, ağırlığı 0.2 kg) gerek yapısı ve gerekse görüntüsü itibarıyla kullanılan diğer siklonlardan hiçbir farkı yoktur.

Hava akış hızı - parçacık çapı grafiği PM₁ kanalında kesim noktasının kontrolünün nispeten kolay olacağını göstermektedir. Grafiğe bakıldığında hava akış hızının 16.7 L dak⁻¹'dan 10 L dak⁻¹'ya düşmesi halinde kesim noktasının da 1 µm den 1.5 µm'ye yükselmesi sonucunu doğurmaktadır. Bu çalışmada hava akış hızının en az 24 saat üre ile > 13 L dak⁻¹ olması sağlanmaya çalışılması sonucu PM₁ kanalında kesim noktası 1 µm ile 1.2 µm arasında değişmektedir.



Şekil 24 PM₁ siklon ve hava akış kalibrasyon eğrisi

Filtre tutucular

Örnekleyicide kullanılan filtre tutucular ve teknik özellikleri Şekil 25'de gösterilmiştir. Bütün kanallarda URG firması tarafından üretilen 2000-30FG modeli aynı filtre tutucu kullanılmıştır. Filtre tutucu 47 mm çapında filtreleri tutacak şekilde tasarlanmıştır. Dış çapı 6.7 cm yüksekliği ise 12.7 cm'dir. Filtre tutucunun bütün bileşenleri Teflondan yapılmıştır. Kullanılan filtre tutucularının en önemli özelliği girişlerinin kullandığımız siklonlara her hangi bir adaptör gerektirmeden bağlanabilecek şekilde vidalı yapılmış olmasıdır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, filtre tutucunun siklonlara doğrudan bağlanabilmesi parçacıkların taşındıkları borulardaki kayıplarını en aza indirdiği için bu tür tasarımlarda önemli bir özelliktir. Kullanılan filtre tutucusu yapısının teflon olması nedeniyle oldukça pahalı bir filtre tutucusudur, ancak siklonlara doğrudan bağlanabilmesi nedeniyle bu çalışmada kullanılmıştır.

Filtre tutucusunun çıkışı 1/4" çapında olup, çabuk çıkarılıp takılabilmek özelliği ("quick connect") taşımaktadır. Filtre tutucular sürekli takılıp çıkarıldığından, bağlantılardan kolayca (ve daha önemlisi çabukça) takılıp çıkartılması önemli bir özelliktir. Ne var ki, çalışmalar sırasında, bu çıkışın iki önemli sorunu olduğu görülmüştür. Birincisi bu tür bağlantıları Türkiye'de kolayca bulmak mümkün değildir. Gerektiği her zaman yurt dışından getirilmesi gerekecektir. Benzer çabuk çıkarılıp takılabilecek bağlantıların sadece filtre tutucularda değil, bütün bağlantı noktalarına (MFC bağlantıları, manifold bağlantıları, pompa bağlantıları gibi) uygulanacağı göz önüne alındığında bunun projenin hızlı bir şekilde ilerlemesinde önemli bir engel olabileceği anlaşılabilir. Bu çıkışın kullanılmasında ikinci bir zorluk, bizim bu çalışmada 1/4" çapında bağlantılar ve transfer hatları kullanamayacağımızın anlaşılması olmuştur. Başlangıçta bu



URG-2000-30FG

Özellikler

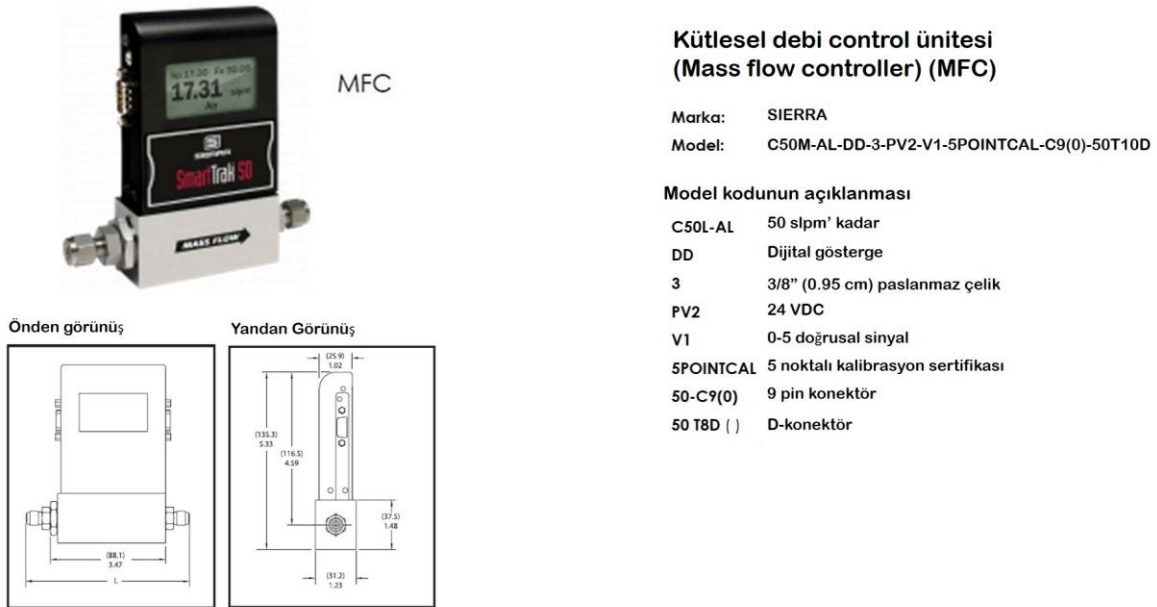
- 47 mm filter çapı için tasarlanmıştır
- #30 dişli girişlidir. Bu filter tutuculara doğrudan bağlanmasını sağlamaktadır
- Birden fazla filtre kullanılması halinde aralarında Teflon bir ayırıcı vardır
- Dış çapı 6.7 cm'dir
- Yüksekliği 12.7 cm'dir
- Ağırlığı 450 g.'dir
- Filtrelerin arkasındaki çelik destek, kontaminasyonu önlemek üzere Teflon kaplanmıştır
- Çıkışı kolayca takılıp çıkarılmasını sağlamak üzere "quick connect" bağlantılıdır

çalışmada da de en yaygın boru çapı olan ¼" çapında boruların kullanılması planlanmıştı. Ancak çalışmanın daha başında bu kadar küçük boruların hava akışına çok direnç göstereceği ve bu nedenle de işimizi çok zorlaştıracağı ortaya çıkınca sitemdeki bütün boru ve bağlantıların ½" çapında olması kararlaştırıldı.

Yukarıda kısaca anlatılan nedenlerle (1) filtre tutucusunun çıkışı genişletilerek ½" çapına getirildi ve (2) filtre tutucusunda üretici firma tarafından kullanılan hızlı bağlantı, yine hızlı takılıp çıkartılabilen ancak Türkiye'de kolayca temin edebildiğimiz farklı bir hızlı bağlantı ile değiştirildi. Söz konusu bağlantı grubumuzda çok uzun yıllar farklı uygulamalarda kullanıldığından oldukça güvenilir bir bağlantı olduğu tarafımızdan bilinmektedir. Çalışmanın bütün aşamalarında bu yeni bağlantılar kullanılmıştır.

Kütleli hava akış hızı ölçer ve kontrol üniteleri

Bu çalışmada Sierra Instruments firması tarafından üretilen "SmartTrack 50" serisi hava akış hızı kontrol üniteleri (MFC) kullanılmıştır (model C50M-AL-DD-3-PV2-V1-5POINTCAL-50-C9(0)-50 T10D). MFC'nin bir fotoğrafı ve model kodunun açıklaması Şekil 26'da görülmektedir.



Şekil 26. Çalışmada kullanılan kütleli akış hızı kontrol ünitesi



MFC'ler bir hava akış hızı ölçüm ünitesi, baypas bölümü ve hava akış hızı, akış kontrol valfi ve gerekli elektronik bölümlerden oluşmaktadır. MFC'ye giren hava önce bir bölümü hava akış hızı ölçüm ünitesinden, bir bölümü de bypass ünitesinden geçecek şekilde ikiye bölünmektedir. Ölçüm bölümünde bulunan bir sensor vasıtasıyla gazın akış hızı ölçülmekte ve bu sinyal, bir elektrik sinyaline dönüştürülerek hız kontrol valfine iletilmektedir. Valf gaz akış hızını sabit tutulması istenen değer ile ölçüm ünitesinden gelen sinyal arasındaki fark sıfır olana kadar ayarlamaktadır. Bu şekilde gaz akış hızında olabilecek değişiklikler kontrol valfi tarafından hemen sabit tutulması istenen değerle farkı sıfır olacak şekilde düzeltilmekte ve bu şekilde sabit hızda bir gaz akışı sağlanmaktadır.

Her üç kanalda da aynı model MFC'ler kullanılmıştır. Önce her PM kanalına ve pompa ile manifold arasına birer MFC konması planlanmış ancak bu tasarımı uyguladığımızda pompa ile manifold arasındaki MFC'nin kanallardaki akış kararlılığını önemli boyutta etkilediği (bozduğu) görülmüştür. Bunun üzerine pompa ile manifold arasına MFC konmasından vaz geçilmiş ve MFC'ler sadece PM kanallarında uygulanmıştır.

Çalışmada yine Sierra firması tarafından üretilen SmartTrack 50 serisi akış hızı ölçerler kullanılmıştır (Model kodu: M50-AL-DD-2-PV2-V1-5POINTCAL-50-C9(0)-50 T8D ()). Gaz akış hızı ölçerler görüntü ve boyut olarak MFC'lerden farklı değildir. İçerik olarak aralarındaki tek fark, MFC'lerde bulunan akış hızı kontrol valfi ölçüm cihazlarında bulunmadığından, bunlarla gaz akış hızının kontrolünün mümkün olmamasıdır. Çalışmanın başlangıcında örnekleme cihazı kritik orifis kullanılarak çalışmaya başladıktan sonra kütleli akım hızı ölçerlerin daha ucuz olan rotametrelerle değiştirilmesi planlanmıştı. Ancak daha sonra kontrol modülünün oluşturulmasında dijital akış hızı ölçerlerden gelen sinyallere gereksinim duyulmuş ve bu sinyalleri rotametreler üretmediğinden, dijital akış hızı ölçerlerin rotametrelerle değiştirilmesi fikrinden vaz geçilmiştir.

Pompa

Çalışmada F&J Speciality Products" firması tarafından üretilen DF-1E modeli, yağsız "carbon vane" bir pompa kullanılmıştır. Pompanın bir fotoğrafı ve teknik özellikleri Şekil 27'da görülmektedir. Pompanın en yüksek çekme gücü 115 L dak⁻¹'dir. Ancak bu akış hızına hava akışına direnç gösteren herhangi bir filtre tutucusunun bağlı olmadığı durumlarda ulaşılabilir. Pompaya bir filtre tutucusu takıldığında ulaşılabilen hava akış hızı 80 – 90 L dak⁻¹ seviyesinde olmaktadır. Pompanın kendisinin bir hava akış hızı kontrol ünitesi mevcuttur. Ayrıca, pompanın hava akış hızını, örnekleme süresince geçen toplam hava hacmini, örnekleme süresini gösteren bir de kontrol ünitesi bulunmaktadır. Gerek hava akış hızı kontrol ünitesini ve gerekse kontrol modülünü kanallar bazında kullanmak mümkün olmadığından bu iki ünite bu çalışmada devre dışı bırakılmıştır.



- Pompa türü: Yağsız Karbon Vane ¼ HP, 1725 RPM
- Maksimum kapasite: 115 LPM
- Ulaşılabilecek vakum: 635 mm Hg
- Si diaframlı Al yapısında hava akış hızı kontrol ünitesi
- 14 – 115 LPM arasında ayarlanabilir

Üretici Firma: F&J SPECIALTY PRODUCTS
Model: DF-1E

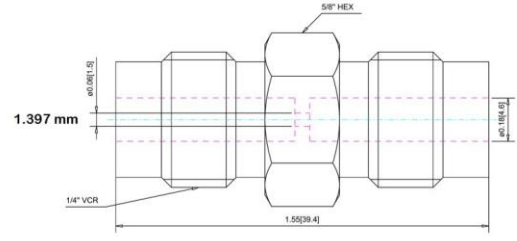
Şekil 27. Çalışmada kullanılan pompa ve teknik özellikleri

Çalışmanın başlangıcında daha güçlü bir pompa temin edilmesi hedeflenmişti. Ancak çalışmalara başlayınca elimizdeki DF-E1 pompasının her kanalda 16.7 L dak⁻¹ akış hızını kolaylıkla sağladığı görülünce yeni bir pompa almak yerine elimizde yedi adet bulunan bu pompaların kullanılmasına karar verilmiştir.

Kritik orifisler

Kritik orifis herhangi bir 6rneklemeye isteminde hava akış hızını belirli bir değerde sabit tutabilmek için kullanılan ucuz bir yöntemdir. Kritik orifisin çalışma prensibi Giriş bölümünde anlatıldığından burada tekrar edilmeyecektir.

Bu projede "Swagelock" firması tarafından üretilen 6LV-4-VCR-6-DM-055P modeli kritik orifisler kullanılmıştır. Orifislerin gövdesi paslanmaz çelik olup delik çapları 1.397 mm'dir. Kullanılan kritik orifislerin bir fotoğrafı ve teknik çizimi Şekil 28'de verilmiştir. Her kanaldaki orifis 6rneklemeye sistemine, diğer bütün bağlantılarda olduğu gibi, hızlı bağlantı sistemiyle (quick-connect) takılıp çıkartılabilecek şekilde değiştirilmiştir. Şekilde görölen orifisler "hızlı bağlantı" modifikasyonu yapılmış orifislerdir.



Şekil 28. Kullanılan kritik orifislerin fotoğrafı ve teknik özellikleri

Manifold ve bağlantılar.

Çalışmada pompa ile kanallardaki MFC veya kritik orifis arasındaki bağlantılar URG firması tarafından üretilen 2000-30HD modeli bir manifold yardımıyla sağlanmıştır. Manifold, teknik özellikleri ve örnekleyicideki bağlantılar Şekil 29'da gösterilmiştir. Manifold 27 cm uzunluğunda olup yaklaşık 7 cm aralıklı dört adet port içermektedir. Portların her birisi URG yapımı filtre tutucuların doğrudan bağlanabileceği şekilde vidalı olarak yapılmıştır. Ancak bu çalışmada yaptırılan bir adaptör yardımıyla her port hızlı bağlantılarla (quick connect) bağlanılabilecek veya devreden çıkartılabilecek hale getirilmiştir. Manifoldun gövdesi alüminyum olup Teflon kaplanmıştır. Bu çalışmada üç port kullanılmıştır. Dördüncü port hava geçirmeyecek şekilde kapatılmıştır.



Şekil 29. Çalışmada kullanılan manifold ve hızlı bağlantılar (quick connect).

Örnekleyicideki bütün bağlantılar 1/2" çapında yüksek yoğunlukta polietilen borularla yapılmıştır. Sitemdeki bütün bağlantı noktaları (filtre tutucuları kritik orifislere bağlayan, orifisleri hava akış hızı ölçüm cihazlarına bağlayan, ölçüm cihazlarını manifolda bağlayan ve manifoldu pompaya bağlayan) adaptörler kullanılarak hızlı bağlantı olanağına sahip hale getirilmiştir. Örneklem sisteminde parçaların birbirine ne şekilde bağlandığı olarak Şekil 29b'de gösterilmiştir.

Hızlı bağlantılar bu çalışmada önemli bir yer tutmuştur. Cihazın normal çalışması sırasında filtre tutucuların örnek değiştirmek amacıyla hızlı bir şekilde çıkartılıp takılması gerektiğinden, filtre tutucularını örneklem sistemine bağlayan bağlantıların quick-connect türünde olması, örnekleri değiştirecek kişilerin hayatlarını kolaylaştıracağından önemlidir. Ancak örneklem sistemindeki diğer bağlantılar örnek toplanması sırasında çıkartılıp takılmadığından bu bağlantıların quick connect olması çok da şart değildir. Ancak cihazın

oluşturulması sırasında her parça tekrar, tekrar takılıp çıkartıldığından, bağlantıların hepsinin çalışmanın başında quick-connect haline getirilmesi hayatımızı çok kolaylaştırmıştır.

Çalışmada kullanılan hızlı (quick connect) bağlantılar ve teknik izimleri Şekil 29c'de görülmektedir. Hızlı destek bağlantısının gövdesi paslanmaz çelikten yapılmıştır. Polietilen (veya başak bir yapıdaki) boru Şekildeki mavi halkanın içerisine sokulduğunda boru hava geçmeyecek bir Şekilde kitlenmektedir. Boruyu tekrar çıkartmak için bağlantıdaki mavi yakaya basarak kilidi açmak gerekmektedir.

Her ne kadar üretici firma olarak Eason Pneumatics gibi bir firma görünse de ve PC 1/2-N03 gibi bir model numarası olsa da bunlar bizim hırdavatılardan 10 TL dolayında bir fiyata temin ettiğimiz basit parçalardır. Bu tür hızlı bağlantılar grubumuzda uzun yıllardır SFU'larda kullanılmaktadır. Basit ve ucuz olmalarına karşılık çok güvenilir bağlantılardır. Senelerdir kullanmamıza karşın bu güne kadar herhangi bir sorun (havayı kaçırmak gibi) yaratmamışlardır.

5. Sonuçlar ve Tartışma

5.1. rnekleyicinin Kütlesel debi kontrolü ile oluşturulması

5.1.1. Sistemin bir araya getirilmesi

Proje başlamadan örnekleyicinin şekli ve özellikleri fikir olarak mevcut idi. Bu sanal tasarım raporun önceki bölümlerinde verilmiştir (şekil 20)

Hedeflerimizde de anlatıldığı gibi üretilcek cihazın tasarıma yönelik zellikleri;

- A. rnekleyicinin üç kanallı bir sistem olacağı, kanallardan birisinde PM1, diğerinde PM2.5, nc kanalda da PM10 rneklerinin eş zamanlı olarak toplanacağı,
- B. Her kanalda belirtilen boyuttaki parçacıkları filtreye yönlendiren bir n ayırıcı (bu çalışmada siklon), bir filtre tutucusu, hava akış hızını 16.7 LPM değerinde sabit tutacak bir kontrol nitesi, bu hava akış hızını ölçecek ve ekranda gösterecek bir ölçüm nitesi (flowmetre) olacağı
- C. Her üç kanal için tek bir pompa kullanılacağı şeklindeydi.

Her ne kadar, cihazın tasarımı önceden fikir olarak mevcut olan tasarıma çok benziyor ise de, bir iki ufak değeriklik de yapılmıştır. Bu değeriklikler aşağıda kısaca tartışılmıştır.

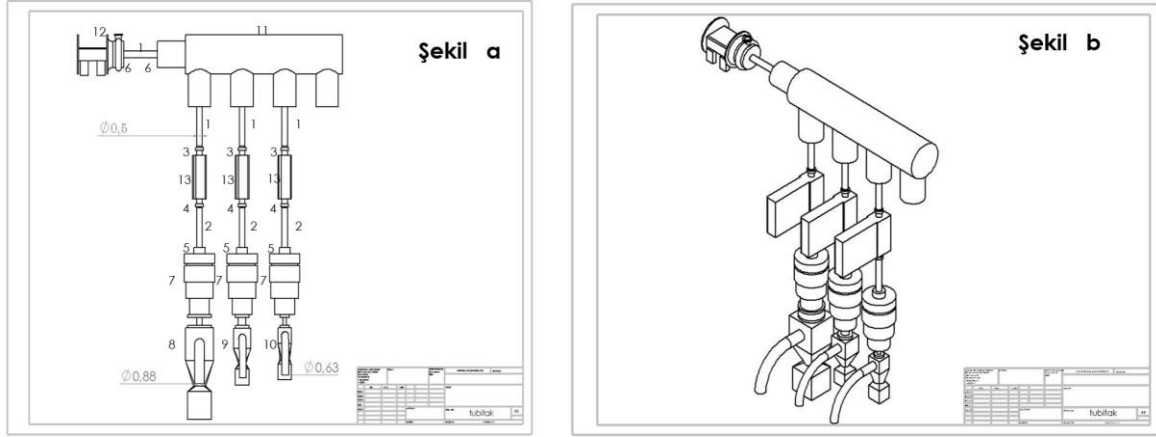
İlk tasarımda kanallardaki ünitelerin aralarındaki bağlantıların 8,4 mm iç çapındaki (1/4") borular ile yapılması düşünülmüştür. Ancak alışma sırasında bağlantı borularının bu kadar ince olmasının pompaya baskı yaparak istediğimiz akış hızını sağlamakta sorun yaşanmasına neden olabileceği düşünülmüş ve gerçekleşen tasarımda bağlantılarda i çapı 12.7 mm (1/2") olan yüksek yoğunlukta polietilen borular kullanılmıştır.

Örnekleyici üç kanallı düşünülmüş ise de bütün kanalların bağlanarak tek bir çıkışla pompaya bağlandığı "manifold" 4 kanallı olarak yaptırılmıştır. Bunun nedeni ileride örnekleyiciyi 4 kanallı olarak kullanabilme şansını elde etmektir. Dördüncü kanalın kullanılması konusunda yapılan çalışmalar ileriki bölümlerde anlatılmıştır.

Tasarlanan örnekleyicinin çizimleri şekil 30'da gsterilmifitir. şekilde cihaz bileşenlerinin tanıtılması için tasarlanan örnekleyicideki her ünite ve bağlantı noktaları rakamlarla tanımlanmıştır. Bunların ne olduğu ve özellikleri aşağıda kısaca anlatılmıştır.

1 ve 2 ile gösterilen bağlantı tüpleri 0.5" i çapında yüksek yoğunlukta polietilen borulardır.

3, 4, 5 ve 6 numara ile gösterilen bağlantılar herhangi bir vidalamaya gerek duyulmaksızın boruların kolayca çıkarılıp takılabildiği ve piyasada "quick connect" olarak bilinen bağlantılar haline getirilmiştir. Bağlantıların bu şekilde olması örnekleyicinin modüler olmasına ve kolayca parçalanıp birleştirilmesine olanak vermiştir. Bu özellikle çeşitli denemelerin yapıldığı üretim aşamasında önemli bir kolaylık sağlamıştır.



Şekil 30 Kütleli hava akış hızı kontrol ünitesi kullanılarak oluşturulan örnekleyicinin teknik özellikleri

7 numara ile gösterilen birimler filtre tutuculardır. Bunlar tamamen teflondan yapılmıştır.

8, 9 ve 10 numara ile gösterilen üniteler sırasıyla PM10, PM2.5 ve PM1 siklonlardır. Her üç siklon da teflon kaplanmış alüminyumdan imal edilmiştir. Hava akış hızı 16.7 LPM olduğu zaman siklonlar sırasıyla 10 µm'den, 2.5 µm'den ve 1.0 µm'den büyük parçacıkların filtreler ulaşmasını engellemektedir. Ancak siklonların hangi boyuttaki parçacıkların arkasındaki filtreye ulaşmasını engelleyeceği geçen hava akış hızına çok bağlıdır.

Daha önceki bölümlerde de tartışıldığı gibi sadece istenen çaptaki parçacıkların filtreler ulaşması için geçen hava akış hızının her kanalda 16.7 LPM değerinde sabit kalması gerekmektedir. Yine daha önce belirtildiği gibi hava akış hızı filtreler parçacıklarla yüklendikçe düşmektedir. Bu düşüş geciktirilebilir ancak ne kadar gelişmiş bir hava akış hızı kontrol ünitesi kullanılırsa kullanışın tamamen önlenemez. Dolayısı ile bu çalışmada da hava akış hızının örnekleme süresince >13 L dak⁻¹ olması hedeflenmiştir. Örnekleme başladığında hava akış hızı her kanalda yaklaşık olarak 16.7 L dak⁻¹ olmaktadır. Ancak zaman geçtikçe bu hız düşebilmektedir. 24 saatlik bir örnekleme süresi sonunda hava akış hızının 13 L dak⁻¹'nin üzerinde olması beklenmiştir.

13 numara ile gösterilen üniteler bu aşamada kütleli debi kontrol birimleri (MFC) olup her kanalda akış hızının 16.7 LPM değerinde sabit kalmasını

sağlamaktadırlar. Bunun siklonların kesim noktalarının belirlenmesinde ne kadar önemli olduğu bir önceki paragrafta anlatılmıştır. İleriki aşamalarda örnekleyicinin maliyet fiyatını düşürmek için MFC'ler hava akış hızı ölçüm cihazları (flowmetre) ile değiştirilmiştir.

11 Numara ile gösterilen ünite her üç kanalın da bağlandığı bir manifold'dur. Bu da siklonlar gibi teflon kaplanmış alüminyumdan imal edilmiştir.

12 numaralı birim pompadır. Çalışmada kullandığımız pompa daha önceki bölümlerde anlatılmış ve Şekil 27'de gösterilmiştir. Pompa dakikada 115 litre hava çekebilen, geçen havayı, hava debisini, örnekleme süresini gösterebilen ve hafızasına kaydedebilen kararlılığı yüksek güvenilir bir pompadır. Pompa ve benzerleri grubumuzda yıllardır başarı ile çalıştırılmaktadır.

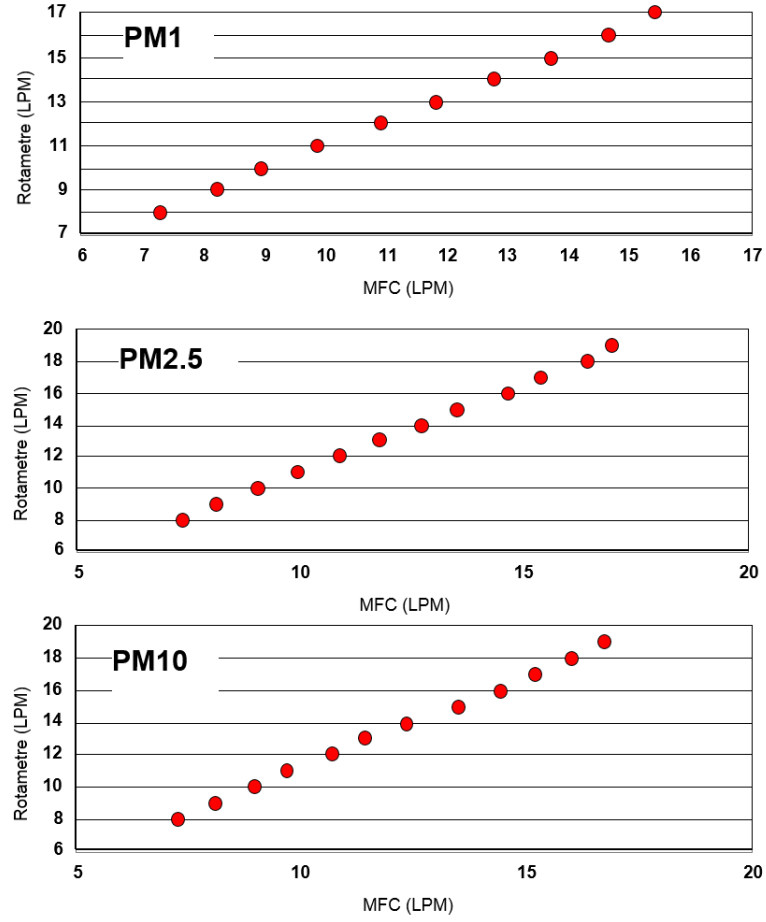
5.1.2. Örnekleyicinin kütleli debi kontrol üniteleri kullanılarak oluşturulması ve hava akış hızlarının izlenmesi

Tasarımdan sonraki aşama cihazın fiziksel olarak bir araya getirilmesi ve bazı testlerinin yapılması olmuştur. Bu işlemler de tamamlanmıştır. Cihaz önce laboratuvarında bir araya getirilmiş önce burada MFC'lerin hava akış hızı kontrolleri yapılmıştır. Bunun siklonların önüne bir kalibre edilmiş rotametre bağlanmış ve MFC'lerin "kesim noktaları" (cut point) bilgisayarda değiştirilerek kontrol ettikleri hava debisi değiştirilmiş ve daha sonra MFC'ler tekrar cihaza takılarak MFC'de görülen hava akış hızı ile rotametrenin ölçtüğü hava akış hızı karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırmanın amacı, MFC'lerin değişik kontrol koşullarında hava akımını ne kadar doğru değerlerde tutabildiğini görmektir. Gerek MFC'ler ve gerekse hava akış hızını ölçen cihazlar (flowmetre) giriş veya çıkışları atmosfere açık olduğunda doğru ölçümleri yaparlar. Ancak bu sistemde MFC'ler ve daha sonraki aşamalarda kullanılacak ölçerler (flowmetre) filtre tutucusu ile pompa arasına yerleştirildiğinden vakum altında çalışmaktadır. Tabii vakum altında havanın hacmi 1 atm basınçtakinden farklı olacağından ölçülen hacim farklı olacaktır. Bu çalışmada MFC ve akış hacmi ölçerleri (flowmetre) ismarlarken sistemde konulacakları noktalarda vakum (basınç) ölçümü yapmış ve bu bilgiyi MFC ve FM'leri üretecek firmaya (Sierra) bildirilmiştir. Firma da cihazları belirtilen vakum koşullarında doğru ölçüm yapacak şekilde hazırlayarak yollamıştır. Dolayısı ile MFC ve FM'lerin gösterdiği akış hacimlerinin doğru olması gerekmektedir. Ancak yine de doğru akış hızlarının kontrol edildiği basit bir ölçüm ile teyit edilmiştir.

Her üç kanaldaki MFC'ler için de elde ettiğimiz kalibrasyon eğrileri Şekil 31'de gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, her üç MFC'nin gösterdiği akış hacimleri rotametre sonuçlarına karşı çizildiğinde oluşan doğrunun eğimi her üç rotametre için de 1.1 dolayındadır. Bu akış hacminde %10'luk bir hataya karşı

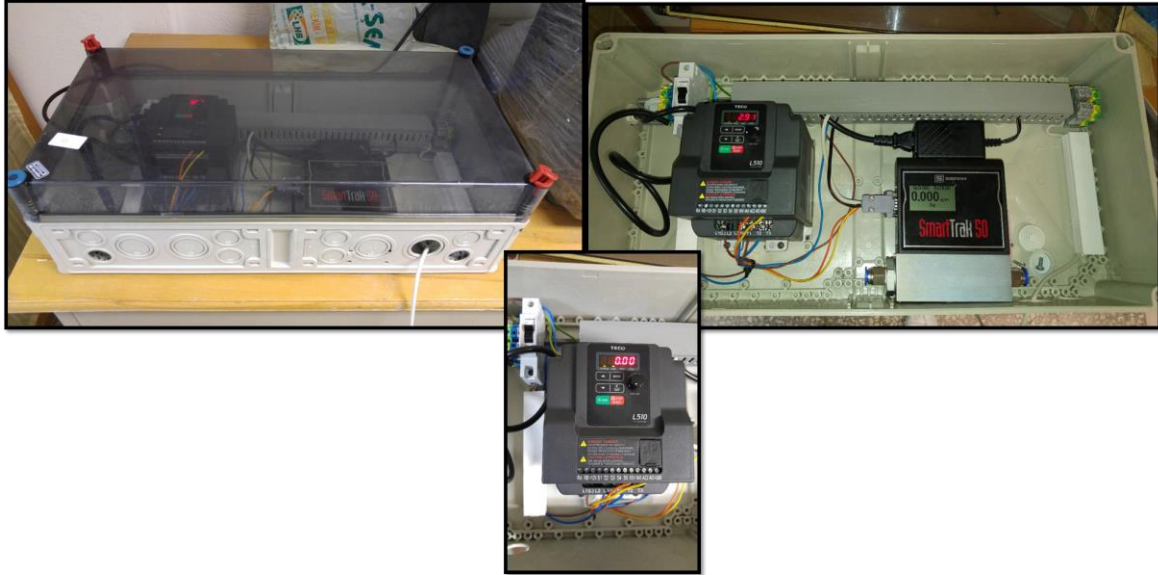
gelmektedir. Bu sonuçları etkileyecek önemli bir hata olarak görülmemektedir. Sonuç olarak kullanılan MFC'lerin hava akış hızını doğru olarak sabitlediğini düşünerek çalışmalara devam edilmiştir. Benzer bir test MFC'leri çıkartıp yerine kritik orifis – FM çiftini kullanmaya başladığımızda da yapılmıştır.



Şekil 31 MFC'ler kullanılarak oluşturulan Örnekleyciden elde edilen hava akış hızı kalibrasyon eğrileri

5.1.3. Geri besleme sisteminin yaptırılması

MFC'ler, daha önce de belirtildiği gibi hava akış hızını belli bir ölçüde istenen değerde tutmaktadır. Ancak filtrenin gözenekleri doldukça hava akış hızı azalmaktadır. MFC bir müddet akış hızını 16.7 L dak⁻¹'da tutmaya çalışmakta ancak bir müddet sonra filtrenin hava akış hızına direnci çok artınca MFC kontrol fonksiyonunu kaybetmekte ve sadece akış hızı ölçer (flowmetre) gibi davranmaktadır. Bu davranışın önüne geçebilmek için MFC'lerin kullanıldığı aşamada bir geri besleme sistemi yaptırılmıştır. Bu sistem MFC'den aldığı hava akış hızı ile ilgili hava akış hızı bilgisini değerlendirmekte akış hızının düştüğünü fark ettiği zaman pompanın devrini arttırarak akış hızının tekrar 16.7 L dak⁻¹ değerine çıkmasını sağlamaktadır. Yaptırılan sistem Şekil 32'de elektronik diyagramı ise Şekil 33 görülmektedir.



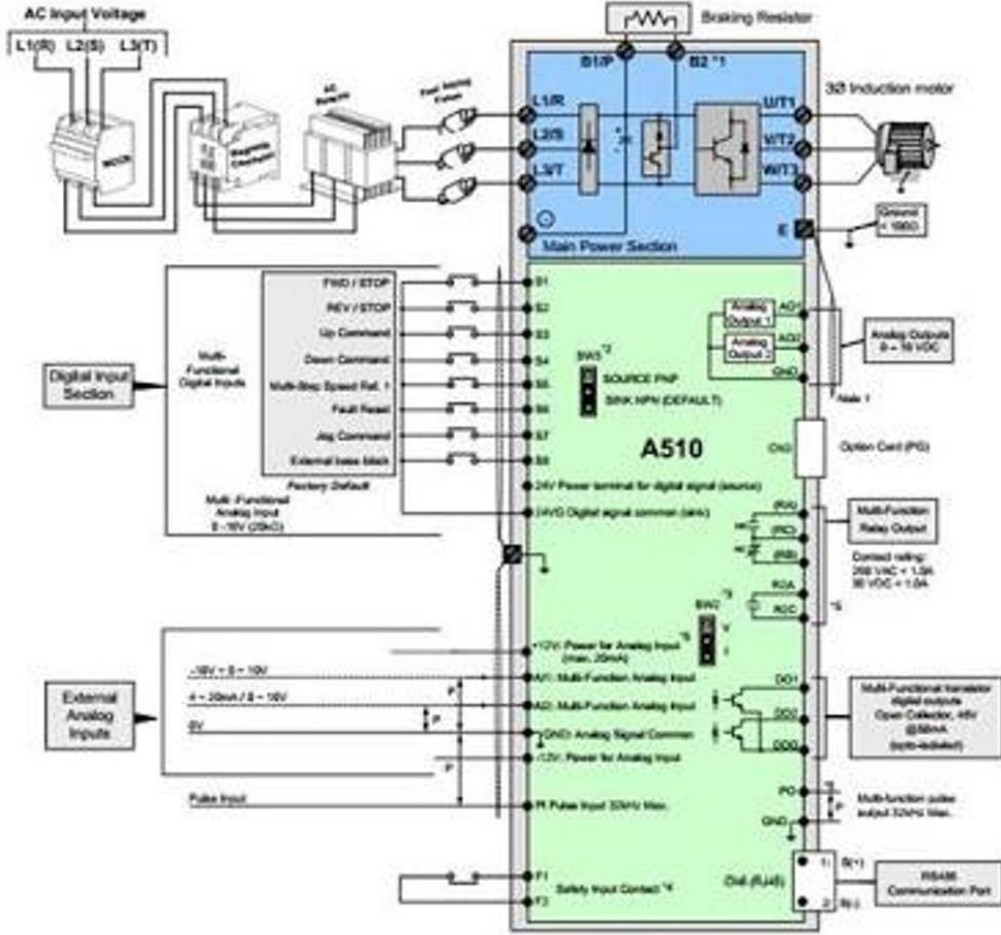
Şekil 32 MFC'ler için yaptırılan geri besleme sisteminin fotoğrafı

5.1.4. MFC ile çalıştırılan örnekleyicinin “Stack Filter Unit” örnekleyici ile karşılaştırılması

Bu dönemde, son olarak, örnekleyici MFC'li haliyle “stack filter unit” olarak bilinen (Gent örnekleyicisi olarak da tanımlanmaktadır) ve PM10 ve PM2.5 örneklerini iki ayrı filtrede toplayan bir örnekleme sistemi ile paralel olarak çalıştırılmıştır. SFU yaygın olarak kullanılan ve doğruluğu sınanmış (Hopke et al., 1997) bir örnekleme sistemidir. Her iki sistemde de örnekler Nuclepore filtreler üzerinde ve 24 – 71 saat arasına sürelerle toplanmıştır.

Çalışma dışarda yapıldığından örnekleme sisteminin içerisine yerleştirileceği geçici bir kabin yapılmıştır. Kabin ve içerisine yerleştirilen örnekleyici Şekil 34'de gösterilmiştir. Bu şekil aynı zamanda örnekleme sisteminin monte halini de

göstermektedir. Fotoğrafta görülen kabin, proje teklifinde taahhüt edilen kutulama işlemi değildir. Örnekleyici son halini aldıktan sonra nihai bir kutulama işlemi yapılmıştır. Fotoğrafta görülen kabin, dışarıda yürütülen karşılaştırma çalışması sırasında örnekleyicinin elektronik aksamının meteorolojik koşullardan zarar görmemesi için oluşturulmuş geçici bir korunaktır.



Şekil 33. MFC'ler için yapıtılan geri besleme sisteminin elektrik diyagramı

Filtreler örneklemeden önce ve sonra 24 saat sürelerle sabit sıcaklık ve nem ortamında şartlandırılmış ve daha sonra 1 µg hassaslığında bir mikro terazi kullanılarak tartılmıştır. SFU ve yeni örnekleyici ile elde edilen kütlelesel konsantrasyonlar karşılaştırılmıştır. Her iki sistemle elde edilen sonuçlar ve birbirlerine oranları Şekil 35'da gösterilmiştir.

12 gün boyunca yapılan çalışmada iki örnekleyici ile elde edilen kütlelesel konsantrasyonların oranı (SFU/yeni örnekleyici) PM2.5 fraksiyonu için 1.0, PM10 fraksiyonu için ise 1.1'dir. Büyük boyutlarda %10 fark SFU daki kesim noktasının 2.5 µm değil 2.2 µm olmasından olabilir. Nedeni ne olursa olsun, şekilde görülen

benzerlik tasarlanan örnekleyicinin MFC'li haliyle alanda çalışmaya hazır olduğunu göstermektedir.



Şekil 34 Örnekleyicinin geçici kabine yerleştirilmiş hali

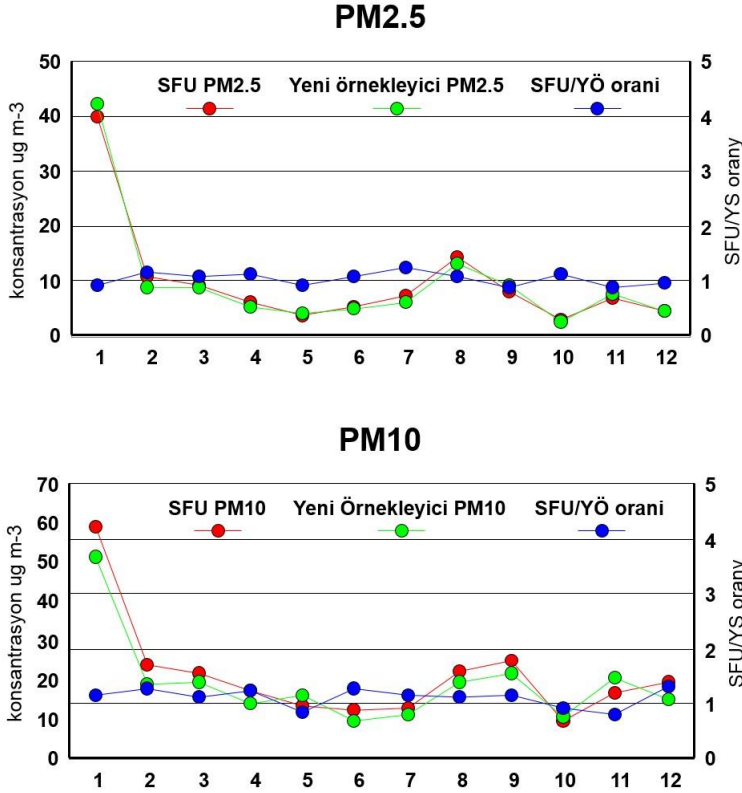
5.2. Örnekleme sisteminin kritik orifis kullanılarak çalıştırılması

Yukarıdaki bölümde projenin birinci aşamasında, tasarlanan örnekleyicinin hava akış hızının kütleli akış hızı kontrol üniteleri kullanılarak çalıştırılması, sürecinde yapılan çalışmalar tartışılmıştır. Yine daha önce ifade edildiği gibi, kütleli akış hızı kontrol cihazları çok pahalı bir teçhizatır. Her birisinin fiyatı >\$3000 olduğundan ve her bir kanalda da birer adet kontrol ünitesi kullanıldığından üç kanallı bir örnekleyicide sadece MFC'lerin tutarı >\$9000 olmaktadır. Projenin çıkış noktası ucuz bir örnekleyici yapmak olduğundan, projenin ikinci aşamasında en büyük gider kalemi olan MFC'ler aynı işi görebilecek daha ucuz bileşenlerle değiştirilmiştir.

Hava akış hızının kontrolünde kullanılacak nispeten ucuz bileşen olarak kritik orifis seçilmiştir. Kritik orifisin ne olduğu, nasıl çalıştığı ve bizim kullandığımız orifislerin marka ve modelleri daha önceki bölümlerde anlatıldığından bu konular burada tartışılmayacaktır.

Kritik orifisler kütleli hava akış hızı kontrol ünitelerine göre çok ucuz araçlardır. Bir orifis fiyatı 300 TL dolayındadır. Her kanalda birer orifis kullanılacağı düşünülürse, bu cihazların kullanılması halinde hava akış hızı kontrolü için

yapılacak harcamanın 900 - 1000 TL dolayında olduğu görülebilir (vergesi ve Türkiye'ye getirilmesi için yapılan harcamalarla birlikte üç orifisin bize maliyeti 1200 TL dolayında olmuştur). Bu tutarın üç MFC'nin fiyatı olan \$9000 veya yaklaşık 30000 TL'nin yanında çok ufak olduğu açıktır. Bu nedenle projenin ikinci bölümünde MFC'ler kritik orifislerle değiştirilmiştir.

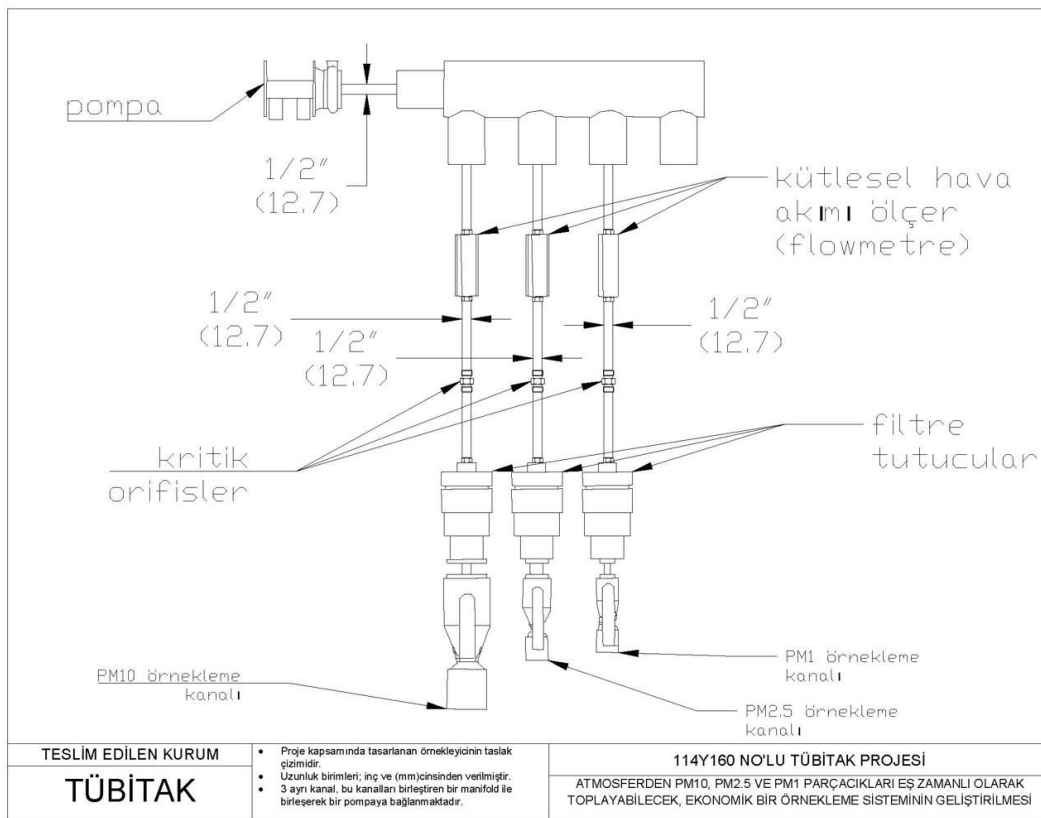


Şekil 35 MFC kullanarak oluşturulan Örnekleyiciden elde edilen PM1, PM2.5 ve PM10 konsantrasyonlarının "stack filter unit" örnekleyicisinden elde edilen PM2.5 ve PM10 kütleli konsantrasyonları ile karşılaştırılması

Kritik orifislerin kütleli hava akış hızı kontrol cihazlarında olduğu gibi hava akış hızını ölçme özelliği olmadığından, MFC'lerin yerine orifisler takılınca her kanala birer tane hava akış hızı ölçüm cihazı eklenmesi gerekmiştir. Bu çalışmada kullanılan hava akış hızı ölçüm cihazları kütleli hız ölçüm cihazları olup, türünün en hassas ama en de pahalı olanlarıdır. Kullanılan hava akış hızı ölçüm cihazının teknik özellikleri önceki bölümlerde anlatılmıştır, o nedenle burada teknik özellikleri tartışılmayacaktır. Hava akış hızı ölçerlerin daha ucuz versiyonları mevcuttur. Bu çalışmada başlangıçta kütleli hava akış hızı ölçüm cihazlarının, fiyatı pahalı olduğundan, geçici bir süre kullanılması ve daha sonra çok daha ucuz olan rotametrelerle değiştirilmesi planlanmıştır. Ancak zaman içerisinde örnekleme süresince hava akışını takip edecek ve sonunda toplam hava hacmini bilgisayara aktaracak bir kontrol modülünün yapılıp sisteme entegre edilmesi gerekince, bu modüle hava akış hızı sinyali verecek bir ünite

gerektiğinden ve rotametrelerin bu tür bir bilgiyi vermesi mümkün olmadığından kütleli hava hız ölçerlerin rotametrelerle değiştirilmesi fikrinden vaz geçmek gerekmiştir.

Örnekleme sisteminin kritik orifisli hali Şekil 36'da görülmektedir. Sistem genel hatlarıyla MFC kullanılarak bir araya getirilen sistemden çok farklı değildir. Aradaki tek fark MFC'nin yerine bir akış hızı ölçer ve bir de kritik orifis takılmış olmasıdır. Bağlantılar yine sistemin kolayca monte ve demonte edilebilmesi için "hızlı" bağlantılardır. Havayı örnekleyici içerisinde taşıyan tüpler MFC'li tasarımda olduğu gibi 1/2" çapındadır.



Şekil 36. Kritik orifis kullanılarak oluşturulan örnekleyicinin teknik özellikleri

Kritik orifisli hali sistemin son hali olduğundan, örnekleyici bu hale geldikten sonra çeşitli performans testlerinden geçirilmiş ve en sonunda da bir kabin içerisine yerleştirilmiştir.

5.3. Değişik filtre türlerinin hava akış hızına etkisi

Böyle bir örnekleyicide hava akış hızının kararlılığı çok önemli bir parametredir. Daha doğrusu en önemli parametredir. Parçacıkların atmosferden örneklenmesinde, raporun daha önceki bölümlerinde defalarca belirtildiği gibi,

filtrenin gözenekleri tıkanıkça hava geçişine gösterdiği direnç artmaktadır. Hava akış hızını kontrol eden ünite olan MFC veya kritik orifis bu dirence rağmen hava akış hızını sabit tutmaya çalışsa da bir müddet sonra hava akış hızı düşmeye başlar.

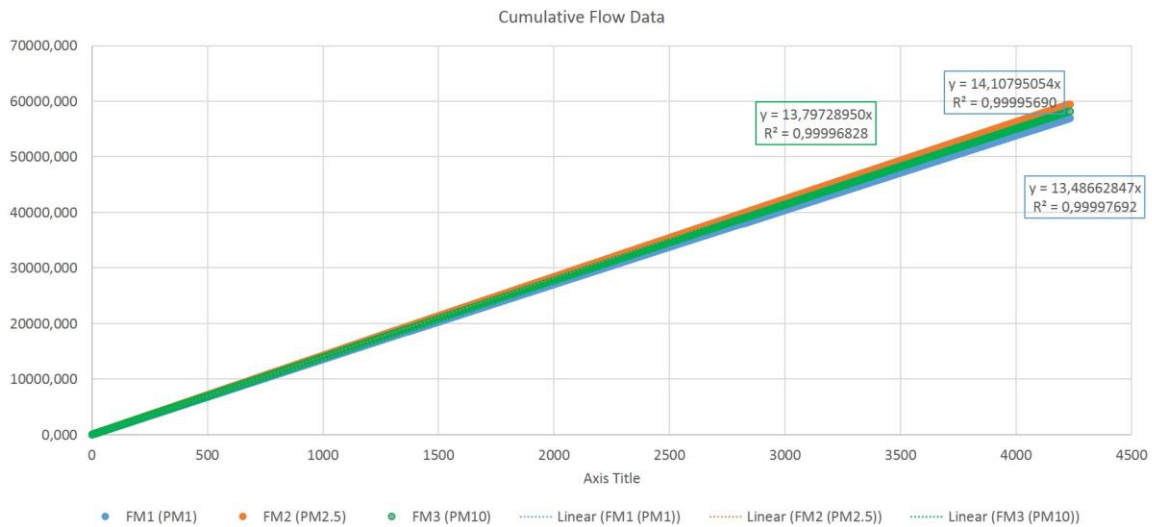
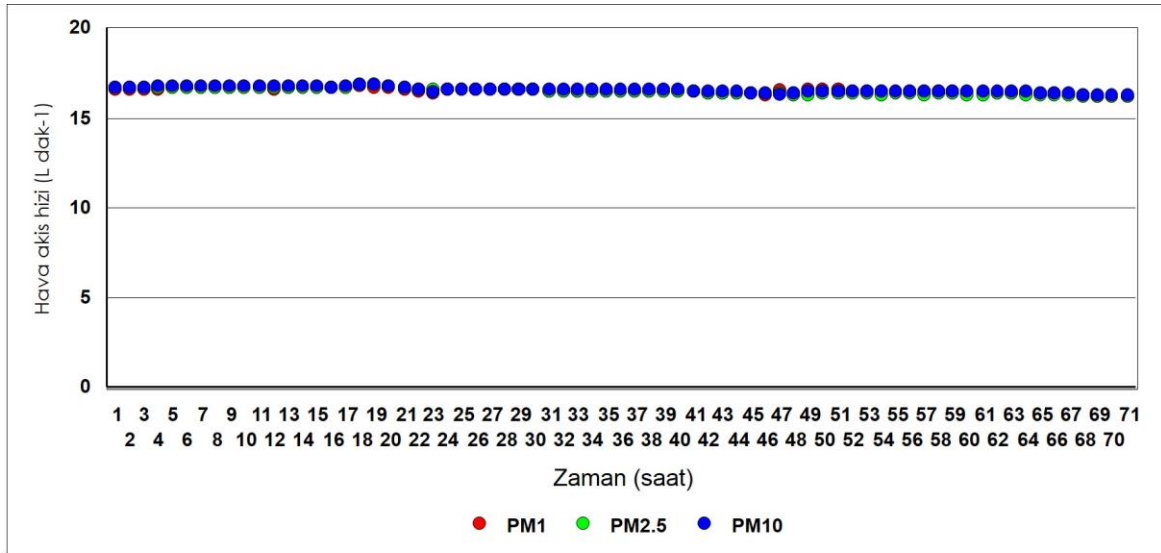
Tek bir filtreden oluşan örnekleme sistemlerinde hava akış hızının zaman içerisinde azalması, geçen toplam hava hacmi, gaz sayacı gibi basit bir sistemle izlendiği sürece, çok önemli değildir. Ancak, farklı boyutlardaki parçacıkları farklı filtrelerde toplayan örnekleyicilerde ki bu çalışmada üretilen örnekleyici de bu sınıfta bir cihazdır, hava akış hızının değişmesi siklonların tuttukları parçacık boyutunu değiştirdiğinden aletin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu sadece çalışmada tasarlanan örnekleyici için geçerli olmayıp, tutulan parçacık çaplarının ön bir siklon veya impaktör tarafından belirlendiği bütün örnekleyiciler için geçerlidir.

Örnekleyicilerde hava akış hızının sabitliğini etkileyen en önemli parametre havadaki parçacık konsantrasyonudur. Havadaki parçacık yükünün çok yüksek olduğu hallerde (örneğin Sahra tozu episotları sırasında) ne tür örnekleyici kullanılırsa kullanılsın filtreler bir müddet sonra tıkanacaktır. Atmosferdeki parçacık konsantrasyonunun yanında cihazın performansını etkileyen enstrümantal parametreler de mevcuttur. Bunlar, pompanın gücü, hava akış hızı kontrol ünitesinin performansı ve kullanılan filtrenin türüdür. Güçlü pompalarla ve iyi kontrol birimleri ile hava akış hızındaki düşüşü geciktirmek mümkün olabilir (ama tamamen durdurmak mümkün değildir). Değişik tür filtreler hava akışına farklı dirençler göstermektedir. Hava akış hızına yüksek direnç gösteren bir filtre kullanılması durumunda hava akış hızında düşüş daha çabuk başlayacaktır. O nedenle bu tür cihazların kullanılması durumunda hava akış hızına gösterdiği direnç düşük olan filtreler kullanılması gerektiği düşünülebilir. Ancak filtrelerin hava geçişine gösterdiği direnç, filtre seçiminde önemli bir parametre olmakla birlikte, tek kriter değildir. Kullanılacak filtreler seçilirken düşük blank (kör) değerlerinin olması ve fiyatı da önemli kıstaslardır.

Grubumuzda bu güne kadar yapılan çalışmalarda iki tür filtre ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi Teflon (PTTF) filtrelerdir. Bu tür filtreler eser element kör değerleri çok düşük ve hava akışına dirençleri yüksek olmayan filtrelerdir. Ancak teflon filtreler nispeten pahalıdır. İkinci tür filtre ise piyasada "Nuclepore" olarak bilinen polikarbonat yapısındaki filtrelerdir. Bunların da eser element kör değerleri çok düşüktür. Ne var ki geçen havaya gösterdikleri direnç yüksektir. Buna karşılık Nuclepore filtreler teflon filtrelere nazaran daha ucuzdur.

Bu çalışmada hava akışına gösterdikleri direnç açısından iki farklı grubu temsil eden Teflon ve Nuclepore filtreleri kullanarak örnekleyicinin her üç kanalındaki hava akış hızının ne şekilde değiştiği incelenmiştir.

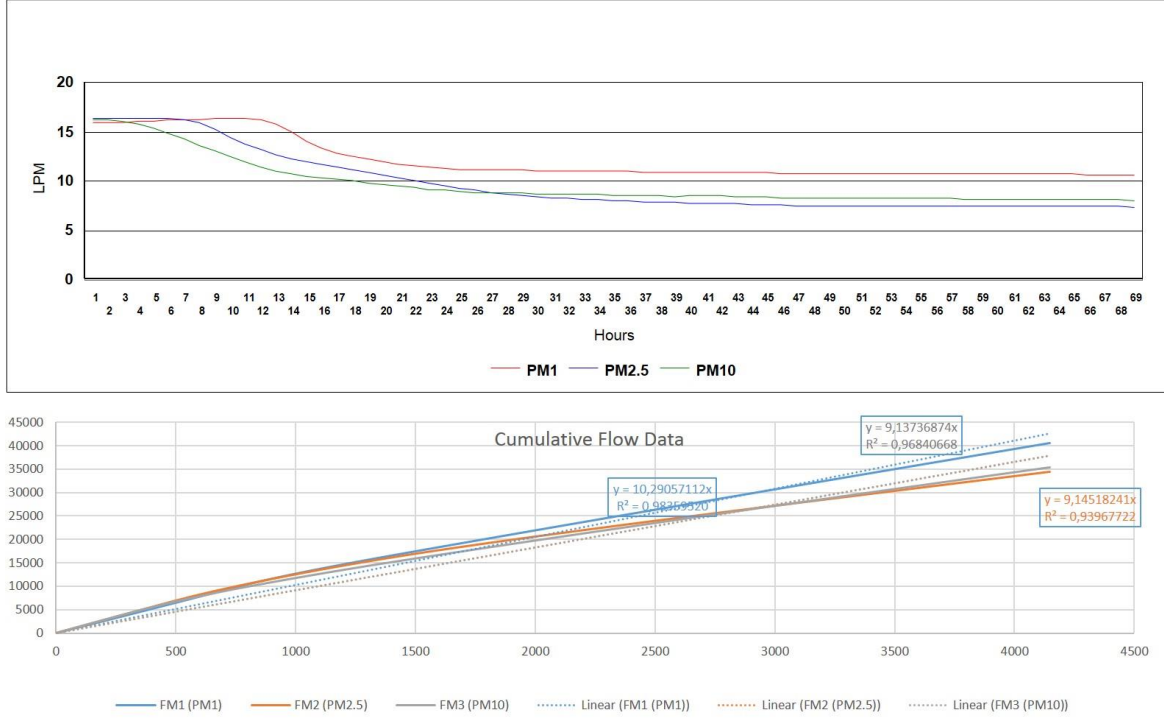
Teflon ve Nuclepore filtreler kullanılarak Çevre Mühendisliği bölümünün dışındaki istasyonda 72 saat süre ile örnek toplanmış ve bu süre boyunca hava akış hızı 10 saniyelik aralıklarla izlenmiştir. Teflon ve Nuclepore filtrelerle alınan sonuçlar Şekil 37 ve Şekil 38'de gösterilmiştir.



Şekil 37 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 1: Teflon filtre.

Teflon filtreler kullanıldığı zaman hava akış hızının 72 saat boyunca çok değişmediği görülmektedir. Örnekleme başladığında bütün kanallarda 16.7 L dak⁻¹ olan hava akış hızı 72. saat sonunda her üç kanalda 16.3 L dak⁻¹ olarak ölçülmüştür. Bu 72 saatte %2,4 kadar bir düşüşe tekabül etmektedir. Bu kadar küçük bir azalmanın tutulan parçacık boyutunda önemli bir değişiklik yapmayacağı açıktır. Sonuç olarak teflon filtreler ile yapılan denemenin çok cesaret verici sonuç verdiği söylenebilir. Varılan bu sonuç Ankara gibi nispeten

kirli bir atmosferde bile teflon filtrelerle uzun süreli örnek toplamanın mümkün olduğunu göstermektedir.



Şekil 38 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 2: Nuclepore filtre

Bu denemede kullanılan Teflon filtre esasında hava akışına çok az direnç gösteren bir grup filtreyi temsil etmektedir. Bu filtre ile alınan iyi sonuç, quartz ve selüloz fiber filtreler, selüloz asetat veya nitrat yapısındaki filtreler gibi diğer düşük dirençli filtrelerin de tasarlanan sistemde güvenile kullanılabilceğini göstermektedir.

Nuclepore filtrelerle yapılan benzer denemede aynı sonuç alınamamıştır. Nuclepore filtre kullanıldığı zaman da başlangıçta her üç kanalda da 16.7 L dak⁻¹ olan akış hızı PM1 kanalında 13. saatten sonra, PM2,5 kanalında 8. saatten sonra PM10 kanalında ise 4. saatten sonra düşmeye başlamıştır. 72.saat sonunda hava akış hızı PM1 kanalında 11 L dak⁻¹, PM2,5 kanalında 8 L dak⁻¹ ve PM10 kanalında ise 7 L dak⁻¹ olmuştur. Daha önce tartışılan Şekil 22, 23 ve 24'e bakıldığı zaman PM₁ siklonu tarafından çapı 1 µm'nin üzerindeki parçacıkların tutulması gerekirken, bu siklondan geçen hava akış hızı 11 L dak⁻¹'ya düştüğü zaman Çapı yaklaşık 1.5 µm'nin altındaki parçacıkların filtrelere ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde, PM2.5 kanalında sadece çapı 2.5 µm'nin altındaki parçacıkların filtreye ulaşabilmesi gerekirken, bu kanalda hava akış hızı 72 saat sonunda 8 L dak⁻¹ düşünce 10 µm den küçük bütün parçacıkların filtreye ulaşacağı görülmektedir. PM₁₀ kanalında akış hızı 72 saat sonunda 7 L dak⁻¹'ya düştüğünde siklon 20 µm den küçük parçacıkların filtreye ulaşmasına izin

vermektedir. Görüldüğü gibi Nuclepore filtre kullanıldığında örnekleme sisteminin bütün özellikleri değişmektedir.

Tabii bu deneme oldukça uç koşullar altında yapılmıştır. 3 günlük örnekleme süresi tipik bir örnekleme süresi değildir. Daha gerçekçi bir örnekleme süresi olan 24 saat sonunda kanallarda ölçülen hava akış hızı 72 saatte ölçülenlerden biraz daha yüksek ise de, bizim üzerinde kalmaya çaba sarf ettiğimiz 13 L dak⁻¹'nin altındadır. Ayrıca, parçacık konsantrasyonu Ankara'dan daha yüksek olan bölgelerde bu düşüş daha erken başlayabilecektir.

Bu denemenin sonucunda Nuclepore filtrelerin tasarlanan örnekleme için çok uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Daha önce de ifade edildiği gibi Nuclepore filtrelerin fiyatlarının diğer filtrelere göre belirgin derecede düşük olması nedeniyle bu filtrelerin kullanılmasından vazgeçmeden önce belirli durumlarda kullanılıp, kullanılamayacağı incelenmiştir. Bu amaçla iki deneme yapılmıştır. İlk denemede sadece tek bir kanalda (PM₁) örnekleme yapılmış ve hava akış hızının ne şekilde değiştiği izlenmiştir. İkinci denemede ise üç kanalda örnekleme yapılmış ancak bir yerine iki pompa kullanılmıştır. Hava akış hızının her iki durumdaki değişimi 1 pompa-1 kanal için Şekil 39'da 3 kanal ve 2 pompa ile yapılan denemenin sonuçları ise Şekil 40'da görülmektedir. Tek kanalda yapılan ölçümlerde hava akış hızının 72 saat sonunda yaklaşık 13 L dak⁻¹'ya düştüğü görülmektedir. Bu bizim uygulanabilir bulduğumuz bir değerdir. Üretici firma tarafından PM₁ siklon için oluşturulan kalibrasyon eğrisine bakıldığında, hava akış hızı 13 L dak⁻¹ olduğu zaman siklonun kesim noktasının 1.2 µm olduğu görülmektedir. Bu bize Nuclepore filtrelerin tek bir kanalda, özellikle 24 saati geçmeyecek örneklemeelerde kullanılabileceğini göstermiştir.

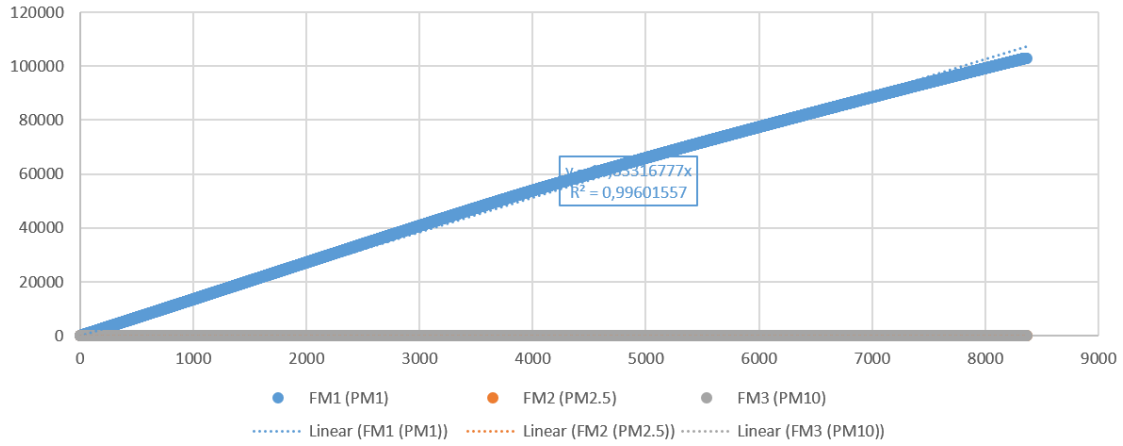
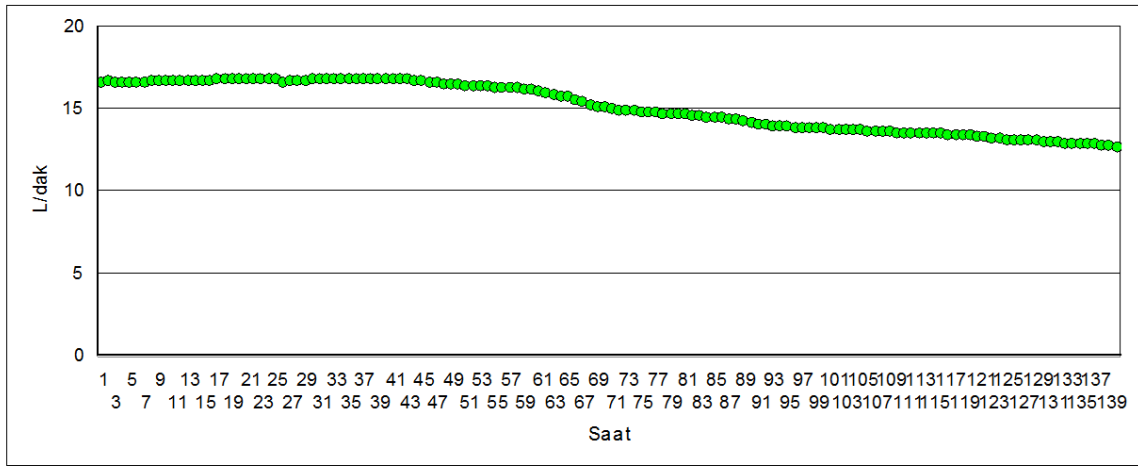
Üç kanalda iki pompa kullanılarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar (Şekil 40) aynı derecede cesaret verici olmamıştır. Her ne kadar hava akış hızının > 16 L dak⁻¹ olduğu süre uzamış ise de 24 saat sonunda hava akış hızı bütün kanallarda düşmeye başlamıştır.

Şekil 39 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 3: Nuclepore filtre, 1 kanal ve 1 pompa

Şekil 40 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 4: Nuclepore filtre, 3 kanal ve 2 pompa

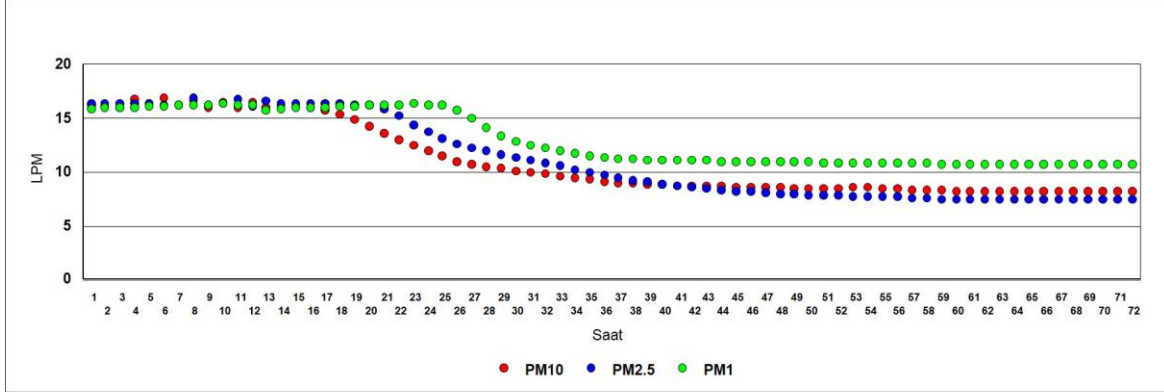
5.4. Tekrarlanabilirlik testleri

Örnekleme sisteminde tekrarlanabilirlik her başlangıçta hava akış hızının aynı değere sahip olması ve zaman içerisindeki değişimin her sefer aynı şekilde olmasıdır. Örneklemin ne kadar tekrarlanabilir olduğunu anlamak için küçük bir deneme yapılmıştır. Bu amaçla teflon filtreler sistem yüklendikten sonra örnekleyici on kere birer saat süre ile çalıştırılmıştır ve her kanaldaki hava akış hızının değişimi 10 saniyelik aralıklarla izlenmiştir. Sonuçlar Şekil 41'de gösterilmiştir.



Şekil 39 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 3: Nuclepore filtre, 1 kanal ve 1 pompa

Şekilden de görülebileceği gibi tasarlanan örnekleyicide örneklemin tekrarlanabilirliği çok iyidir. Başlangıçta her kanalda 16.7 L dak^{-1} olan akış hızı bir saat sonundaki değişimi $<2\%$ 'dir.



Şekil 40 Hava akış hızının zaman içerisindeki değişimi 4: Nuclepore filtre, 3 kanal ve 2 pompa

5.5. Kontrol ünitesinin yaptırılması

Tasarlanan örnekleyici konusunda yapılan son çalışmalar kontrol ünitesinin oluşturulması, örnekleyicinin bir kabine yerleştirilmesi çalışmaları olmuştur. Her örnekleyicide örnekleme sırasında toplanan bilgilerin kullanıcıya aktarılmasına yönelik bir kontrol modülü bulunmaktadır. Toplanan bilgiler arasında en önemlisi örnekleme süresince filtreden geçen toplam hava hacmidir. Bu bilgi konsantrasyon hesabı için temel bir gereksinimdir. Ayrıca, hava akış hızı bilgisi de siklonların kesim noktalarını takip etmek için gerekli bir bilgidir.

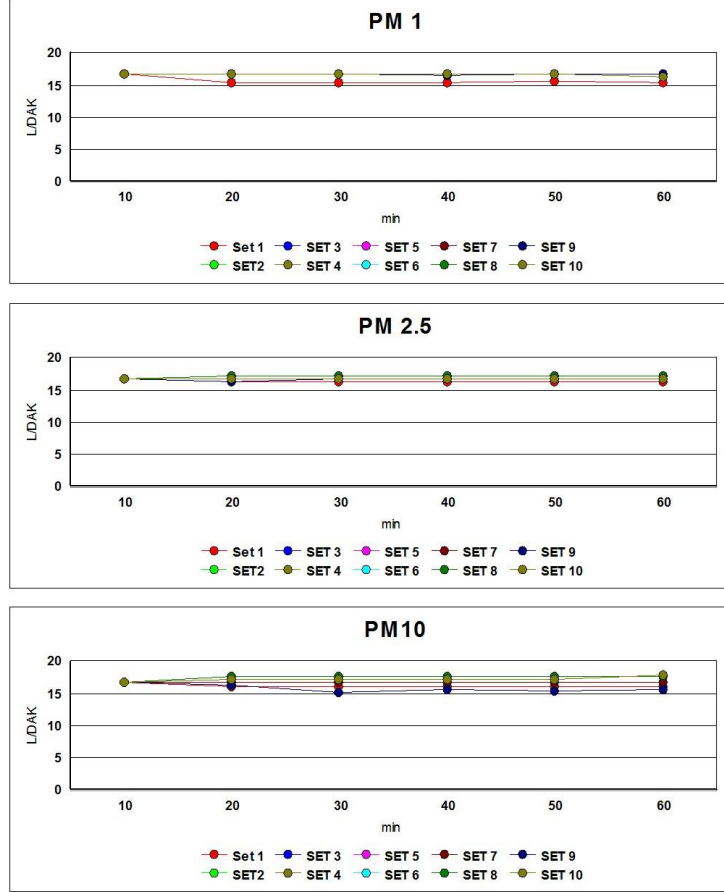
Bu çalışmada da her kanaldaki hava akış hızını 10 saniyelik aralıklarla takip eden ve buradan hareketle örnekleme sonunda her üç kanalda filtrelerden geçen hava hacmini hesaplayan bir kontrol modülü yaptırılmış ve kullanılmıştır.

Kontrol modülü her hava akış hızı sinyalini her kanalda bulunan hava akış hızı ölçerlerden almaktadır. Elektriğin kesilmesi durumunda elektrik kesintisinin zamanı ve süresi de bildirilmektedir.

Dolayısı ile bütün örnekleme sistemini 10 saniyelik aralıklarla izlemek mümkün olabilmektedir. Bu tür örnekleme sistemlerinde 0 saniye aralıklı veri çok kullanılan bir entegrasyon aralığı değildir. Bu nedenle istendiği takdirde örnekleme sisteminin tamamlanmasını takiben sadece örnekleme sırasında filtrelerden geçen toplam hava hacminin kaydedilmesi de mümkündür. Kontrol ünitesinin örnekleyici kabinindeki görünümü Şekil 42'de gösterilmiştir.

Kontrol modülünün ana parçasını elektronik kontrol kartı oluşturmaktadır. Örnekleme sisteminde kontrol ve veri okuma işlemlerinin yürütülmesi amacı ile tasarlanan elektronik kartında MicroChip firmasının ürettiği PIC (Peripheral Interface Controller) ailesinden 18F452 mikro denetleyicisi kullanılmıştır.

Elektronik kontrol kartının şematik gösterimi ve bir fotoğrafı Şekil 43'de gösterilmiştir.



Şekil 41 Tekrarlanabilirlik testinin sonuçları

Sisteme örnekleme zamanının belirlenmesi için bir Gerçek zamanlı saat (Real Time Clock - RTC) entegresi yerleştirilmiştir. Bu amaçla Dallas Semiconductor Firmasının ürettiği DS1302 RTC'si kullanılmıştır. Örnekleme sonucu elde edilen verilerin depolanabilmesi amacıyla kartta yine MicroChip firmasının ürettiği 24LC512 harici bellek (EEPROM) konulmuştur.

Elektronik kontrol kartında ayrıca akım-ölçerlerden gelen RS232 sinyallerini TTL'e çeviren MAX232 entegrelerinden 2 adet kullanılmıştır.

5.5.1 Örnekleme Sistemi Mikro Denetleyici Programı:

Mikro denetleyicinin programlanması için CCS-C PIC derleyicisinden yararlanılmıştır

- 1- Kontrol kartı mikro denetleyici programı ana döngüsünde örnekleme süreci ile butonlar kontrol edilmektedir. Kullanıcı tarafından örnekleme süreci anahtarının "1" konumuna getirilip/getirilmediği kontrolü yapılmakta, anahtar "1" konumuna alındığında gelen sinyal ile örnekleme süreci başlatılmaktadır. Bu aşamada her 10 saniyede bir akım ölçerlerden okumalar alınarak bir önceki okuma üzerine toplanmaktadır. Okuma sayısı 6 olduğunda bir dakikalık toplam 6 okuma sonucunun ortalaması alınarak toplam akım değeri olarak bir önceki akım değeri üzerine eklenmektedir.



Şekil 42 Kontrol modülünün örnekleme istemindeki görünümü

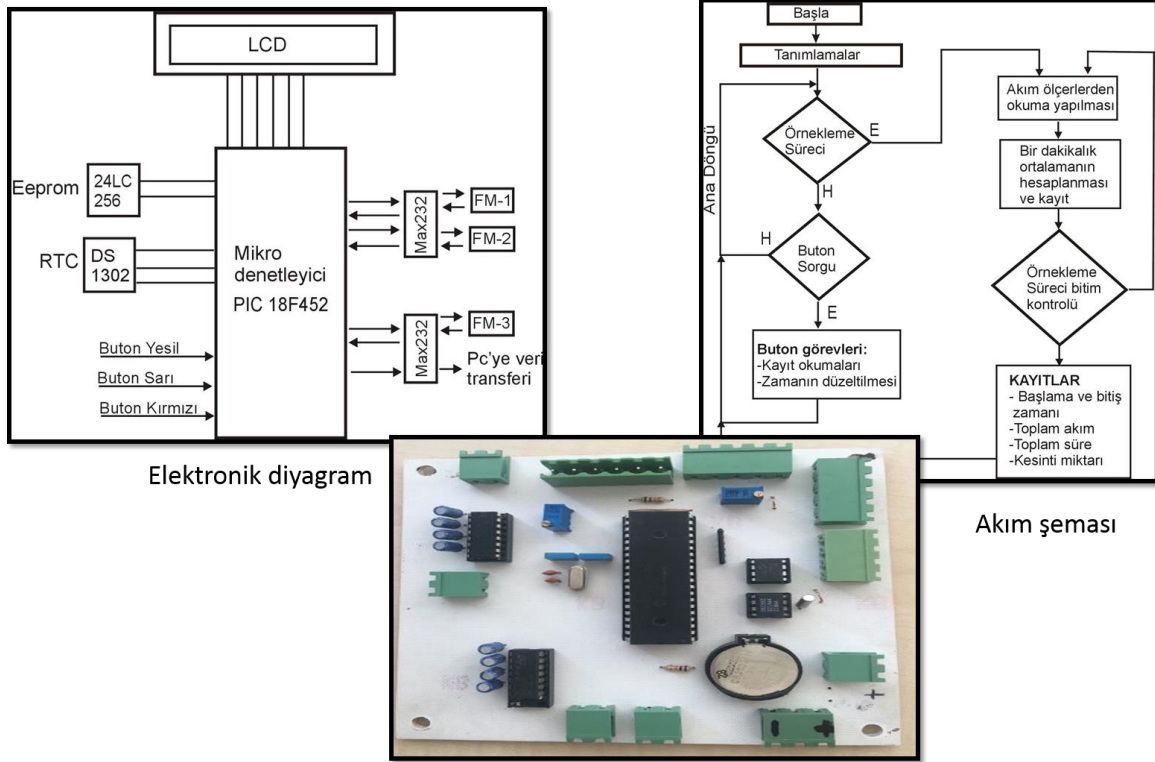
$n1+n2+n3+n4+n5+n6/6=N1$ Bir dakika akım miktarı litre/dakika

$N1+N2+N3+ \dots +Nson$ Toplam geçen akım miktarı litre/dakika

- 2- Kontrol anahtarının "0" konumuna çekilmesi ve mikro denetleyiciye giden sinyalin kesilmesi ile mikro denetleyici örnekleme sürecinin bitirildiğini kabul eder ve kayıt işlemlerine başlar. İlk olarak örnekleme süreci başlangıç zamanı ile bitiş zamanı kaydedilir. Daha sonra akım ölçerlerden elde edilen toplam akım miktarlarının kayıtları ile toplam örnekleme süresi ve var ise elektrik kesinti sayısı kayıtları ile bu işlem bitirilerek ana menüye geri dönlür.
- 3- Mikro denetleyici programı ana döngüsünde yapılan bir diğer işlem ise butonlara basılıp/basılmadığının kontrolünün yapılmasıdır. Butonlara basılması ile hangi butona basılmış ise ona yüklenen görevler mikro denetleyici tarafından yapılmaktadır. Buton görevleri ile ilgili ayrıntılı açıklamalar aşağıdaki bölümde detaylı olarak verilmiştir.

5.5.2. Cihazın Kullanımı:

Partikül örnekleme cihazı açma-kapama düğmesinin 1 konumuna getirilmesi ile enerji verilerek çalışması başlatılır. İlk enerji verildiğinde cihazın ön tarafında bulunan siyah anahtarın "0" konumunda olmasına dikkat edilmelidir. Siyah anahtar "1" konumunda olursa doğrudan pompayı çalıştırarak örnekleme sürecinin başlamasına neden olmaktadır.



Şekil 43 Kontrol modülünün elektronik diyagram ve akım şeması

Sistemin açılmasından sonra 2 saniyelik tanıtım ekranı ile "Ana Menüye" geçilmektedir.

Ana Menü görünümü:
AA/GG SS:DD:ss (tarih ve zaman)
YESİL = KAYITLAR
KIRMIZI = SAAT-AYAR
DURUM=0 XXXXX

Örnekleme Sürecinin Başlatılması: Süreci başlatılması için ana menüde iken siyah anahtarın "1" durumuna getirilmesi yeterli olmaktadır. Anahtarın "1" durumuna getirilmesi ile anahtar yanında bulunan led ışık yanmakta ve pompa çalışmaya başlamaktadır.

Örnekleme Süreci Boyunca Ekran Görüntüsü:
BAS= AA/GG SS:DD:ss

FM1=XX.XXX SAY=0-6
FM2=XX.XXX SAN=XX
FM3=XX.XXX TOP=XXXXX

İlk satırda örnekleme sürecinin başlangıç tarihi ve zamanı görüntülenir. Sonraki 3 satırda ise her akım ölçere ait 10 saniyelik ölçüm miktarları gösterilir. SAY on saniyelik sayaç göstergesi; SAN bir dakikalık sürenin hangi on saniyesinde bulunduğu; TOP ise örnekleme süreci boyunca geçilen toplam dakikayı göstermektedir.

Örnekleme Sürecinin Bitirilmesi: İstenildiği anda siyah anahtar "0" konuma getirilerek örnekleme süreci tamamlanır. Örnekleme sürecinin bitirilmesi ile sistem ana menüye dönmektedir.

Enerjinin Kesilmesi: Enerjinin kesilmesi durumunda tekrar enerji geldiğinde sistem kaldığı yerden çalışmasına devam etmektedir.

Kayıtların Okunması: Sistem ana menüde iken "YESİL" butona basılarak kayıt ekranına gelinir.

Kayıt Ekran Görüntüsü:
SON KAYIT NO= XXX
KIRMIZI= TARİH
SARI= SONUCLAR
YESİL= ESKİ SONUCLAR

Bu ekranda en son yapılan örnekleme sonuçları verilmektedir.

Tarih Ekranı Görüntüsü:
KAYIT NO= XXX
BAS= YY/AA/GG SS:DD (Örnekleme başlama tarih ve zamanı)
BIT= YY/AA/GG SS:DD (Örnekleme bitiş tarih ve zamanı)
KESSAY= XXX SARI=GERİ
KESSAY: Kaç defa enerji kesildiğini belirtir.

SARI butona basılarak bir önceki menüye (kayıt ekranı) dönlür.

Kayıt ekranı menüsünde Sarı butona basılarak sonuçlar görülebilir.

Sonuç Ekranı Görüntüsü:
FM1=XXXXX.XXX
FM2=XXXXX.XXX
FM3=XXXXX.XXX
TOP= XXXXX KIR=GERİ

İlk üç satırda her akım ölçere ait toplam sonuçlar verilmektedir. Son Satırda TOP= ile örnekleme toplam zamanı (dakika) gösterilmektedir. Bu menüden kırmızı butona basılarak kayıt menüsüne geri dönülmektedir.

Eski kayıtların okunması: Kayıt menüsünde YESİL butona basılarak eski örnekleme kayıtlarının incelenmesi mümkündür.

Eski kayıt menüsü
KAYIT NO= XXX
KIRMIZI= TARİH
SARI= SONUCLAR
YESİL= Eski Kayıt

YESİL butona basılarak kayıt numarasının azaltılması sağlanır. İstenilen kayıt numarasına gelindiğinde son kayıt bilgilerinde açıklandığı gibi KIRMIZI buton ile tarih ve zaman SARI buton kullanılarak sonuç değerleri incelenebilecektir.

Zamanın Ayarlanması: Zamanın ayarlanması gerektiğinde ana menüde KIRMIZI butona basılarak yapılabilecektir. Kırmızı butona basılması ile ekran üzerinde verilen açıklamalar ile zaman düzeltilerek gerçek durumuna getirilmesi sağlanabilecektir.

5.5. Örnekleme sisteminin bir kabin içerisine yerleştirilmesi.

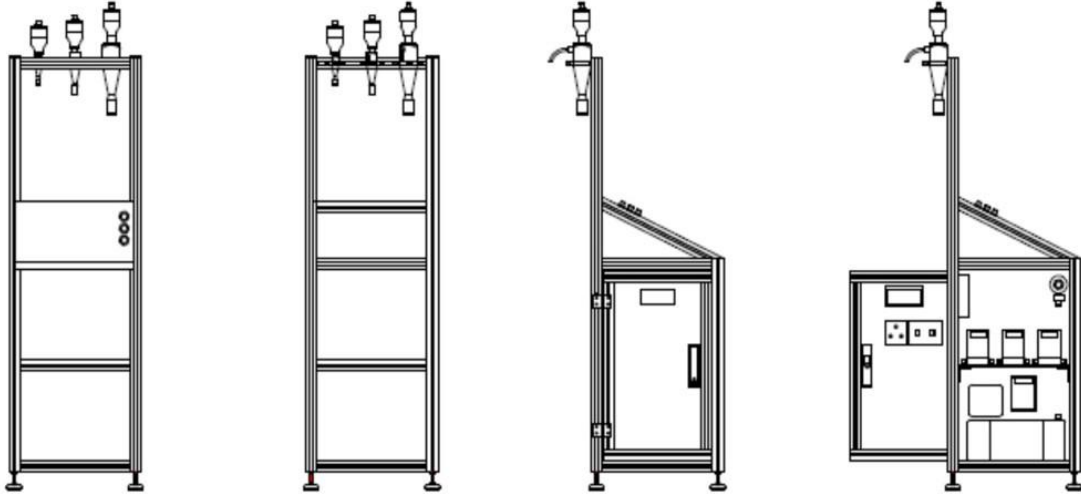
Tasarlanan örnekleyici ile ilgili olarak yapılan son çalışma sistemin bir kabine yerleştirilmesi olmuştur. Bu tür cihazların dış ortamda kendi başlarına çalışabilmeleri gerektiğinden meteorolojik koşullardan etkilenmemeleri gerekmektedir. Örnekleyicinin kontrol modülü gibi elektronik bir aksamı olduğu da göz önüne alınırsa dış ortam koşullarından korunmasının çok ciddi bir konu olduğu anlaşılabilir. Kabin 1.0 m x 1.0 m x 1.5 m boyutlarındadır ve sertleştirilmiş alüminyumdan yapılmıştır. Kabinin çatısı, eğimli bir şekilde yapılmıştır, bunun iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi yağmurun birikmesini önlemek, ikincisi ise yağmur damlalarının sıçrayarak siklonlara girmesinin önüne geçmektir.

Kentlerde yapılacak örnekleme örnekleme yüksekliği "burun seviyesi" olarak bilinen 2.0 m de yapılmaktadır. Bu nedenle örnekleyicinin ön tarafı profillerle yükseltilmiş ve her üç siklon da bu profile yerleştirilmiştir. Siklonların girişlerinin yerden yüksekliği 2.0 m'dir.

Kabinin teknik çizimi Şekil 44'de, dış görünüşünün çeşitli fotoğrafları ise Şekil 45'de gösterilmiştir.

Pompa, hava akış hızı ölçerler, kritik orifisler ve bunların ½" çapındaki borularla yapılan bağlantılardan oluşan örnekleme sisteminin siklonlar dışında kalan bölümü kabin içerisine yerleştirilmiştir. Kabinin yan duvarlarından birisi kapı

olarak yapılmıştır, bu duvar açılarak kabinin içerisine müdahale edilmesi mümkündür.



Şekil 44 Örnekleyicinin yerleştirildiği kabinin teknik özellikleri

Önceki bölümde anlatılan kontrol ünitesi kanaldaki hava akış hızı ve geçen toplam hava hacmi bilgileri dışarı konulan bir ekrandan takip edilebilmektedir. Ancak bu bilgileri bilgisayara aktarmak veya sistemi durdurmak veya reset etmek için gerekli butonlar, meteorolojiden, özellikle de yağmurdan, etkilenmelerinin önüne geçebilmek için kabinin içerisine yerleştirilmiştir. Örneklem kabininin içerisinin görünüşü Şekil 46'da görülmektedir.

5.6. Validasyon çalışmaları

Örnekleyici çalıştıktan sonra bunu literatürde yaygın bir şekilde kullanılan örnekleyicilerle paralel olarak çalıştırarak her bir örnekleyicide PM fraksiyonlarının kütleli konsantrasyonları hesaplanmış ve değişik örnekleyicilerle bulunan kütleli konsantrasyon değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu egzersiz için ODTÜ, Çevre Mühendisliği Bölümünün arkasında, daha önceki bölümlerde de anlatılan istasyonda Mart – Mayıs 2016 tarihleri arasında 24

saatlik sürelerle parçacık örnekleri toplanmıştır. Her örnekleyicide kullanılan filtreler örneklemeden önce ve sonra 0.1 µg hassaslığında bir mikro terazide tartılarak toplanan parçacık kütlesi bulunmuştur. Gravimetrik olarak ölçülen parçacık kütleleri daha sonra geçen hava hacmine bölünmüş ve kütleli konsantrasyonlar bulunmuştur. Bütün tartım işlemleri ODTÜ, Çevre Mühendisliği bölümünde bulunan bir temiz bölgede 2 kere HEPA filtreden geçirilmiş hava altında yapılmıştır.



Şekil 45 Kabinin dış görünümü

Tasarlanan örnekleyicinin karşılaştırıldığı örnekleyiciler "Stack filter unit" ve dichotomous örnekleyicilerdir. Bunların her ikisi de $PM_{2.5}$ ve $PM_{2.5-10}$ parçacıkları farklı filtrelerde toplamaktadır. Her iki örnekleyici de hem grubumuzda ve hem de literatürde yaygın olarak kullanılan örnekleyicilerdir.

Tasarlanan örnekleyici ile ölçülen PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarını başka cihazlarla ölçülen konsantrasyonlarla karşılaştırmamıza rağmen, ölçtüğümüz PM_1 konsantrasyonlarını karşılaştırma şansımız olmamıştır. Bunun nedeni Türkiye'de PM_1 örnekleme yapan bir cihaz olmamasıdır. En azından bizim tanıdığımız ve benzer çalışmalar yapan çevrelerde böyle bir PM_1 örnekleyicisi mevcut değildir.

Yeni tasarlanan örnekleyici ile üç ay boyunca ölçülen PM_1 , PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarının zaman içerisindeki değişimleri Şekil 47'de görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi her üç boyut fraksiyonun zaman içerisindeki değişimleri bir birleri ile ilişkilidir. Birlikte artmakta ve birlikte azalmaktadırlar. Bu

hem literatürde görülen hem de beklenen bir değişim şeklidir. Değişik boyu fraksiyonlarının birbirinden tamamen bağımsız olması beklenmez.



Şekil 46 Örnekleme sisteminin kabine yerleştirilmiş hali

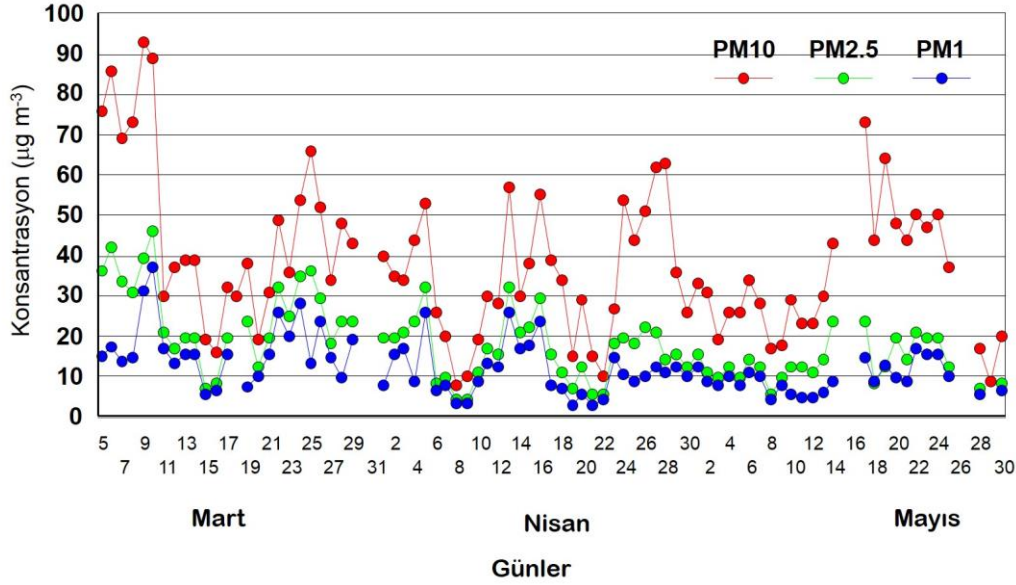
Ölçümlerden $PM_{2.5}$ kütleli konsantrasyonunun PM_{10} kütleli konsantrasyonunun %40 kadarını, PM_1 kütleli konsantrasyonu ise $PM_{2.5}$ kütleli konsantrasyonunun %60'ını oluşturduğu görülmektedir. Bunlar literatürde rapor edilen değerlerle oldukça uyumlu değerlerdir. $PM_{2.5}/PM_1$ ve $PM_{10}/PM_{2.5}$ oranları bir günden diğerine ve bir bölgeden diğerine büyük değişiklikler gösterdiğinden kapsamlı bir karşılaştırma çok anlamlı olmamaktadır.

Bu çalışmada oluşturulan örnekleyici ile Dichotomous örnekleyici ve SFU karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmiştir. Tabloda her üç örnekleyici ile ölçülen kütleli konsantrasyonlar ve değişik fraksiyonlar için hesaplanan kütleli konsantrasyonların bir birine oranları gösterilmiştir.

SFU ile ölçülen ortalama PM_{10} konsantrasyonu 49 ± 23 iken dichotomous örnekleyici ve bu çalışmada geliştirilen örnekleyici ile PM_{10} konsantrasyonları sırasıyla 46 ± 21 ve $46 \pm 19 \mu g m^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bunlar birbirine oldukça yakın değerlerdir. Aynı şekilde SFU, dichotomous örnekleyici ve bu çalışmada oluşturulan örnekleyici ile ölçülen $PM_{2.5}$ konsantrasyonları da sırasıyla 19 ± 7 , 22 ± 9 ve $18 \pm 9 \mu g m^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bunlar da birbirine yakın değerlerdir.

Örnekleyicilerde bulunan konsantrasyonlardan hesaplanan $PM_{10}/PM_{2.5}$ oranları da 2.4 ile 2.7 arasında değişmektedir.

Her üç örnekleyici ile ölçülen kütleli konsantrasyonların zaman serisi eğrileri Şekil 48 de görülmektedir. Tablo 1'de görülen benzerlik bu şekilde de gözlenmektedir. Gerek PM_{10} ve gerekse $PM_{2.5}$ fraksiyonlarında her üç



Şekil 47. Tasarlanan örnekleyici ile Mart – Mayıs aylarında ölçülen PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 konsantrasyonlarının zaman içerisindeki değişimleri

örnekleyiciden hesaplanan kütleli konsantrasyon değerleri birlikte alçalıp yükselmektedir. Korelasyon sabitleri PM_{10} fraksiyonu için daha yüksektir. Yeni örnekleyici ile SFU arasındaki korelasyon PM_{10} fraksiyonu için $r=0.83$, $P[r,n] < 0.01$, $PM_{2.5}$ fraksiyonu için ise r değeri 0.73, $P[r,n] < 0.05$ 'dir. Yeni örnekleyici ile dichotomous örnekleyici arasındaki korelasyon sabiti PM_{10} fraksiyonu için 0.81, $P[r,n] < 0.01$ 'dir. $PM_{2.5}$ fraksiyonu için ise r değeri 0.73, $P[r,n] < 0.05$ 'dir.

Bütün bu rakamlar proje çerçevesinde tasarlanan örnekleyicinin performansının parçacık örnekleme için yaygın olarak kullanılan diğer iki örnekleyici ile aynı olduğunu göstermektedir. Bu projenin başlangıcında ulaşılmaya çalışılan noktadır

5.7. Dördüncü kanalın kullanılmasına yönelik çalışmalar

Örnekleyici üç kanallı düşünülmüş ise de bütün kanalların bağlanarak tek bir çıkışla pompaya bağlandığı "manifold" 4 kanallı olarak yaptırılmıştır. Bunun nedeni ileride örnekleyiciyi 4 kanallı olarak kullanabilme şansını elde etmektir. Bu çalışmada dördüncü kanalın uçucu organik bileşiklerin paralel olarak örnekleme için kullanılmasına çalışılmıştır. Ancak UOB örnekleme için kullanılan hava akış hızının çok düşük olması ($5 - 10 \text{ mL dak}^{-1}$), buna karşılık diğer üç kanaldaki hava akış hızının buna nazaran çok yüksek olması (16.7 L dak^{-1})

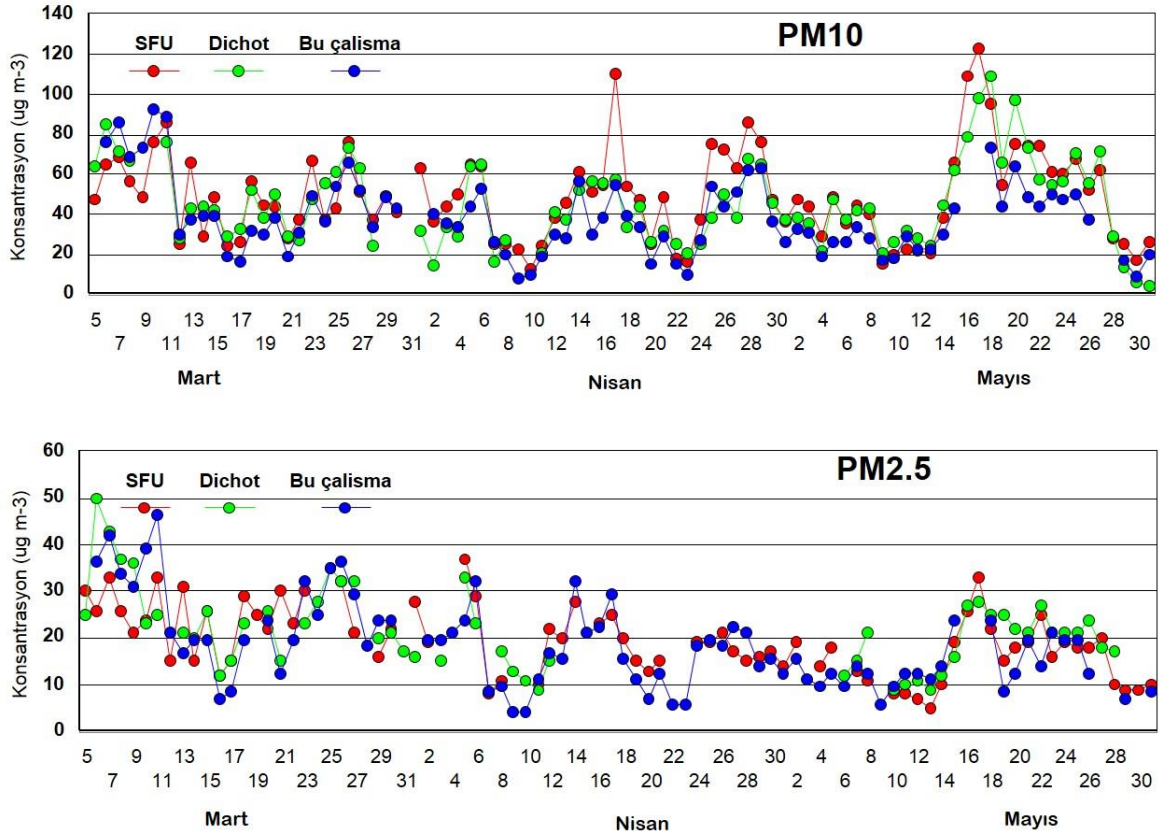
nedeniyle dördüncü kanalda kararlı bir hava akış hızı ağırlamak mümkün olmamıştır. Bunun sonucu olarak da dördüncü kanalın organik gazların paralel olarak örnekleme için kullanılması fikrinden vaz geçilmiştir. Organik gazların örnekleme sırasında dördüncü kanalda hava akış hızını kontrol etmek için MFC kullanılmaya çalışılmıştır. MFC'lerle havayı 60 – 80 L dak⁻¹ akış hızında çeken güçlü bir pompanın önünde hava akış hızını 5 - 10 mL dak⁻¹ gibi çok düşük bir değerde tutmak mümkün olmamaktadır. Çalışma prensibi itibarıyla kritik orifis böyle bir kontrole daha uygun gibi görünmektedir. Ancak bu çalışmada elimizde akış hızını bu kadar düşük bir değerde sabit tutacak bir orifis olmadığından, bunu deneme şansımız olmamıştır. Böyle bir orifisin çapı birkaç µm olacağından, böyle bir orifisin piyasada bulunduğundan da emin olamıyoruz. Bu çalışmada dördüncü kanalın organik gazların örnekleme amacıyla kullanılmasından vaz geçilmiştir.

Tablo 1. SFU, Dichotomous örnekleme cihazı ve bu çalışmada tasarlanan örnekleme cihazı ile ölçülen PM fraksiyonlarının kütleli konsantrasyonlarının istatistik değerleri

		AVG	STD	Med	N
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	
SFU	PM10	49	23	47	87
	PM2.5	19	7	19	74
	PM10/PM2.5	2,7	0,8	2,6	67
Dichot	PM10	46	21	43	81
	PM2.5	22	9	21	54
	PM10/PM2.5	2,7	0,7	2,6	47
Yeni örnekleme cihazı	PM10	46	19	35	81
	PM2.5	18	9	18	79
	PM1	12	7	11	79
	PM10/PM2.5	2,4	0,7	2,1	79

5.8. Geliştirilen örnekleyicinin piyasada bulunan diğer örnekleyicilerle karşılaştırılması

Yapılan performans testlerinde, bu çalışma çerçevesinde geliştirilen örnekleyicinin performansının en az piyasada bulunan ve yaygın olarak kullanılan örnekleyiciler kadar iyi olduğu görülmektedir. Böyle bir cihazın daha ileri götürülebilmesi için performansıyla birlikte fiyatının da piyasada satılan ticari nitelikli örnekleyicilerle karşılaştırılır boyutta olması gerekir.



Şekil 48 Tasarlanan örnekleyici, dichotomous örnekleyici ve stack filter unit ile ölçülen PM₁₀ kütleli konsantrasyonları

Bu bölümde cihazın maliyeti çıkartılacak ve oluşan fiyat satılmakta olan ticari örnekleyicilerin fiyatları ile karşılaştırılacaktır. Cihazların parçalarıyla ilgili olarak farklı zamanlarda teklif alındığından, çıkacak fiyatların son dolar ve avronun son birkaç yıldaki hızlı değer artışından etkilenmemesi için dolar ve avro olarak verilmiş bütün teklifler 2 Ocak 2017 günü Merkez Bankası döviz kurları baz alınarak TL 'sına dönüştürülmüştür. Bu bölümdeki bütün tartışmalar bu şekilde hesaplanan TL bazında yürütülmüştür.

Örnekleyicide kullanılan temel parçaların fiyatları Tablo 2.'de görülmektedir. Örnekleyicide kullanılan en pahalı parçalar siklonlardır. PM₁₀ siklonun tek başına fiyatı 7000 TL dolayındadır. PM₁ ve PM_{2.5} siklonların fiyatları daha ucuz olmakla birlikte birisi 4000 TL diğeri de 3000 TL dolayındadır. Örnekleyicide siklonların toplam fiatı 14,000 TL olmuştur. Filtre tutucular tamamen Teflon (PTTF) olduğundan, onların da fiyatları oldukça pahalıdır. Üç filtre tutucunun proje bütçesine yükü 8,200 TL dolayında olmuştur.

Tablo 2. Örnekleyicide kullanılan parçaların fiyatları

Ünite	Birim fiyatı	Birim TL fiyatı	Adet	Toplam Fiyat	Toplam TL Fiyat	
PM10 siklon	\$1,915	6932	1	\$1,915	6932	TL URG-2000*30ENB
PM1 siklon	\$1,063	3848	1	\$1,063	3848	TL URG-2000-EHB
PM2.5 siklon	\$885	3204	1	\$885	3204	TL URG-2000-30EH
Filtre tutucu	\$762	2758	3	\$2,286	8275	TL URG-2000-30FG-2
Manifold	\$792	2867	1	\$792	2867	TL URG-2000-30HD-1
Kritik orifis	\$184	666	3	\$552	1998	TL
MFC	€1,150	4405	3	€3,450.00	13214	TL SIERRA model C50L-AL-DD-2-PV2-V1-5POINTCAL-5Siklonlar0-C9(0)-50 T8D
Flowmetre	€450.00	1724	3	€1,350.00	5171	TL SIERRA model M50-AL-DD-2-PV2-V1-5POINTCAL-50-C9(0)-50 T8D
Pompa	\$2,400	9192	1	€2,400.00	9192	TL BJ Specialty products Model DF-1E
Quick connect	12	12	20	240	240	Eason Pnuomatics model PC 1/2 - N03
Veri toplama sistemi	10000	10000	1	10000	10000	TL Hacettepe Üniversiteinde yaptırıldı
Kutulama	5000	5000	1	5000	5000	TL Hizmet alımı
Geri besleme ünitesi	5000	5000	1	5000	5000	TL Hizmet alımı

Siklon ve filtre tutucularla birlikte pahalı kalemlerden birisi de kütleli debi kontrol üniteleri olmuştur. Bunların her birisinin fiyatı 4,400 TL olduğundan üç kanalda toplam tutarları 13,200 TL'dir. Bu gider kalemi filtre tutuculardan yüksek ve siklonların toplamıyla aynı mertebededir.

Akış izleyicileri (flowmetre) nispeten daha ucuzdur. Üç akış izleyicisinin toplam fiyatı 5,000 TL'dir. Kullandığımız pompa elimizde mevcut olan bir pompa olduğundan buna proje bütçesinden bir para ödenmemiştir. Ancak satış fiyatı 9,100 TL'dir.

Örnekleyicinin hizmet alımı şeklinde burada yaptırılan bölümlerinin (ki bunlar veri toplama sistemi, cihazın kabul edilebilir bir estetik düzeyde kutulanması ve veri besleme ünitesidir) toplam maliyeti 20,000 TL olmuştur.

Daha önce birçok defa bahsedildiği gibi, örnekleyici iki farklı şekilde kurulmuştur. İlk olarak örnekleyici, hava akış hızının MFC'ler kullanılarak kontrol edilecek şekilde oluşturulmuştur. Bu durumda örnekleyicide kullanılan parçalar, fiyatları ve oluşturulan sistemin maliyet fiyatı Tablo 3.'de gösterilmiştir. Tabloda görülen parça fiyatları ve kullanılan parçaların markaları, bir önceki tabloda verilen fiyat ve markalardan farklı değildir. Örnekleyicinin MFC'lerle oluşturulmuş versiyonunun maliyeti 67,772 TL olmuştur. Siklon ve filtre tutucular bu fiyatın %37'sini, MFC'ler ve Pompa %33'ünü, veri toplama ve geri besleme sistemleri %22'sini ve kutulama masrafları da maliyetin %7'sini oluşturmaktadır.

Tablo 3. Örnekleyicinin MFC kullanılması durumundaki maliyeti

Parça	Birim fiyat	Adet	Toplam		
			Fiyat	TL Fiyat	
PM10 siklon	\$1.915	1	\$1.915	6932	TL URG-2000*30ENB
PM1 siklon	\$1.063	1	\$1.063	3848	TL URG-2000-EHB
PM2.5 siklon	\$885	1	\$885	3204	TL URG-2000-30EH
Filtre tutucu	\$762	3	\$2.286	8275	TL URG-2000-30FG-2
Manifold	\$792	1	\$792	2867	TL URG-2000-30HD-1
MFC	€1.150	3	€3.450,00	13214	SIERRA model C50L-AL-DD-2-PV2-V1- TL 5POINTCAL-5Siklonlar0-C9(0)-50 T8D
Pompa	\$2.400	1	€2.400,00	9192	TL BJ Specialty products Model DF-1E
Quick connect	12	20	240	240	Eason Pnuomatics model PC 1/2 - N03
Veri toplama sistemi	10000	1	10000	10000	TL Hacettepe Üniversiteinde yaptirildi
Kutulama	5000	1	5000	5000	TL Hizmet alımı
Geri besleme ünitesi	5000	1	5000	5000	TL Hizmet alimi

Maliyet 67,772 TL

Örnekleyicinin MFC yerine kritik orifis kullanılması durumundaki maliyeti Tablo 4.'de görülmektedir. Bu durumda örnekleyicinin maliyeti 56,487 TL olmaktadır. Siklonlar ve filtre tutucular bu fiyatın %44'ünü oluşturmaktadır. Kritik orifisler ve pompa maliyetin %20'sini, Veri toplama sistemi %27'sini ve kutulama faaliyetler ise maliyetin %9 kadarını oluşturmaktadır. MFC'ler yerine kritik orifislerin" kullanılması hava akış kontrolü ve pompanın fiyata katkısının %20'lere kadar

düşmesine neden olmaktadır. Veri toplama sisteminin katkısının azalmasının nedeni geri besleme sisteminin kritik orifisli sistemde kullanılmamasıdır.

Tablo 4. Örnekleycinin kritik orifis kullanılması durumundaki fiyatı

Parça	Birim Fiyat	Adet	Toplam Fiyat	Toplam TL Fiyat		
PM10 siklon	\$1,915	1	\$1,915	6932	TL	URG-2000*30ENB
PM1 siklon	\$1,063	1	\$1,063	3848	TL	URG-2000-EHB
PM2.5 siklon	\$885	1	\$885	3204	TL	URG-2000-30EH
Filtre tutucu	\$762	3	\$2,286	8275	TL	URG-2000-30FG-2
Manifold	\$792	1	\$792	2867	TL	URG-2000-30HD-1
Kritik orifis	\$184	3	\$552	1998	TL	
Flowmetre	€450.00	3	€1,350.00	5171	TL	SIERRA model M50-AL-DD-2-PV2-V1-5POINTCAL-50-C9(0)-50 T8D
Pompa	\$2,400	1	€2,400.00	9192	TL	BJ Specialty products Model DF-1E
Quick connect	12 TL	20	240 TL			Eason Pnuomatics model PC 1/2 - N03
Veri toplama sistemi	10000 TL	1	10000 TL	10000	TL	Hacettepe üniversiteinde yaptırıldı
Kutulama	5000 TL	1	5000 TL	5000	TL	Hizmet alımı

Maliyet 56,487 TL

Piyasada satılan ve bu çalışmada geliştirilen örnekleyci ile benzer işlevi olan (aynı anda 3 farklı parçacık boyutunu tek bir pompa kullanarak örnekeleyebilen) ticari bir örnekleyci mevcut değildir. Bu nedenle bu bölümde üç farklı örnekleyci için fiyat karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırılan fiyatlar Tablo 5.'de görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen örnekleyci ile karşılaştırılan ilk grup örnekleyci 16 LPM gibi düşük hava akış hızlarında örnek toplayan cihazlardır (low-vol sampler). Bu tür cihazları temsilen Tisch firmasından TE-WILBUR modeli için ve Thermo Scientific firmasından PM10-2025-99 modeli için fiyat aldık. Tisch örnekleycisinin birim fiyatı (cihaz başına olan fiyat) 42298 TL. Thermo Scientific örnekleycisinin birim fiyatı ise 90,214 TL'dir. Bu fiyatların her ikisi de KDV dahil fiyatlardır. Biz geliştirdiğimiz örnekleycide kullandığımız bütün parçalara KDV ödediğimiz için örnekleycinin maliyeti, diğer örnekleycilerin KDV dahil fiyatlarıyla karşılaştırılmıştır. Low volume örnekleycilerin fiyatları kullanılan malzemeye ve firmanın adına bağlı olarak çok değişkenlik göstermektedir. Tisch firmasının örnekleycisinin fiyatı daha makul olup uzun bir arama

sonucunda bulunacak düşük hacimli örnekleyicilerin fiyat aralığını daha iyi temsil eden bir fiyattır.

Tablo 5. Piyasadaki bu çalışmada geliştirilen örnekleyici ile karşılaştırılabilecek ticari örnekleyici fiyatları

Örnekleyici	Birim fiyatı*	Birim TL fiyatı	Adet	Toplam Fiyatı	Toplam TL Fiyatı	Marka Model
Low volume örnekleyici	\$11,682	42289	3	\$35,046	126867	TL Tisch model WILBUR
Low volume örnekleyici	\$24.921	90214	3	\$74.763	270642	Thermo Scientific Model TL PM10-2025-99
High Volume örnekleyici	\$7.363	26654	3	\$22.089	79962	Thermo Scientific Model TL PM10-HVS-99
High Volume örnekleyici	\$8,750	31675	3	\$26,250	95025	Ekotest model HiVol TL 3000
Hi Volume örnekleyici	\$9,855	35675	3	\$29,565	107025	Thermo Scientific, TL model GUV 15HBL
Dichotomous örnekleyici	€29,455	112813	1	€29,455.00	112813	Thermoscientific, model TL Partisol plus

Buradaki fiyatları karşılaştırırken bir noktaya dikkat etmek gerekmektedir. Bu cihazların hiç birisi, bu çalışmada geliştirilen cihaz gibi üç farklı parçacık boyutunu eş zamanlı toplamamaktadır. Bir örnekleme süresince PM₁₀ örneği toplanmakta, bu bittikten sonra cihazın başlığı (ön-impaktör) değiştirilerek bu sefer PM_{2.5} örneği toplanmakta bu da bittikten sonra yine başlık değiştirilerek PM₁ örneği toplanabilmektedir. Bu cihazların tamamen bu çalışmada geliştirilen cihaz gibi çalışabilmesi için üç örnekleyicinin yan yana çalışması gerekmektedir. Dolayısı ile bizim geliştirdiğimiz cihazın fiyatı ile karşılaştırılması gereken bu örnekleyicilerin birim fiyatları değil üç adetinin fiyatıdır. O durumda da Tisch örnekleyicisinin fiyatı yaklaşık olarak 127,000 TL'ye, Thermo Scientific örnekleyicisinin fiyatı da yaklaşık 270,000 TL'ye ulaşmaktadır. Bu durumda her iki cihazın da fiyatı bizim cihazımızın çok üzerinde olmaktadır.

Geliştirilen örnekleyici ile karşılaştırılabilecek diğer bir örnekleyici türü HiVol örnekleyiciler olarak bilinen yüksek hacimli örnekleyicilerdir. Esasında HiVol örnekleyiciler tamamen bu çalışmada geliştirilen örnekleyicinin benzeri değildir. Bizim örnekleyicimiz, diğer bütün lowVol örnekleyiciler gibi 16.7 LPM (saatte 1

m³) hava akış hızında çalışırken HiVol örnekleyicilerin bir saatte çektiği hava 70 m³ dolayında olmaktadır. Bu farkın getirdiği avantajlar da, dezavantajlar da bulunmaktadır. Çok yüksek hava akış hızlarında çalıştıkları için kısa süreli örneklemelemlerle analitik yöntemlerle rahatça ölçülebilecek kadar parçacık toplanabilmesi HiVol örnekleyicilerin avantajıdır. Buna karşılık, bu kadar yüksek hava akış hızlarına ulaşılabilmesi için örneklemede kullanılan filtrelerin hava geçişine çok direnç göstermemesi gerektiğinden HiVol örnekleyicilerde ancak glass-fiber, selüloz-fiber, quartz-fiber gibi fiber yapıda filtreler kullanılmakta, blank özellikleri çok iyi olan membran filtrelerin kullanılması mümkün olmamaktadır. Ayrıca, saatte 70 m³ gibi yüksek hacimlerde hava çeken motorlar güçlü vakum pompaları olmamaktadır. Grubumuzda yapılan bir çok çalışmada HiVol örnekleyicinin motoru yanınca, yurtdışından pahalı motorlar getirtmek yerine "Rowenta" elektrik süpürgesinin motoru (hala var mı bilmiyorum) başarıyla kullanılmıştır. Genellikle HiVol örnekleyicilerin motorları elektrik süpürgesinin gücündedir. Eğer hiç direnç görmezse çok yüksek hacimlerde hava çekebilir ancak biraz direnç görürse hava akış hızı, lowVol örnekleyicilerde kullanılan vakum pompalarına nazaran hızla düşer. Bu nedenle HiVol örnekleyicileri kentler gibi kirli atmosferlerde kullanmaya çalışmak çok iyi fikir değildir. Ancak bu örnekleyiciler kırsal bölgeler gibi temiz atmosferlerde çok yararlıdır.

Tablodan da görülebileceği gibi elimizde bu farklı model HiVol örnekleyici için fiyat vardır. Bunlardan birisi Ekotest şirketinin ürettiği HiVol3000 modeli bir örnekleyicidir. Diğer ikisi Thermo Scientific şirketi tarafından üretilen iki farklı modeldir. Ekotest modelinin fiyatı 95,000 TL Thermo modellerinin birinin fiyatı 80,000 TL diğerininki ise 107,000 TL'dir. Görüldüğü gibi, HiVol örnekleyicilerin birim fiyatları bile bu çalışmada geliştirilen örnekleyicinin iki katına yakındır. HiVol örnekleyicilerde LowVol lar gibi sadece tek bir parçacık boyutunu (PM_{2.5} veya PM₁₀) örneklebilir (PM₁ HiVol örnekleyici hiç görmedim). Dolayısı ile proje çerçevesinde geliştirilen örnekleyici ile karşılaştırabilmek için HiVol örnekleyicilerin de üçünün yan yana çalıştığını düşünüp fiyatlarını üç ile çarpmak gerekiyor. Dolayısı ile HiVol örnekleyici fiyatlarının da geliştirilen örnekleyicinin yanında çok uçuk olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Piyasadaki mevcut sistemler arasında bu çalışmada geliştirilen örnekleyiciye en yakın olanı Dichotomous örnekleyici olarak tanımlanan örnekleyicidir. Dichotomous örnekleyici sanal impaktör (virtual impactor) prensibiyle çalışan ve parçacıkları PM_{2.5} ve PM_{2.5-10} aralıklarında toplayan bir örnekleme sistemidir. Biz Fisher Scientific firması tarafından üretilen Partisol modeli bir örnekleyicinin fiyatını aldık. Söz konusu cihazın bugün satış fiyatı 113,000 TL civarındadır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta partisol örnekleyicinin fiyatının diğer örnekleyiciler gibi üçle çarpılmasının gerekmemesidir. Partisol örnekleyicinin bizim örnekleyicimizle aynı işi yapabilmesi için yanına PM₁ örnekleme yapabilecek bir lowVol örnekleyici yeterli olacaktır. En ucuz low vol

örnekleyicinin 43,000 TL dolayında olduğu düşünülürse partisol örnekleyici kullanarak PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁ örnekleme yapabilecek bir sistemin fiyatı 156,000 TL (113,000 + 43,000 TL). Bu yaklaşım da geliştirdiğimiz örnekleyiciden üç kat pahalıdır.

Buraya kadar sunduğumuz tartışmadan projede geliştirilen örnekleyicinin PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁ parçacıkları eş zamanlı olarak farklı filtreler üzerinde toplayacak her hangi bir örnekleyiciden çok daha ucuz olduğu görülmektedir. Projenin başındaki hedefimiz de bu olduğundan, bu noktada hedefimize ulaştığımızı düşünüyoruz.

Projede hedef olarak koymasak da acaba bu örnekleyiciyi sadece tek bir parçacık boyutunu toplayacak şekilde kurgulasaydık fiyatı diğer lowVol örnekleyicilere göre nasıl olurdu sorusunu yanıtlamaya çalıştık. Geliştirilen örnekleyicinin sadece PM_{2.5} parçacıkları toplayacak şekilde kurgulanması halinde oluşacak maliyeti ve kullanılan parçaların maliyete katkıları Tablo 6'da gösterilmiştir. Bu durumda cihazın maliyeti 35,400 TL olmaktadır. Bu rakam fiyat için bir üst sınırdır. Cihaz tek parçacık boyutunu örnekeleyecek şekilde kurgulanırken veri toplama sisteminin fiyatı 10,000 TL kutulama fiyatı da 5,000 TL

Tablo 6. Örnekleyicinin sadece PM_{2.5} parçacıkları toplayacak şekilde tasarlanması halinde maliyeti

Parça	Fiyat	TL Fiyat	
PM2.5 siklon	\$885 1	3204 TL	URG-2000-30EH
Filtre tutucu	\$762 1	2758 TL	URG-2000-30FG-2
Manifold	\$792 1	2867 TL	URG-2000-30HD-1
Kritik orifis	\$184 1	666 TL	
Flowmetre	€450.00 1	1724 TL	SIERRA model M50-AL-DD-2-PV2-V1-5POINTCAL-50-C9(0)-50 T8D
Pompa	\$2,400 1	9192 TL	BJ Specialty products Model DF-1E
Quick connect	12 6		Eason Pnuomatics model PC 1/2 - N03
Veri toplama sistemi	10000 1	10000 TL	Hacettepe Üniversiteinde yaptirildi
Kutulama	5000 1	5000 TL	Hizmet alımı

Toplam Fiyat 35411

olarak bırakılmıştır. Bu rakamlar üçlü sistem için geçerli olan fiyatlar olup tekli sistemde daha düşük olacaklarından fiyat 35,400 TL'nin altında olacaktır. Maliyetinin 35,400 TL olması durumunda bile cihazın mevcut low-vol örnekleyicilerden ucuz olacağı görülmektedir. Tek kanallı olması halinde fiyatı hiVol örnekleyicilerle karşılaştırılabilir düzeydedir.

6 KAYNAKÇA

Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166–175. <http://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>

Appel, K. W., Pouliot, G. A., Simon, H., Sarwar, G., Pye, H. O. T., Napelenok, S. L., ... Roselle, S. J. (2013). Evaluation of dust and trace metal estimates from the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 5.0. *Geoscientific Model Development*, 6, 883–899. <http://doi.org/10.5194/gmd-6-883-2013>

Carruthers, D., Carslaw, D., Colvile, R., Richard Derwent OBE, P., Dorling, S., Bernard Fisher, P., ... Stevenson, K. (2005). Particulate Matter in the United Kingdom. London. Tarihinde adresinden erişildi <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/aeqeg/pm-summary.pdf>

Cheng, Z., Wang, S., Jiang, J., Fu, Q., Chen, C., Xu, B., ... Hao, J. (2013). Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Pollution*, 182, 101–110. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.043>

CEC (Commission for Environmental Cooperation) (2005). North American Power Plant Air Emissions. Tarihinde adresinden erişildi https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=20572912

Copley Scientific. (2016). Andersen Cascade Impactor (ACI). Tarihinde 02 Temmuz 2016, adresinden erişildi <http://www.copleyscientific.com/home/inhaler-testing/aerodynamic-particle-size/andersen-cascade-impactor-aci>

EIA (Energy Information Administration) (1999). Natural Gas 1998 Issues and Trends. Tarihinde adresinden erişildi http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/

EPA. (1995). AP 42, Fifth Edition: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. North Carolina. Tarihinde adresinden erişildi <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s04.pdf>

EPA. (2013). Basic Information Particulate Matter. Tarihinde 24 Mayıs 2016, adresinden erişildi <https://www3.epa.gov/pm/basic.html>

EPA. (2015a). 2011 National Emissions Inventory, version 2 Technical Support Document. North Carolina. Tarihinde adresinden erişildi

https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/nei2011v2_tsd_14aug2015.pdf

EPA. (2015b). Criteria Air Pollutants. Tarihinde 24 Mayıs 2016, adresinden erişildi <http://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>

EPA. (2016a). Air Quality and Climate Change Research. Tarihinde 04 Temmuz 2016, adresinden erişildi <https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research>

EPA. (2016b). Health. Tarihinde 25 Haziran 2016, adresinden erişildi <https://www3.epa.gov/pm/health.html>

EPA. (2016c). National Emissions by Source Sector. Tarihinde 15 Haziran 2016, adresinden erişildi https://www3.epa.gov/cgi-bin/broker?polchoice=PM&_debug=0&_service=data&_program=dataprog.national_1.sas

EPA. (2016d). Visibility. Tarihinde 30 Haziran 2016, adresinden erişildi <https://www.epa.gov/visibility/visibility-basic-information>

Avrupa Komisyonu (1997). Ambient air pollution by particulate matter. Tarihinde adresinden erişildi http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/pp_pm.pdf

Franzi, L. M., Bratt, J. M., Williams, K. M., & Last, J. A. (2011). Why is particulate matter produced by wildfires toxic to lung macrophages? *Toxicology and applied pharmacology*, 257(2), 182–8. <http://doi.org/10.1016/j.taap.2011.09.003>

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M. C., ... Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 8217–8299. <http://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>

Gertler, A. W. (2005). Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US? *Atmospheric Environment*, 39(13), 2349–2355. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.065>

Grythe, H., Ström, J., Krejci, R., Quinn, P., & Stohl, A. (2014). A review of sea-spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements. *Atmos. Chem. Phys*, 14, 1277–1297. <http://doi.org/10.5194/acp-14-1277-2014>

Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38(4), 513–543. <http://doi.org/10.1029/1999RG000078>

Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Wiley. Tarihinde adresinden erişildi http://aerosol.ees.ufl.edu/atmos_aerosol/section02.html

Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Linden, P. J. van der, Dai, X., ... Johnson, C. A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge. Tarihinde adresinden erişildi http://grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/TAR-05.pdf

Hung-Lung, C., & Yao-Sheng, H. (2009). Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study. *Atmospheric Environment*, 43(26), 4014–4022. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.015>

Jimoda, L. A. (2012). Effects of Particulate Matter on Human Health, The Ecosystem, Climate and Materials: A Review. *Working and Living Environmental Protection*, 9(1), 27–44. Tarihinde adresinden erişildi <http://facta.junis.ni.ac.rs/walep/walep201201/walep201201-04.pdf>

Kalivitis, N., Kerminen, V.-M., Kouvarakis, G., Stavroulas, I., Bougiatioti, A., Nenes, A., ... Mihalopoulos, N. (2015). Atmospheric new particle formation as a source of CCN in the eastern Mediterranean marine boundary layer. *Atmos. Chem. Phys*, 15, 9203–9215. <http://doi.org/10.5194/acp-15-9203-2015>

Kerminen, V.-M., Paramonov, M., Anttila, T., Riipinen, I., Fountoukis, C., Korhonen, H., ... Petäjä, T. (2012). Cloud condensation nuclei production associated with atmospheric nucleation: a synthesis based on existing literature and new results. *Atmos. Chem. Phys. Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 12037–12059. <http://doi.org/10.5194/acp-12-12037-2012>

Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

Langmann, B. (2013). Volcanic Ash versus Mineral Dust: Atmospheric Processing and Environmental and Climate Impacts. *ISRN Atmospheric Sciences*, 2013(ii), 1–17. <http://doi.org/10.1155/2013/245076>

Lewis, R., & Schwartz, E. (2004). *Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements and Models—A Critical Review*. American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 152, 413. <http://doi.org/10.1029/GM152>

Lundgren, D. a., Hlaing, D. N., Rich, T. a., & Marple, V. a. (1996). Data from a Trichotomous Sampler. *Aerosol Science and Technology*, 25(3), 353–357. <http://doi.org/10.1080/02786829608965401>

Ma, C.-J., & Kim, K.-H. (2014). Preliminary Study on the Cloud Condensation Nuclei (CCN) Activation of Soot Particles by a Laboratory-scale Model Experiments. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(4), 175–183. <http://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.4.175>

Maenhaut, W., Francois, F., & Cafmeyer, J. (1994). THE "GENT" STACKED FILTER UNIT (SFU) SAMPLER FOR THE COLLECTION OF ATMOSPHERIC AEROSOLS IN TWO SIZE FRACTIONS: DESCRIPTION AND INSTRUCTIONS FOR INSTALLATION AND USE. Tarihinde adresinden erişildi http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/_public/25/054/25054927.pdf

Malm, W. C. (1999). *Introduction to Visibility*. Fort Collins, CO: Cooperative Institute for Research in the Atmosphere. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/introvis.pdf>

Marple, V., Lundgren, D., & Olson, B. (2014). A PM_{1.0/2.5/10} Trichotomous Virtual Impactor Based Sampler: Design and Applied to Arid Southwest Aerosols—Part II: Application to Arid Southwest Aerosols. *KONA Powder and Particle Journal*, 31(31), 2–9. <http://doi.org/10.14356/kona.2014001>

Mccammon, C. S., Denver, N. /, Office, F., & Woebkenberg, M. L. (1998). General Considerations for Sampling Airborne Contaminants. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/chapter-d.pdf>

Merikanto, J., Spracklen, D. V, Mann, G. W., Pickering, S. J., & Carslaw, K. S. (2009). Impact of nucleation on global CCN. *Atmos. Chem. Phys. Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8601–8616. Tarihinde adresinden erişildi www.atmos-chem-phys.net/9/8601/2009/

Monahan, E. C., Spiel, D. E., & Davidson, K. L. (1986). A Model of Marine Aerosol Generation Via Whitecaps and Wave Disruption. İçinde E. C. Monahan & G. Mac Niocaill (Ed.), *Oceanic Whitecaps: And Their Role in Air-Sea Exchange Processes* (ss. 167–174). Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-94-009-4668-2_16

NRC (National Research Council) (2010). *Global Sources of Local Pollution*. Washington, DC: National Academies Press. <http://doi.org/10.17226/12743>

Nemery, B., Hoet, P. H., & Nemmar, A. (2001). The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet*. [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)04135-0](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)04135-0)

NSW EPA. (2013). Sources of particulate pollution. Tarihinde 12 Haziran 2016, adresinden erişildi <http://www.epa.nsw.gov.au/aqms/pmsourcesreg.htm>

O'Dowd, C. D., Facchini, M. C., Cavalli, F., Ceburnis, D., Mircea, M., Decesari, S., ... Putaud, J.-P. (2004). Biogenically driven organic contribution to marine aerosol. *Nature*, 431(7009), 676–80. <http://doi.org/10.1038/nature02959>

Omidvarborna, H., Kumar, A., & Kim, D. S. (2014). Characterization of particulate matter emitted from transit buses fueled with B20 in idle modes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(4), 2335–2342. <http://doi.org/10.1016/j.jece.2014.09.020>

Park, J.-M., Rock, J. C., Wang, L., Seo, Y.-C., Bhatnagar, A., & Kim, S. (2009). Performance evaluation of six different aerosol samplers in a particulate matter generation chamber. *Atmospheric Environment*, 43(2), 280–289. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.028>

Passant, N. R., Peirce, M., Rudd, H. J., Scott, D. W., Marlowe, I., & Watterson, J. D. (2002). UK Particulate and Heavy Metal Emissions from Industrial Processes. Tarihinde 26 Haziran 2016, adresinden erişildi https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT6270Issue2finaldraft_v2.pdf

Perraud, V., Bruns, E. A., Ezell, M. J., Johnson, S. N., Yu, Y., Alexander, M. L., ... Finlayson-Pitts, B. J. (2012). Nonequilibrium atmospheric secondary organic aerosol formation and growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(8), 2836–2841. <http://doi.org/10.1073/pnas.1119909109>

QG (Queensland Government) (2013). High and Low Volume Air Samplers. Tarihinde 09 Mayıs 2016, adresinden erişildi <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air-pollution/samplers/>

Radke, L. F., Hegg, D. A., Hobbs, P. V., Nance, J. D., Lyons, J. H., Laursen, K. K., ... Ward, D. E. (1991). Particulate and Trace Gas Emissions from Large Biomass Fires in North America. İçinde *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications* (ss. 219–220). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. Tarihinde adresinden erişildi [http://www.fs.fed.us/psw/publications/riggan/psw_1991_riggan001\(radke\).pdf](http://www.fs.fed.us/psw/publications/riggan/psw_1991_riggan001(radke).pdf)

Robert, M. A., VanBergen, S., Kleeman, M. J., & Jakober, C. A. (2007). Size and composition distributions of particulate matter emissions: part 1--light-duty gasoline vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 57(12), 1414–28. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18200926>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

ThermoScientific. (2015a). High - Volume Air Samplers. Tarihinde 03 Temmuz 2016, adresinden erişildi <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/HVAIR100?ICID>

ThermoScientific. (2015b). Marple Personal Cascade Impactors. Tarihinde 03 Temmuz 2016, adresinden erişildi <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/SE292?ICID=search-product>

ThermoScientific. (2015c). Partisol 2025i Dichotomous Sequential Air Sampler. Tarihinde 03 Temmuz 2016, adresinden erişildi <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/2025ID?ICID>

ThermoScientific. (2015d). Thermo Scientific Andersen Non-Viable Cascade Impactors. Tarihinde 03 Temmuz 2016, adresinden erişildi <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/D00103~.pdf>

Timms, C. (2012). Great Smog 60 years on: "New laws needed to clean London"s air". BBC News. London. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.bbc.com/news/uk-england-london-20269309>

TSI. (2008). RespiCon Particle Sampler 8522. Tarihinde 03 Temmuz 2016, adresinden erişildi http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Brochures/R_espicon_Brochure.pdf

UCSUSA. (2015). Aerosol particles and climate. Tarihinde 04 Temmuz 2016, adresinden erişildi http://www.ucsusa.org/global_warming/science_and_impacts/science/aerosols-and-global-warming-faq.html#bf-toc-1

Urbanski, S. P., Hao, W. M., & Baker, S. (2009). Chemical Composition of Wildland Fire Emissions. *Developments in Environmental Science*, 8. [http://doi.org/10.1016/S1474-8177\(08\)00004-1](http://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00004-1)

Voiland, A. (2010). Aerosols: Tiny Particles, Big Impact. Tarihinde 15 Haziran 2016, adresinden erişildi <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/>

Westervelt, D. M., Pierce, J. R., & Adams, P. J. (2014). Analysis of feedbacks between nucleation rate, survival probability and cloud condensation nuclei formation. *Atmos. Chem. Phys*, 14, 5577–5597. <http://doi.org/10.5194/acp-14-5577-2014>

Whitby, K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment* (1967), 12(1-3), 135–159. [http://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](http://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8)

WHO (World Health Organisation) (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Tarihinde adresinden erişildi http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf

WHO (World Health Organisation) (2014). Ambient (outdoor) air quality and health. WHO. World Health Organization. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>

Zhang, C., Yao, Q., Sun, J. (2005). Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China. *Fuel Processing Technology*, 86(7), 757–768. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.08.006>

Zhao, H., Che, H., Zhang, X., Ma, Y., Wang, Y., Wang, H., & Wang, Y. (2013). Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China. *Atmospheric Pollution Research*, 4(4), 427–434. <http://doi.org/10.5094/APR.2013.049>

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. SÜLEYMAN GÜRDAL TUNCEL
Proje No:	114Y160
Proje Başlığı:	Atmosferden PM10, PM2.5 Ve PM1 Parçacıkları Eş Zamanlı Olarak Toplayabilecek, Ekonomik Bir Örnekleme Sisteminin Geliştirilmesi
Proje Türü:	1005 - Yeni Fikirler ve Ürünler
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/11/2014 - 15/05/2016
Onaylanan Bütçe:	220700.0
Harcanan Bütçe:	183901.84
Öz:	Bu çalışmada Türkiye’de yüksek fiyatlara temin edilebilen örnekleycilere alternatif olabilecek nispeten ucuz ve kapasitesi yüksek bir parçacık örnekleycisi tasarlandı ve çalışır hale getirildi. Ticari olarak piyasada satılan örnekleycilerle yapılan karşılaştırma çalışmalarında iyi sonuçlar alındı
Anahtar Kelimeler:	PM10, PM1, atmosfer, parçacık
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır