İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROSPREY ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut Can KARAKAYA

Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

MAYIS 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROSPREY ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut Can KARAKAYA
(511091138)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Onur TUNÇER

MAYIS 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511091138 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mahmut Can KARAKAYA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ELEKTROSPREY ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU"** başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. Onur TUNÇER** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Duygu ERDEM** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KIZIL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **4 Haziran 2012**

Aileme ve Dostlarıma,

ÖNSÖZ

Saygıdeğer danışman hocam Onur Tunçer'e, yüksek lisans öğrenimim boyunca bana verdiği destek ve yönlendirmelerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca saygıdeğer hocalarım Hüseyin Kızıl, Levent Trabzon ve Özcan Kalenderli'ye, destek ve öğretilerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Projedeki çalışma arkadaşım M. Ragıp Abdullahoğlu'na, tüm tavsiyelerinden, yardımlarından ve tabi ki arkadaşlığından ötürü şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm İTÜ Trisonik Laboratuvarı çalışanlarına, ayrıca desteklerini benden esirgemeyen dostlarım Mustafa Yılmaz'a, Onur Son'a, ve burada isimlerini yazamadığım tüm arkadaşlarıma, ve son olarak sevgilerini benden hiç esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayıp 109M449 proje kodu altında her türlü finansal desteklerini sunan, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürleri borç bilirim.

MAYIS 2012

Mahmut Can KARAKAYA
Uzay Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. ELEKTROSPREY **3**
2.1 Elektrosprey Sistemi'nin Çalışma Prensibi 3
2.2 Koloit İticiler 4
2.3 Çoklu Elektrosprey Sistemleri 4
2.4 Literatür Özeti 7
3. ELEKTROSPREY MODLARI **13**
3.1 Sıvı Parçacıkları Grubu 13
3.1.1 Damlama modu 13
3.1.2 Mikro damlama modu 13
3.1.3 Uzamış mod 14
3.2 Kapiler Jet Grubu 14
3.2.1 Vurgulu konik jet modu 14
3.2.2 Konik jet modu 15
3.2.3 Yalpalanmış jet modu 15
3.2.4 Salınımlı jet modu 15
3.2.5 Çoklu jet modu 15
3.2.6 Dallanmış jet modu 16
4. MATEMATİK MODELİ **17**
5. DENEY DÜZENEĞİ **19**
6. SONUÇLAR **23**
6.1 Ekstraktör Elektrodu Kullanılmadan Yapılan Deneyler 25
6.2 Ekstraktör Elektrodu Kullanılarak Yapılan Deneyler 31
7. TARTIŞMA **37**
KAYNAKLAR **41**
EKLER **45**

ÖZGEÇMİŞ 51

KISALTMALAR

CCD	**:** Charged Couple Device
CNC	**:** Computer Numerical Control
EMI-BF$_4$	**:** 1-ethyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate
JP-8	**:** Jet Propellant 8
RİDA	**:** Reaktif İyonlar ile Derin Aşındırma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Elektrosprey Modları [13] 9
Çizelge 5.1 : Sıvıların fiziksel özellikleri 22

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Basit bir elektrosprey sistemi. 3
Şekil 2.2 : Renato Krpoun'un 2009 yılında elde ettiği elektrosprey gelişimi görüntüleri [1]. 4
Şekil 2.3 : Basit bir koloit itici sistemi. 5
Şekil 2.4 : Düzlemsel Dizilimli Çoklu Elektrosprey Sistemi. 5
Şekil 2.5 : (a) Çoklu elektrosprey sistemi [3], (b) Nozül Elektrodu [4]. 6
Şekil 2.6 : Montajlanmış elektrosprey sistemi [5]. 7
Şekil 2.7 : John Zeleny tarafından çekilen elektrosprey fotoğrafı ve deney düzeneği. (a) Konik jet (b) Zeleny 'nin Deney Düzeneği [7]. 8
Şekil 4.1 : Bağıl yalıtkanlık sabiti bilinen çözücüler için *f(ε)* fonksiyonu değerleri [11]. 18
Şekil 5.1 : Deney Düzeneği. 19
Şekil 5.2 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ekstraktörsüz). 20
Şekil 5.3 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ekstraktörlü). 21
Şekil 5.4 : 1'er mΩ'luk 10 adet direnç ile oluşturulmuş reosta sistemi. 21
Şekil 5.5 : İnsülin iğnesi ve kılcal tüp. 22
Şekil 6.1 : İnsülin iğnesi ucu. 24
Şekil 6.2 : Taylor konisi. 24
Şekil 6.3 : Multijet modu. 25
Şekil 6.4 : Mikrodamlama modu. 25
Şekil 6.5 : Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp. 26
Şekil 6.6 : Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp. 27
Şekil 6.7 : Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp. 28
Şekil 6.8 : Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi. 28
Şekil 6.9 : Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı.Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi:11 mm. 29
Şekil 6.10 : Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi: 10 mm. 29

Şekil 6.11 : Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi: 5 mm. 30
Şekil 6.12 : Farklı voltaj değerleri ve üç farklı emitör ucu – toprak elektrodu mesafeleri için elektrosprey akımlarının karşılaştırılması. 30
Şekil 6.13 : Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi. 31
Şekil 6.14 : 3 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları. 33
Şekil 6.15 : 3 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları. 33
Şekil 6.16 : 3,8 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları. 34
Şekil 6.17 : 3,8 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları. 34
Şekil 6.18 : 5,2 mm ekstraktör çapı ve 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları. 35
Şekil 6.19 : 5/10 direnç oranı ve 3,8 mm ekstraktör çapı kullanılmış, çeşitli voltalarla oluşturulmuş elektrosprey fotoğrafları. Ekstraktör elektrodu - emitör arası mesafe: 2 mm. 36

ELEKTROSPREY ENJEKSİYON SİSTEMİ TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Kılcal bir borunun ucunda yer alan sıvı ile, karşısına yerleştirilmiş elektroda yeteri kadar voltaj farkı uygulandığında sıvı yüzeyinde bir kabarma meydana gelir. Sıvının yüzey gerilimi, elektriksel kuvvetler etkisi ile gerçekleşen bu kuvveti etkisiz hale getirmeye çalışır. Sıvıya uygulanan elektrik alanı değeri arttıkça, bu konik yapı bir koni halini alır. Sisteme yeteri kadar voltaj farkı uygulandığında ise, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi kuvvetlerini yener ve bu konik yapının tepe noktasından sıvı, damlacıklar halinde ayrılmaya başlar. Elektrosprey enjeksiyonu bu şekilde gerçekleşir. Bu sistemde sıvının hareketi yalnızca elektriksel kuvvetler ile gerçekleşir. Elektrosprey enjeksiyonu yöntemi, düşük debilerde düzgün akış ve parçacık boyutu dağılımı sağlayan en uygun tekniklerden biridir.

Bazı elektrosprey sistemlerinde, kılcal borunun karşısına yerleştirilmiş elektrodda delik yer alır. Bu deliğin nedeni, sıvının akış formunu düzenlemek ve düzgün bir manyetik alan oluşmasını sağlamaktır. Bu deliğe ekstraktör elektrodu adı verilir. Elektrosprey sistemlerinde, ekstraktör elektrodu bazen bir adet olurken, bazen birden fazla olabilir. Eğer ekstraktörden sonra tanecikleri toplayan toprak elektrodu(toplayıcı elektrod) yerleştirilmemişse, bu sisteme koloit itici adı verilir. Toprak elektrodunun yer aldığı ekstraktörlü sistemlerde, ekstraktör elektroduna sıvı ile toprak elektrodu arası bir gerilim uygulanır.

Bu çalışmada ekstraktör elektrodunun elektrosprey enjeksiyonuna etkisi incelenmiştir. Sistem, kılcal tüp, karşısına yerleştirilmiş ekstraktör elektrodu ve sonrasında toprak elektrodu şeklindedir. Deneyler aynı zamanda ekstraktör elektrodu kullanılmadan da yapılmıştır.

İlk olarak, elektrosprey sisteminin yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Ardından ilk uygulamalarından, günümüze kadar ki gelişimi hakkında literatür araştırmasına yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan deklemler matematik modeli kısmında anlatılmıştır. Onun ardından, deneylerde de bir kısmı gözlemlenebilen, elektrosprey modları hakkında bilgiler verilmiştir.

Ardından deney düzeneği, her ayrıntısı ile anlatılmıştır. Deneylerde dielektrik sıvı olarak metanol ve etanol kullanılmıştır. Kılcal boru olarak da, borosilikat cam kapiler tüp ve insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. İki farklı deney düzeneği oluşturulmuştur. Birinci deney düzeneğinde sadece kılcal boru ve toprak elektrodu yer alırken, ikincisinde bunlara ek olarak ekstraktör elektrodu da yer almaktadır. Deneylerde tek bir güç kaynağı kullanılmıştır. On adet dirençten oluşan reosta sistemi sayesinde, güç kaynağından uygulanan gerilim, ekstraktör elektrodu için istenilen oranda indirgenmiştir. Bu sayede aynı anda hem sıvıya, hem de ekstraktör elektroduna

gerilim uygulanabilmiştir. Sıvı kılcal borunun ucuna şırınga pompa vasıtasıyla getirilmiş, bütün deneylerde, parametrik çalışmanın uygulanabilmesi için şırınga pompa yardımı ile çok düşük bir debi uygulanmıştır. Ampermetre ile elektrosprey akımları ölçülmüş, kamera ile fotoğraflanmış ve yorumlanmıştır.

Beş farklı elektrosprey modu başarıyla gözlemlenebilmiştir. Bunlar; damlama modu, mikro-damlama modu, vurgulu konik jet modu, konik jet modu ve multijet modudur. Farklı voltaj değerleri için elektrosprey fotoğrafları çekilmiş ve yorumlanmıştır. Elektrosprey başlangıç voltajı değerleri ölçülmüş, teorik olarak hesaplanan değer ile karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışma, voltaj değerlerine karşılık gelen elektrosprey akımlarınn ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerden yola çıkılarak elektrosprey debiside hesaplanmış ve bütün bu değerler grafiklere aktarılmıştır. Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneyler hem borosilikat cam kapiler için hem de insülin iğnesi ucu için tekrarlanmıştır. Cam kapilerin uç kısmını düzgün bir şekilde kesmek mümkün olmadığı için, ekstraktör elektrodu kullanılarak yapılan deneylerde sadece insülin iğnesi kullanılmıştır. İnsülin iğnesinin ucu, oldukça düzgün olarak kesilmiştir.

Ekstraktör elektrodunun elektrospreye etkisi incelenmiştir. Ekstraktöre reosta yardımıyla belirli oranlarda gerilim uygulanmıştır. Ekstraktör ile sıvı arası gerilim oranının artmasıyle elektrosprey sıvıya uygulanması gereken başlangıç voltajı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bazı ekstraktör delik çapı değerlerinde yüksek voltajlara çıkıldığında, sıvının ekstraktör ile temas ettiği gözlemlenmiştir. Temas etmesinden bir önceki voltaj değerine bitiş voltajı adı verilmiş ve bu değerinde, ekstraktör/sıvı gerilim oranının arması ile arttığı görülmüştür. Ayrıca bu oranın artmasıyla, elektrospreyin çalışma aralığı olan, başlangıç voltajı ile bitiş voltajı arası değeri aralığının arttığı görülmüştür. Ekstraktör elektrodu ile yapılan deneyler fotoğraflanmış ve yorumlanmıştır.

DESIGN AND CHARACTERIZATION OF ELECTROSPRAY INJECTION SYSTEM

SUMMARY

When a voltage difference is applied between a liquid in a capillary and an electrode, meniscus occurs on liquid's surface. Although surface tension tries to neutralize that electrical force, conical form can be observed due to higher voltages. If sufficient voltage is applied to the system, electrostatic forces overcome the surface tension forces and droplet separation can be seen at tip of the cone. This is called electrospray injection. This atomization technique is occurred by electrical forces, pressure difference does not need to be done. Electrospray injection is a unique technique suited for very low flow rates, which can assure a uniform spray and droplet size distribution.

In some systems, electrode, which is placed perpendicularly in front of the capillary, contains a hole on it. This hole is used for trimming the flow form and acquiring a regular magnetic field. This is called extractor (extraction) electrode. Sometimes two or more extractor electrodes can be seen in the system. If ground electrode is not placed in front of extractor electrode, droplets pass through the extractor electrode and thrust occurs. These systems are called colloid thrusters which are used in space applications.

In single electrospray systems, mass flow rate and thrust values are very low. Therefore, multiplexed electrospray systems are used in practical applications. These systems contain more than one emitter to get more electrospray atomization. Usually extractor electrode is used in multiplexed electrospray systems. This study aims to find the effect of the extractor electrode to the electrospray injection. System contains a capillary tube, extractor electrode which is placed perpendicularly to capillary and ground electrode. Besides, experiments were carried out without using extractor.

First of all, electrospray injection is described. Secondly literature survey is presented. Then, main modes of electrospray injection are described in detail. These modes are divided into two general groups. The first of these groups is identified by the characteristic that fluid fragments are ejected directly from the capillary exit, and includes the dripping, micro-dripping, and spindle and multi-spindle modes. The characteristic common to the second group is the formation of a capillary jet from the fluid meniscus, which then subsequently breaks up to form fluid droplets. This group comprises the cone-jet, precession, oscillating-jet, multi-jet and ramified-jet modes. Equations, which are used in this study, are represented in mathematical model part.

Later, experimental setup was described in detail. Ethanol and methanol are used in the experiments. Borosilicate capillary tube and insulin needle are used as emitters, which have 0.1 mm and 0.23 mm inner diameters respectively. Syringe pump was used for carrying liquid to tip of the emitter. High voltage power supply was used for getting desired voltage. Aluminum made ground electrode was placed perpendicularly to the

emitter, and that has 1 mm thickness. Electrospray injection was photographed by charged coupled device camera which was mounted to three-axis traverse. Microscope, which has 20 mm focal length, was mounted in front of the camera.

Electrospray current was measured with a digital multimeter. 10 kΩ control resistance was connected between the negative electrode and ground electrode. Multimeter was set to voltmeter mode, and connected parallel to control resistance to measure the voltage difference on the resistance. This operation was done to obtain the electrospray current. When system was in standby mode, only noise value can be read on the voltmeter's panel. If electrospray occurs, noise value changes, thus, this voltage which was applied from the power supply can be noted as onset voltage. Later on, experiments were carried without using control resistance, so multimeter was set to ampermeter mode and connected directly to the system.

Two different experimental setups were built. First setup does not contain extractor electrode. Capillary tube was placed in front of the ground electrode in the first system. Second set up contains extractor electrode between capillary and ground electrode. In all the experiments, extractor electrode's voltage was set to value which is between liquid's voltage and ground electrode. Rheostat was designed for splitting the voltage from power supply, by this means two different voltage values with one power supply could be applied simultaneously. Rheostat contains 10 resistances which has an equal value of 1 mΩ.

Extractor electrode was made of aluminum, which has a 1 mm thickness value. 3, 3.8 and 5.2 mm holes were drilled on it. In all the experiments, extractor electrode was placed with 7 mm distance from ground electrode. Rest of the system part was manufactured by poly material.

Experiments are done with both glass capillary and insulin needle. Results showed that, insulin needle is more suitable than glass capillary, because glass capillary's tip cannot be cut smoothly, thus electrospray flow could not occur regular. Undesired flows can be seen at this situation. However, when metal insulin is needle used, it can be rubbed smoothly. 0.5 ml/h syringe pump flow rate was applied in all experiments. The reason is that to hold water pressure in capillary steady. When experiments are done without using syringe pump, experiments cannot be succeed.

0.5 ml/h syringe pump flow rate was applied in all experiments. The reason is that to hold water pressure in capillary steady. When experiments are done without using syringe pump, experiments cannot be succeed. Taylor Cone can be seen in the beginning of experiments, but clear Taylor Cone can be observed without using syringe pump.

When too much voltage than onset voltage is applied to the system, multijet mode occurs at the tip of capillary. This mode can be seen in most of experiment's endings. And also, dripping and micro-dripping modes can be seen before the cone jet mode.

First experiments of parametric studies are done without using extractor electrode. Both glass capillary and insulin needle was used in these experiments. Besides, methanol and ethanol was used as dielectric liquids. 0 to 7 kV voltage values are applied with 250 V intervals to system. Emitor to ground electrode distance was set

to 15, 11, 10 and 5 mm distance and results are plotted. Electrospray current was measured and flow rate was calculated by current datas.

Electrospray region was divided into three parts according to its modes. First part is cone jet mode part, which flows like Taylor Cone. However, when second part was examined, electrospray flowed widely, because of a wide ground electrode. Trend line was plotted with second part's datas to get an idea about the value of onset voltage. Finally, third part was multi- jet mode part which flows with many small jets at tip of capillary.

Second experiments of parametric studies were done with extractor electrode, which was placed between capillary and ground electrode. Extractor electrode was charged with a value between liquid and ground electrode. Rheostat system was used for splitting the voltage from power supply. Experiments were carried out with three different extractor holes which are 3 mm, 3.8 mm and 5.2 mm. 2 mm and 3 mm capillary to extractor distances were tried for electrospray flow.0 to 7 kV voltage values are applied with 250 V intervals to system. Experiments were stopped in 7 kV voltage value because resistances in the rheostat didn't resist for higher voltages.

At higher voltage values, liquid started to contact with extractor electrode. When this happened, experiment was stopped and the voltage value before the first contact was taken as ending voltage. This contact was seen only in 3 and 3.8 mm extractor holes. It was observed that, onset and ending voltages were increased with the increase of extractor voltage. Furthermore, operating range was measured for all extractor/liquid voltage splits. Results are plotted and photographs taken from the experiments were commented.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisi sayesinde, günlük hayatta ve sanayi uygulamalarında kullanılan bir çok makine, mikro, hatta nano boyut mertebelerinde üretilmektedir. Bu tarz aletlerin ihtiyaç duydukları gereksinimler de, kendi boyutları doğrultusunda olmaktadır. Örneğin; bir nano uydunun yörünge kontrolü için gereken itki miktarı ya da ufacık bir enerji dönüşüm sisteminin çalışabilmesi için gereken yakıt tanecik boyutunun mikron düzeyinde olması, eski yöntemlerin bir kenara bırakılması gerekliliğini doğurmuştur. Elektrosprey enjeksiyonu yöntemi, bu gibi durumlar için oldukça uygun bir yöntemdir.

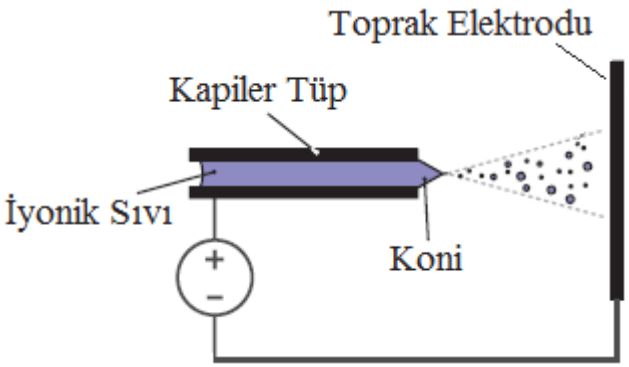
Elektrosprey, kılcal borunun uç kısmında yer alan sıvının, elektrostatik kuvvetler nedeniyle atomize edilmesidir. Sıvıya yüksek voltaj uygulanması sayesinde gerçekleştirilen bu enjeksiyon yöntemi, en düzgün sıvı parçacık dağılımı sağlayan ve en ufak tanecik boyutu elde edilebilen yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Elektrosprey sistemlerinin ilk temelleri her ne kadar 19. Yy'ın başlarında atılmış olsa da, gününmüz teknolojisinin ihtiyaçları doğrultusunda oldukça kıymetlenmiş, ve pratik uygulamada yerini daha yeni yeni almıştır. Özellikle mikro üretim yöntemlerinin gelişmesiyle iyice ün kazanmış bu sisteme, uzay itki sistemleri, minyatür enerji dönüşüm sistemleri, yazıcılarda mürekkep püskürtme sistemleri ve boyama sistemlerinde rastlamak mümkündür.

Bu çalışmada mikro yakıt enjektörü kullanılarak oluşturulan elektrosprey sisteminin tasarımı ve karakterizasyonu anlatılmaktadır. Ekstraktör elektrodunun elektrospreye olan etkisi incelenmiş, ayrıca farklı emitör ucu – toprak elektrodu mesafeleri için elektrosprey karakteristiği incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak elektrosprey sistemlerinin tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. Ardından matematik modeli oluşturulmuş, kurulan deney düzeneği ayrıntılarıyla anlatılmıştır. Son olarak da elde edilen deney sonuçları aktarılmış ve yorumlanmıştır.

2. ELEKTROSPREY

2.1 Elektrosprey Sistemi'nin Çalışma Prensibi

Kapiler borunun uç kısmındaki sıvı ile karşısına yerleştirilmiş elektrod arasında yeteri kadar voltaj farkı uygulandığında, sıvı yüzeyinde bir kabarma oluşur. Sıvının yüzey gerilimi, elektriksel kuvvetler ile oluşan bu kabarmayı etkisiz hale getirmeye çalışır. Düşük elektrik alan kuvvetlerinde, bu kabarma çok az olurken, yüksek elektrik alan kuvvetlerinde bu kabarma konik bir yapı halini alır. Bunun sonucunda, sisteme yeterli elektrik alan kuvveti uygulandığında, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilmesini yener ve konik yapının tepe noktasından tanecikler halinde ayrılmalar başlar. Taneciklerin bu hareketine elektrosprey enjeksiyonu adı verilir ve bu sistemin tamamına elektrosprey sistemi denir. Bu sistem yalnızca elektrostatik kuvvetler sayesinde meydana gelir, sisteme basınç farkı uygulanmaz. Elektrosprey enjeksiyonu, düşük debilerde düzgün akış ve parçacık boyutu dağılımını sağlayan en uygun tekniktir. Şekil 2.1 'de basit bir elektrosprey sistemi gösterilmektedir.

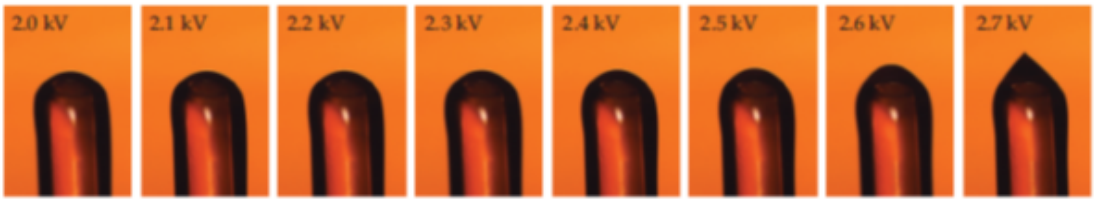


Şekil 2.1: Basit bir elektrosprey sistemi.

Çoğu elektrosprey sistemi kapiler tüp ve karşısına dik olarak yerleştirilmiş iletken plaka içerir. Kapiler tüpün dış çapı genellikle 1 mm'nin altında olur. Bu tüpün ucundan akan sıvının formunu düzeltmek ya da düzgün bir manyetik alan oluşturmak için kapiler ile toprak elektrodu arasına, ortası delik olan bir elektrod yerleştirilir. Buna ekstraktör elektrodu adı verilir ve bu elektrod kapiler ile toprak elektrodu arası bir

voltaj değeriyle yüklenir. Ekstraktörde yer alan delik ile kapiler tüp, eş merkezli olacak şekilde yerleştirilmelidir.

Şekil 2.2 'de Renato Krpoun'un 2009 yılına ait doktora tezi çalışmalarında elde ettiği elektrosprey gelişimi görüntüleri yer almaktadır. İyonik sıvı olarak EMI-BF_4 iyonik sıvısı kullanmıştır. Kullandığı kapiler tüpün iç çapı 150 μm dir. 2,7 kV voltaj değerinde sıvı, konik bir yapı almıştır [1].



Şekil 2.2: Renato Krpoun'un 2009 yılında elde ettiği elektrosprey gelişimi görüntüleri [1].

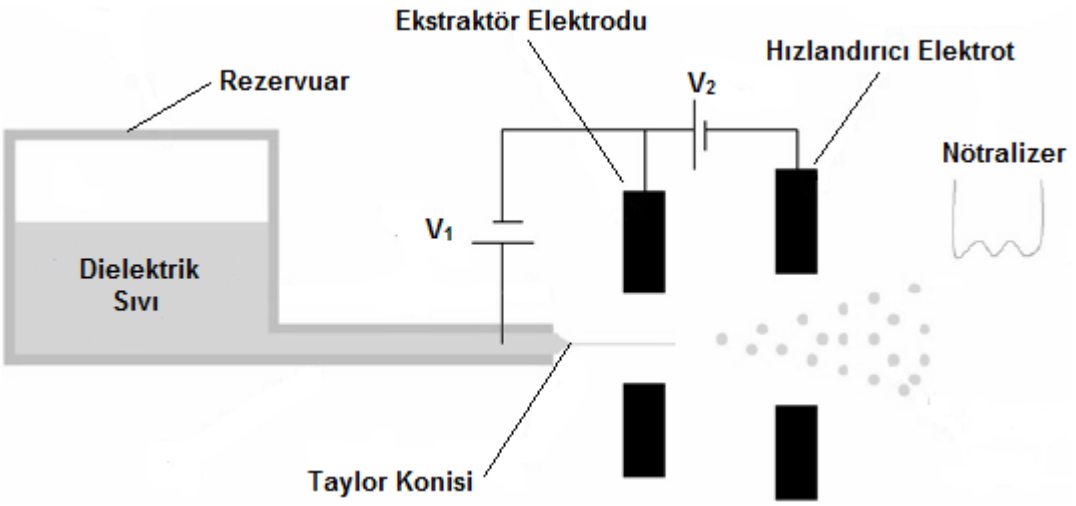
2.2 Koloit İticiler

Bazı elektrosprey sistemlerinde, kapiler tüpün karşısına yerleştirilmiş plakada dairesel bir delik yer almaktadır. Bu delik, bazı durumlarda yüzük şeklinde de olabilmektedir. Akışın daha düzenli gerçekleşmesini sağlayan bu elektroda, ekstraktör elektrodu adı verilir.

Eğer bu elektrodun karşısına toprak elektrodu yerine, yapısı ekstraktör elektroduna benzer olan hızlandırıcı elektrot yerleştirilirse, yüklü parçacıklar sistemden ayrılırken bir itki oluştururlar. Bu sistemlere koloit iticiler denir ve özellikle mikro, piko ve nano uyduların yörünge bozuntularını gidermek için kullanılan itki sistemlerinde kullanılır. Şekil 2.3 'de iki ekstraktör elektroduna sahip, basit bir koloit itici gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi parçacıkların çıkış noktasında, çıkan sıvıyı nötrlemek için, nötralizer kullanılmaktadır. Bunun amacı ise, yüklü parçacıkların, koloit iticinin temas edebileceği yerleri (uydunun gövdesi, çeşitli elektronik aksamlar. . .) etkilememesidir.

2.3 Çoklu Elektrosprey Sistemleri

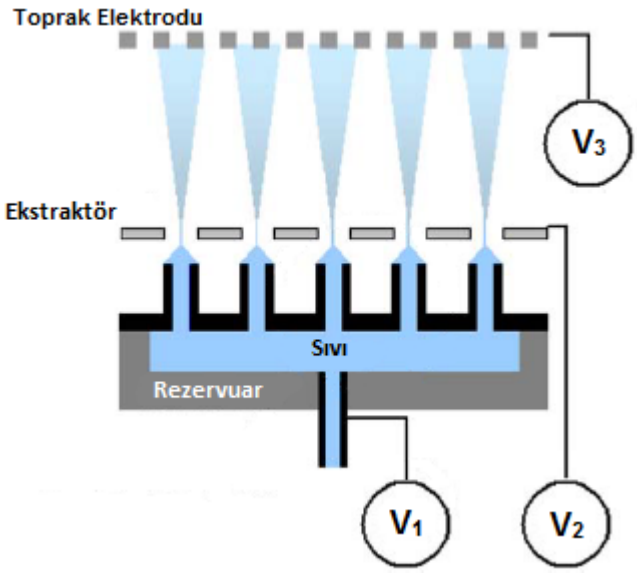
Tek bir kılcal tüp ile oluşturulan elektrospreye ait kütle debisi, itki gibi değerler oldukça düşük olmaktadır. Bu yüzden pratik alanda çoklu elektrosprey sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler sayesinde aynı anda birden fazla elektrosprey oluşturulabilmektedir. Üstelik her bir lüle, tekli elektrosprey sistemlerindeki gibi



Şekil 2.3: Basit bir koloit itici sistemi.

özellikler gösterebilmektedir. Bu sayede lüleden çıkan parçacıklar homojen bir dağılım sağlayabilir.

Şekil 2.4 ’de düzlemsel dizilimli çoklu elektrosprey sistemi görülmektedir. Bu sistem sıvının muhafaza edildiği rezervuar, enjekte edildiği nozül elektrodu, akışın düzgün olmasını sağlayan ekstraktör ve toprak (toplayıcı) elektrodundan oluşmaktadır.

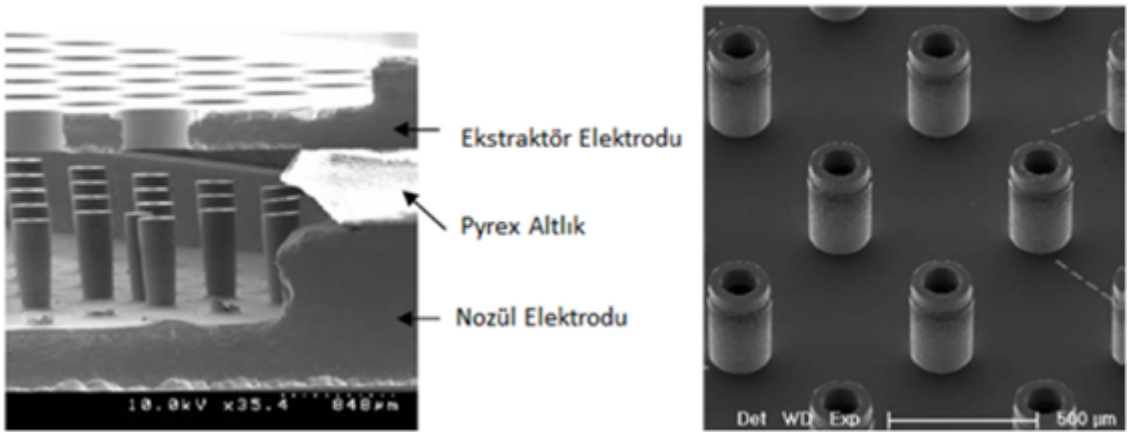


Şekil 2.4: Düzlemsel Dizilimli Çoklu Elektrosprey Sistemi.

Çoklu elektrosprey sistemlerinde genellikle, nözül elektrodu ile toprak elektrodu arasında ekstraktör elektrodu kullanılır. Bunun nedeni iki yönlü açıklanabilir: (1) Düzgün bir Taylor Konisi’nin oluşması için gerekli olan voltaj farkını sağlamak,

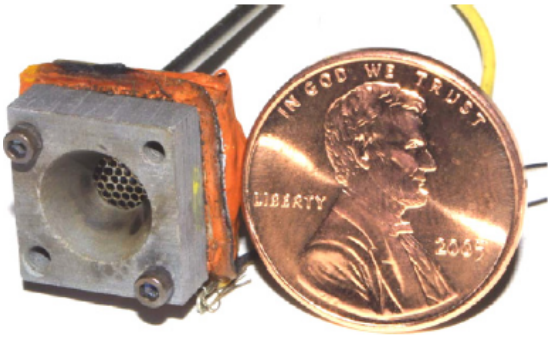
(2) Ekstraktör elektrodunun diğer tarafında oluşan yüklü sprey bulutu ile nozül elektrodunun uç kısmı arasında elektriksel kalkan görevi görmesidir. Ayrıca, eğer ekstraktör ile nozüller arasındaki mesafe, Taylor Konisi ile sıvı ayrılması arasındaki mesafeden kısa olursa, ekstraktör elektrodunun yarattığı elektrik alanı, nözüllerin birbirinden izole olmasını sağlayacaktır. Bunun nedeni ise ekstraktör elektrodunun oluşturduğu elektrik alanının, nozüller arası oluşan elektrik alanından daha geniş olmasıdır [2]. Bu sayede her bir nozül, tekli elektrospreyin özelliklerini taşıyacaktır. Toprak elektrodunun kullanılmasının nedeni ise ekstraktördern geçen sıvı parçacıklarının geri dönmesini engellemek içindir.

Çoklu elektrosprey sisteminin parçaları mikro üretim yöntemlerinden biri olan RİDA (Reaktif iyonlarla derin aşındırma) yöntemi ile üretilmektedir. Şekil 2.5 'de bu yöntem ile üretilmiş bir sistemin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 2.5: (a) Çoklu elektrosprey sistemi [3], (b) Nozül Elektrodu [4].

Düzlemsel dizilimli çoklu elektrosprey sistemleri mümkün olan en yüksek nozül yoğunluğuyla üretilmektedir. Çünkü nozül yoğunluğu arttıkça, nozüllerin çapı azalmakta ve bu sayede sıvı parçacıkların çapı küçülmektedir. Sıvı parçacıkların düşük çapta olması, elektrospreyin uygulama alanlarında oldukça önemlidir. Örneğin, enerji dönüşüm cihazlarında kullanılacak bir sistemde yanma gerçekleşeceğinden, ufak sıvı parçacıkları temas yüzeyini artıracağından yanmanın verimini artıracaktır. Şekil 2.6 'da Weiwei Deng'in ürettiği elektrosprey sistemi yer almaktadır. Fotoğraftan da görülebileceği üzere sistem yaklaşık olarak bozuk para büyüklüğündedir. Bu sistem şu ana kadar ki en yüksek güç yoğunluğuna sahip sistemdir.



Şekil 2.6: Montajlanmış elektrosprey sistemi [5].

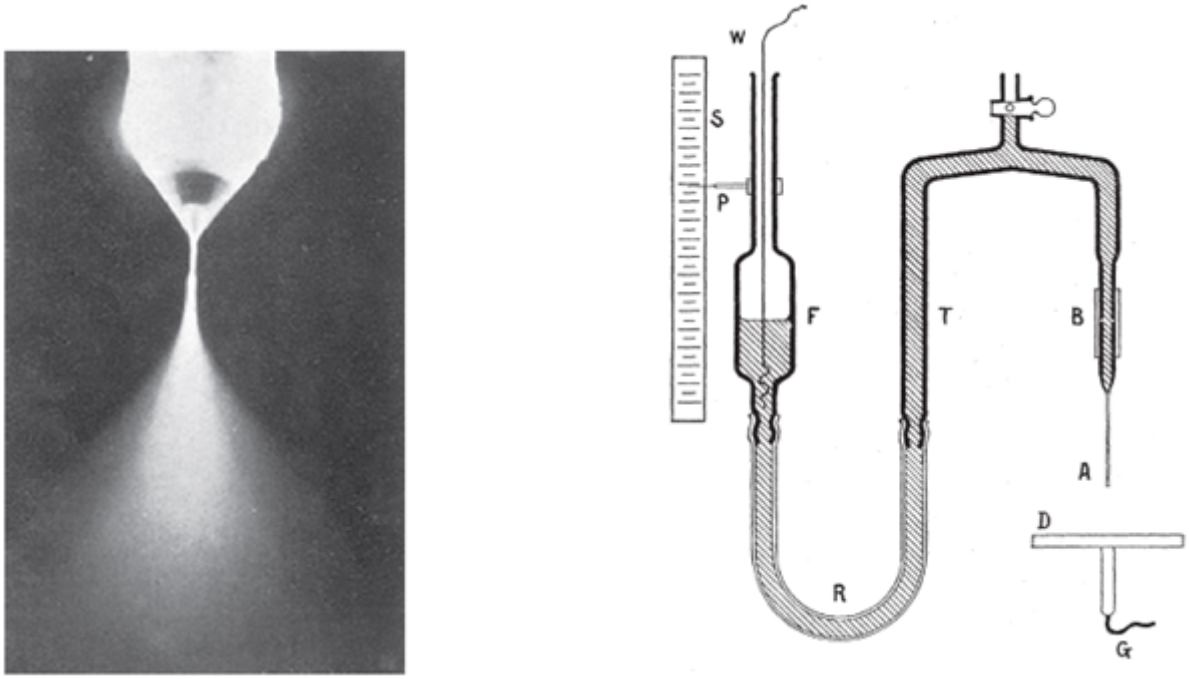
2.4 Literatür Özeti

Elektrosprey ile ilgili ilk gözlemler 1914 yılında John Zeleny tarafından gerçekleştirilmiştir. Zeleny, deneyini açık hava koşullarında gerçekleştirmiş, deneylerinde cam kapiler tüp ve onun karşısına yerleştirilmiş toprak elektrodu kullanmıştır. Sıvı olarak ise, seyreltilmiş hidro-klorik asit, ethanol ve gliserin kullanmıştır [6]. 1917 yılında yaptığı çalışmalarda ise ilk kez elektrospreyi fotoğraflamayı başarmıştır. Şekil 2.7 'de Zeleny'nin çektiği elektrosprey fotoğrafı (sağda) ve deney düzeneğinin şeması (solda) görülmektedir. Bu şemada "A" kapiler tüp, "D" toprak elektrodu, "W" ise sıvıyı elektriğe maruz bırakan kablodur. "F" ise sıvı basıncını ayarlamak üzere kullandığı rezervuarı temsil etmektedir [7].

1931 yılında Macky, yüksek elektrik alanına maruz kalmış su damlacıklarının davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmalarını gerçekleştirirken gök gürültülü sağanak yağışlardan ilham almıştır. Deneylerinde suyu, yüksek elektrik alanına doğru damlatmış, buna maruz kalan damlacıkların uzadığını ve her iki ucunda da konik bir yapının oluştuğunu gözlemlemiştir [8].

1964 yılında, elektrospreyin oluşmasıyla kapiler tüpün ucunda meydana gelen konik yapıyı incelemiştir. Bu koniği ilk inceleyen kişi olduğundan, koninin ismi Taylor Konisi olarak anılmaktadır. Ayrıca, bu koninin tepe açısını 98° olarak bulmuştur. Bu açının yalnızca başlangıç voltajında oluştuğunu ispatlamıştır [9]. Ayrıca, Zeleny'nin fenomenini tamamıyla ilk açıklayan 1968 yılında Dole olmuştur [10].

1992 yılında Fernandez de la Mora teorik ve deneysel olarak elektrosprey akımının uygulanan voltajdan ve elektrodun şeklinden bağımsız olduğunu ispatlamıştır. Bu



Şekil 2.7: John Zeleny tarafından çekilen elektrosprey fotoğrafı ve deney düzeneği. (a) Konik jet (b) Zeleny 'nin Deney Düzeneği [7].

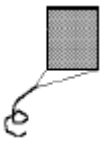
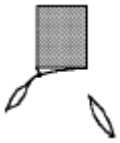
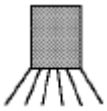
akımın sıvının özkütlesine, öziletkenliğine ve elektrosprey debisine bağlı olduğunu bulmuştur [11].

1997 yılında Ganan – Calvo elektrosprey akımını ve parçacık boyutunu ölçmüştür. Deneylerinde metanol, aseton, etanol ve ayçiçek yağı gibi on beş farklı sıvı kullanmıştır. Vizkozitesi yüksek olan sıvıların düşük olanlara göre farklı akım ve parçacık boyutu değeri verdiğini deneysel olarak gözlemlemiştir [12].

1998 yılında Jaworek farklı sıvılar için farklı voltaj değerlerinde oluşan elektrosprey modlarını incelemiş ve yorumlamıştır [13]. Bu modlar Çizelge 2.1'de yer almaktadır.

2001 yılında Keqi Teng, çoklu elektrosprey sistemi üretmiş ve kütle spektrometresinde kullanmıştır. Ürettiği sistem üzerinde bazı deneyler yapmış olup, tekli elektrosprey sistemi ile çoklu elektrosprey sistemindeki her bir lülenin, aynı karakteristik özelliklere sahip olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca elektrosprey debisini sabit tutup, lüle sayısının artırınca, elektrsprey akımının arttığını bulmuştur [14]. Benzer çalışmayı 2002 yılında Regele gerçekleştirmiştir. Dört adet kapiler tüpün birbirine etkisini incelemiştir. Bunun sonucunda kapiler tüpler arası mesafenin azalmasıyla, konik jet oluşumu için gereken başlangıç voltajının arttığını görmüştür [15].

Çizelge 2.1: Elektrosprey Modları [13]

SIVI PARÇACIKLARI		SIVI JET	
Damlama Modu		Konik Jet Modu	
Mikrodamlama Modu		Salınımlı Jet Modu	
Uzamış Mod		Yalpalanmış Jet Modu	
Çoklu Uzamış Modu		Çoklu Jet Modu	
Dallanmış Menisküs Modu		Dallanmış Jet Modu	

Ioan Marginean 2004 yılında yaptığı çalışmada, 260 μm iç çapına ait kapiler ile meydana gelen elektrospreyin 500 μs 'lik kısmının fotoğraflarını çekmiştir. Bu fotoğrafların analizi sonucunda koni ucu hızını, koni oluşumu süresince oluşan tepe açısı değişimlerini tespit etmiştir [16].

Bocagnera 2005 yılında, düzlem üzerinden çıkan lüleler yerine, düzleme delinmiş deiliklerden de elektrosprey akımı gerçekleşebileceğini ispatlamıştır. CNC kullanarak ürettiği 115 lüle/cm^2 yoğunluğuna sahip elektrosprey sistemi ile daha ucuz yöntemler ile de üretim yapılabileceğini göstermiştir [2]. Ayrıca bu sistemin üretimi diğer yöntemlere göre daha ucuzdur.

Weiwei Deng 2005 yılında 250 lüle/cm^2 yoğunluğuna sahip bir sistem üretmiştir. Bu sistemi biri düz, biri oval olmak üzere iki farklı toprak elektrodu ile çalıştırmış, parçacık boyutunu ve elektrosprey akımını ölçmüştür. Deneylerinde etanol kullanmıştır. Elektrosprey debisinin artması parçacık boyutunu ve elektrosprey akımını artırmıştır. Parçacık boyutunu aşağı yukarı 10 μm mertebesinde ölçmüştür [4].

Marie-Hélène Duby 2005 yılında yaptığı çalışmada, lülenin uç kısmına sivri kanallar açmış ve başlangıç voltajının çok üzerinde voltajlar uygulayıp, multijet modunun oluşmasını bu şekilde sağlamıştır. Bunu yapmasındaki gaye ise her kanaldan çıkan jetin kararlı bir hal almasını sağlamak ve her birinin elektrik alan kuvvetini artırmak olmuştur. Yaptığı bu yeni lüle sistemi ile, standart lüleler ile multijet modu oluşturması için gereken voltaj değerinden daha düşük voltaj değerleri elde etmiştir [17].

Matthew S. Alexander 2006 yılında elektrosprey sistemine uyguladığı voltaj değerini belirli frekanslarda uygulamış, buna bağlı olarak yeni modlar elektrosprey modları elde etmiştir. İçlerinde su da bulunan, farklı çözeltiler kullandığı deneylerinde düşük ve yüksek sinyal frekanslarını, sinyal olmayan konik-jet modu ile karşılaştırmıştır [18].

K. L. Smith 2006 yılında yaptığı deneylerde, voltajın konik-jet modunda elektrosprey debisine olan etkisini incelemiştir. Voltaj ile elektrosprey debisi arasında lineer bir bağlantı elde etmiştir [19].

Luis Fernando Velásquez-García 2006 yılında yaptığı çalışmalarda, uzay araçlarının itki sistemlerinde kullanılması amacıyla çoklu elektrosprey sistemi üretmiştir. 0,64 m^2 'lik bir alana 1024 emitör sığdırmayı başarmıştır. Bu emitörler, normal lüle yapısından daha farklı olup, yükselti şeklinde (kalem), diğer bir deyişle dağ şeklinde yapılara sahiptir. Bu sistem, normal lüleler gibi içerden sıvı püskürtmek yerine, kalemin ya da dağ yapısının çevresinden(dıştan ıslatmalı) sıvıyı püskürtmektedir. Böyle bir sistemin avantajı, normal lülelere göre üretiminin daha kolay olmasıdır [20].

S. Castro ve diğerlerinin 2007 yılında yaptığı çalışmada, iyonik sıvıların elektrosprey sistemindeki etkilerini incelemiştir. Dışardan ıslatmalı elektrosprey sistemi kullanmışlardır. Altı farklı iyonik sıvının kullanıldığı deneylerde, ölçülen elektrosprey akımı, kapiler tüple elde edilen elektrosprey akımından daha düşük çıkmıştır [21].

Weiwei Deng ve diğerleri 2007 yılında, minyatür seramik yanma odası tasarlamış ve yanıcı olarak JP-8 yakıtı kullanmışlardır. Bu sistemden 270 MW/m^3 hacimsel ısı değeri elde etmişlerdir. Bu değer konvensiyonel gaz türbinlerinden elde edilen enerji ile aynı mertebededir. Yanma odası yalnızca 0,22 cm^3 boyutundadır. 6 cm^3/s elektrosprey debisinde yaklaşık 7 μm çapıunda parçacıklar elde etmişlerdir [5, 22].

Bui Kang Tran Si 2007 yılında lülelerin birbiriyle olan elektriksel etkileşimi hakkında, analitik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneylerinde, çoklu elektrosprey sistemi üzerindeki tek bir lüleden sıvı püskürtmüş, bunun sonucunda, elektrosprey akımını başlatacak başlangıç voltajının daha fazla olması gerektiğini bulmuştur. Lüleler arası mesafenin çok azaltılmasıyla da başlangıç voltajı değerinin azaldığını görmüştür. Eğer bütün lülelerden sıvı püskürtülürse, konik-jet oluşumu için gereken voltaj değeri, lüle mesafesi azaldıkça artmıştır. Ayrıca, lüleler birbirine oldukça yaklaştığında gereken voltaj değerinde değişim olmamaya başlamıştır [23].

2007 yılında Ling Wang ve diğerleri, 250 μm uzunluğunda 10 μm çapında lülelere sahip elektrosprey sistemi üretip test etmişlerdir. Atmosferik koşullar altında yaptıkları deneylerde, düşük voltaj değerleriyle (2,5 – 2,7 kV) 100 nl/dak elektrosprey debisine ulaşmışlardır [24].

Gassend ve diğerlerinin, 2008 yılında uzay itki sistemleri için yaptığı çalışmada, 502 lüleye sahip elektrosprey sistemi üretip test etmişlerdir. Toplamda 5 gr ağırlığa sahip olan sistem 113 mm^2 elektrosprey alanına sahiptir. 13 μN itki elde ettikleri sistemi yaklaşık 5 dakika boyunca sorunsuz olarak çalıştırmışlardır. EMI-BF_4 iyonik sıvısı ile yaptıkları deneylerde, başlangıç voltajını 500 V olarak gözlemlemişlerdir [25]. Aynı yıl Krpoun ve diğerlerinin yaptığı benzer çalışmada, EMI-BF_4 iyonik sıvısı ile yaptığı deneylerde, başlangıç voltajını 700 V olarak ölçmüşlerdir. Lüle çapları 20 μm, ekstraktör elektrodu çapları 140 μm ve lüle ucu ile ekstraktör elektrodu arasındaki mesafe 40 μm'dir [26].

2009 yılında Weiwei Deng ve diğerleri 11.557 lüle/cm^2 yoğunluğunda elektrosprey sistemi üretmişlerdir. Bu değer literatürde bulunan en büyük lüle yoğunluğudur. Sistemi test etmişler ve oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Ekstraktör elektrodunu elektrik alanınının düzgün olmasını sağlamak için kullanmışlardır [27].

3. ELEKTROSPREY MODLARI

Elektrosprey, verilen voltaj değerine göre, sistemin geometrik özelliklerine ya da sıvının fiziksel özelliklerine göre farklı şekillerde oluşabilir. Ancak elektrosprey enjeksiyonunu modlara ayırmak için kullanılacak başlıca etmenler; kapiler tüpün ucunda oluşturduğu kabarık yapı, püskürme şekli gibi elektrospreyin geometrik davranışlarıdır. Bu geometrik davranışlarından yola çıkan Jaworek ve Krupa, çeşitli sprey modlarını iki ana grup altında toplamıştır. Bu gruplardan ilki, kapilerin ucunda jet oluşturulmadan, damlacıklar halinde akmasıyla oluşan sıvı parçacıkları grubudur. Bu grup, damlama modu, mikdamlama modu, uzamış mod, çoklu uzamış mod ve dallanmış menisküs modu gibi beş mod içerir. İkinci grup ise, kapilerin ucunda jet akışı oluşmasıyla meydana gelen gruptur, sıvı jet grubu olarak adlandırılır. Bu grupta ise, konik jet modu, titrek jet modu, yalpalanmış jet modu, çoklu jet modu, dallanmış jet modu yer alır [28].

3.1 Sıvı Parçacıkları Grubu

3.1.1 Damlama modu

Kapiler tüpün ucunda yer alan sıvıya, yüzey gerilimini yenecek kadar kuvvet (basınç farkı) uygulandığında sıvı damlacıklar halinde akmaya başlar. Damlacıklar halinde akan sıvıya elektrik alanı uygulandığında, sıvının akma frekansında artış görülür. Voltaj artırıldığında ise frekans daha da artarken, damlacık çapında azalma meydana gelir. Bu mod genelde atomizasyon olarak adlandırılmaz, çünkü sıvı damlacıkların çapı, kapiler tüpün uç çapından daha büyüktür. Hatta çoğu zaman, elektrosprey voltajında bir değişim sağlanamaz.

3.1.2 Mikro damlama modu

Bu modda, kapiler tüpün ucunda konik bir yapı gözlenir ve bu koninin tepe noktasından tanecikler şeklinde ayrılmalar meydana gelir. Damlama modundan farklı

olarak, mikrodamlama modunda tanecikler, sıvı akıntısı esnasında koninin tepe kısmı ile temas halinde olmazlar [28]. Sıvı, yüzeyinden itibaren ince bir iplik gibi uzar. Bu ipliğimsi yapının en uç kısmında sıvı en yoğun haline ulaşır ve tanecik şeklinde ayrılır. Bu süreç, her ayrılmadan sonra kendini tekrar eder. Bu oluşum, her ne kadar ileri ki kısımlarda anlatılacak olan konik-jet moduna benzerlik gösterse de, konik-jet modundaki gibi sabit bir jet modu gibi çalışmaz. Yalnızca belirli bir periyotta damlamalar halinde oluşur.

3.1.3 Uzamış mod

Mikro damlama modunda da olduğu gibi, sıvının yüzeyinde konik bir yapı oluşur. Bu konik yapının tepe noktasında ipliğimsi sıvı uzaması meydana gelir. Ancak bu sefer, bu uzama yüksek sıvı debisi, daha yüksek voltaj ile oluşur. Bu yapının uç kısmından ayrılan tanecikler kararlı bir yapıda olmazlar; hepsi önceden öngörülemeyen boyutlarda ve şekillerde oluşurlar. Uygulanan voltajın artması ile, sıvı yüzeyinde bir çok sayıda ipliğimsi yapılar oluşur. Bu mod sadece, öziletkenliği çok düşük çözeltiler ile oluşturulabilir.

3.2 Kapiler Jet Grubu

3.2.1 Vurgulu konik jet modu

Bu mod genellikle, damlama modundan, sabit konik jet moduna geçişte oluşur. Sıvı, damlama modu ile akarken, uygulanan voltajın artırılmasıyla konik jet moda geçer, ancak, iki mod geçişi arasında sıvı bazen sprey halinde akarken bazen de akmaz. Bu vurgular halinde gerçekleşen oluşumun frekansı, voltaj artırımı ile artar. Vurgulu jet modu enjekte edilen sıvı miktarına bağlı olarak, koninin ucundaki sıvının azalmasındaki dengesizlik nedeni ile meydana gelir [29]. Konik jet mod, elektrostatik kuvvetin, yüzey gerilimi kuvvetinden daha yüksek olduğu zamanlarda oluşur. Yani sıvı yüzeyinin eğrilik yarıçapı, uygulanan elektrik alan şiddetine ait kritik yarıçapa ulaşmasıyla konik jet mod meydana gelir. Vurgulu konik jet modunda ise eğrilik yarıçapı bu kritik değerin altında olur. Ancak sıvı enjekte edilmese bile, eğrilik yarıçapı kritik değere kadar ulaşabilir.

3.2.2 Konik jet modu

Bu mod, sprey akımı ve tanecik çapı ölçümü gibi, birçok parametrik ölçümün yapılabildiği modlardan biridir. Ayrıca sprey boyama, koloit iticiler, kütle spektrometresi, yazıcı kartuşlarıında bu mod kullanılarak elektrosprey operasyonu yapılır. Bu tezde yer alan ölçümlerin hemen hemen tamamı konik jet modunda gerçekleştirilmiştir. Konik jet moduna geçiş için gereken başlangıç voltajı, başlangıç debisi gibi değerlerin hesaplanmasına, matematik modeli bölümünde yer verilmiştir. Ayrıca, konik jet modu ile püskürtülen sıvının akımı ile elektrsprey debisi arasındaki bağıntıyı veren formül de bu bölümde yer almaktadır.

3.2.3 Yalpalanmış jet modu

Bu modda, koni biraz eğrilmiş ve kapilerin ekseni çevresinde dönmüş bir hal almıştır. Bu dönme sonucunda sıvı, kapiler eksen etrafında spiral bir hal almaktadır. Bunun sonucunda, elektrstatik ve merkezkaç kuvvetler nedeniyle sıvı geniş bir alana düzensiz bir şekilde dağılmaktadır.

3.2.4 Salınımlı jet modu

Sadece stroboskopik ışık altında gözlemlenebilen bu modda püskürtülen jet, kapiler eksen düzleminde salınım gerçekleştirir. Jet kararlı bir şekilde akmaz, uzunluğu boyunca düzensiz bir jet çapı sergiler. Son olarak jetin uç kısmından düzensiz bir şekilde etrafa dağılırlar.

3.2.5 Çoklu jet modu

Sıvıya, konik jet oluşumu için gereken elektrik alanı değerinden daha yüksek elektrik alanı değeri uygulanırsa, kapilerin uç kısmından aynı anda birden fazla jet akışı gerçekleşir. Çoklu jet modunda, oluşan jetlerin sayısı, uygulanan elektrik alanı şiddeti ile doğru orantılıdır. Aynı debi değeri için, çoklu jet modunda oluşan taneciklerin çapı, tekli konik jet modunda oluşan taneciklere göre daha küçüktür. Ayrıca çoklu jet modunun akım değeri tekli konik jete göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu akım farkının nedeni sprey alanının artıp, tanecik çapının azalması ile açıklanabilir.

3.2.6 Dallanmış jet modu

Atomizasyon ve konik-jet modu oluşumu için gereken maksimum debi oluştuğunda, kinetik kuvvetler, elektrostatik ve kapiler kuvvetleri yenerler. Böyle bir durumda jet, elektrik alanının etkisi olmadan oluşur. Elektrik alanı jetin ivmelenmesine yardım eder ve ana jetin etrafında küçük jetler, yelpaze görünümü verecek şekilde oluşurlar [28].

4. MATEMATİK MODELİ

Elektriksel kuvvetler vasıtasıyla ince bir borudan geçen sıvının davranışına ilk açıklama Taylor tarafından gelmiştir. Kapiler tüp içerisinde pozitif elektrik yüklenmiş bir sıvının, toprak elektroduna doğru hareketinde, tüpün ucunda sıvının oluşturduğu konik yapıyı incelemiştir. Bu çalışmalarının sonucunda, bu konik yapı, kendi adıyla, "Taylor Konisi" olarak anılmıştır. Taylor, deneysel olarak bu koniğin yarı tepe açısını 49,29° olarak bulmuştur. Daha sonra, bu açının sıvı özelliklerinden, uygulanan voltajdan ve kapiler tüp ile toprak elektrodu arasındaki mesafeden bağımsız olduğunu matematiksel olarak ispatlamıştır [9].

Sisteme yeterli miktarda elektrik alanı uygulandığında, elektrostatik kuvvetler sıvının yüzey gerilmesini yenerler, bunun sonucunda da Taylor Konisi'nin tepe noktasından damlacıklar halinde ayrılmalar oluşur. Oluşan bu akışa konik jet adı verilir. Bu akışı başlatan voltaj değeri, başlangıç voltajı adını alır ve denklem **4.1** 'deki gibi hesaplanır [30].

$$V_{BV} = \sqrt{\frac{\gamma r_t}{\varepsilon_0}} ln\left(\frac{4d}{r_t}\right) \tag{4.1}$$

Yukarıdaki denklemde, γ yüzey gerilmesi, r_t kılcal tüpün yarıçapı ve ε_0 ise serbest boşluk dielektrik sabitidir. Dielektrik sabiti değeri 8.854x10^{-12} $C^2N^{-1}m^{-2}$ olarak alınmıştır. Son olarak, d de kapiler tüpün ucu ile toprak elektrodu arasındaki mesafedir. Bu matematiksel ifade, Taylor Konisi'nin ucunda oluşacak ilk damlacık ayrımları için gereken minimum voltaj değerini vermektedir. Bu ayrım gerçekleştiğinde, damlacıklar koninin ucundan toprak elektroduna doğru sürekli hareket ederler ve bu sayede elektrik devresi tamamlanmış olur.

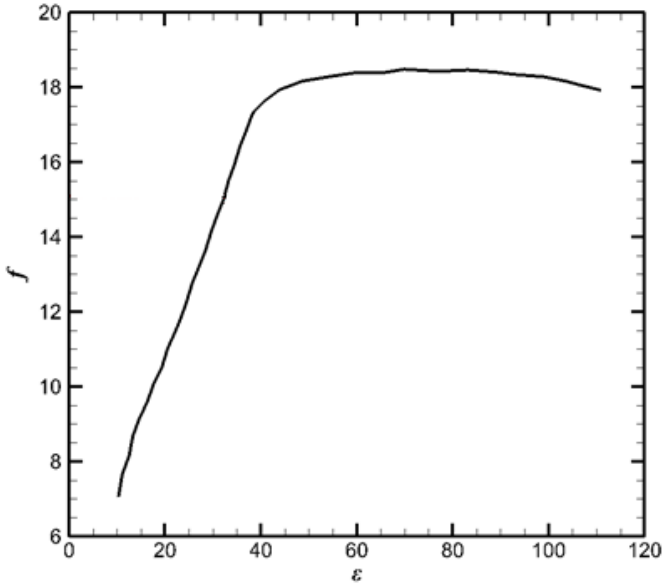
Elektrosprey sisteminden geçen akım denklem **4.2** ile hesaplanabilir. Eğer elektrosprey akımı bilinirse, denklemden akış debisi çekilebilir. Bu denklem 1994

yılında Fernandez de la Mora tarafından deneysel olarak bulunmuştur [11]. Bu denklemde ε bağıl yalıtkanlık sabitini temsil eder, K ise iletkenliktir.

$$I = f(\varepsilon)\sqrt{\frac{\gamma QK}{\varepsilon}} \tag{4.2}$$

Denklem **4.2** 'de yer alan *f(ε)* fonksiyonu boyutsuz akış debisine bağlı, boyutsuz sprey akımı türevidir. Bu türev sadece dielektrik sabitinin fonksiyonudur. Bu nedenle, bütün sıvılar için bu değer bir çizgiden geçer. Bu sonuç bize, elektrosprey akımına bağlı olarak, elektroprey debisini bulmamızı sağlar [11].

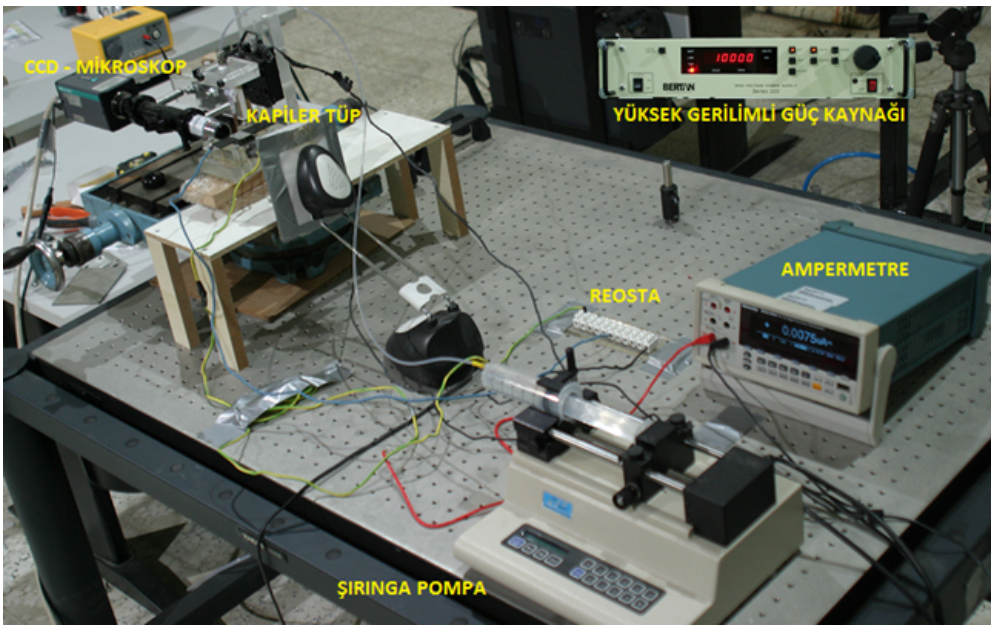
Şekil 4.1 Fernandez de la Mora tarafından, 1994 yılında bütün saf çözücüler için çizdirilmiştir [11]. Bağıl yalıtkanlık sabiti bilinen sıvılar için *f(ε)* değeri bu grafikten bulunabilir. Örneğin, metanol için bağıl yalıtkanlık sabiti 33,1'dir. Bu değer Şekil 4.1'deki grafikte *f(ε)*=15 değerine karşılık gelir.



Şekil 4.1: Bağıl yalıtkanlık sabiti bilinen çözücüler için *f(ε)* fonksiyonu değerleri [11].

5. DENEY DÜZENEĞİ

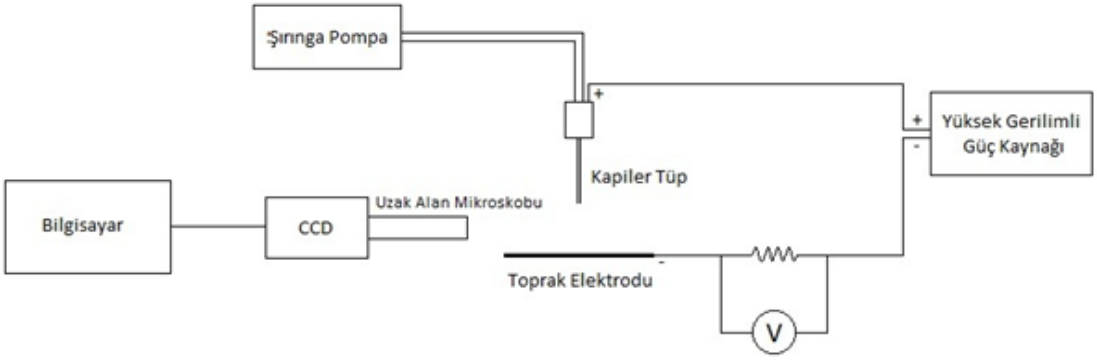
Sistemin bir fotoğrafı Şekil 5.1 'de görülmektedir. Deneylerde, 0,1 mm iç çapa sahip borosilikat cam kapiler tüp ve 0,23 mm iç çapa sahip insülin iğnesi uçları kullanılmıştır. İnsülin iğnesinin uç kısmı mümkün olduğu kadar düzleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Kapiler tüplerin uçları kapalı üretilmiştir, mümkün olduğu kadar düz kesilmeye çalışılmıştır. Kapiler tüpü sisteme bağlamak için ilk deneylerde Luer Barb bağlantı elemanları kullanılmıştır. Ancak, kerosen ile yapılan denemelerde, bağlantı elemanlarının içlerindeki kauçuk yapı bozulup yıpranınca, kapiler tüp, bağlantı elemanının ucundan silikon boru ile bağlanmıştır. Sıvı, kapiler tüpün ucuna bir şırınga pompa vasıtasıyla getirilmiştir. Şırınga olarak 10 ml ve 50 ml kapasiteli plastik şırıngalar kullanılmıştır. Şırınga pompa ile kapiler tüp arasındaki bağlantı, 1/8" dış çapına sahip boru sayesinde gerçekleşmiştir. Bertan 225-10R yüksek gerilimli güç kaynağı vasıtasıyla, istenilen voltajda gerilim sağlanmıştır. Alüminyumdan üretilmiş toprak elektrodu, kapiler tüpün çap eksenine dik olarak, belirli bir mesafe ile yerleştirilmiştir.



Şekil 5.1: Deney Düzeneği.

Elektrospreyin görüntülerinin fotoğraflanması Dantec Dynamics CCD (Charged Couple Device) kamera ile sağlanmıştır. 1,4 megapiksel çözünürlüğe sahip bu kamera ile siyah-beyaz görüntüler elde edilmiştir. 20 mm odak uzunluğuna sahip uzak alan mikroskobu, kameranın ön kısmına yerleştirilmiştir. Bu sayede incelenebilir boyuttaki görüntüler elde edilmiştir. Bu çalışmada, uzak alan mikroskobuna 10x ve 20x büyütme oranına sahip Mitutoyo lensler takılmıştır. Ayrıca CCD kamera, toprak elektrodu düzleminde serbestçe hareket edebilmesi için iki eksenli traverse bağlanmıştır. Bu traversin düzlemine dik yerleştirilmiş başka bir travers de, CCD kameranın dikey eksende hareketini sağlamıştır. Bu sayede kamera, üç eksende de hareket kabiliyeti kazanmıştır.

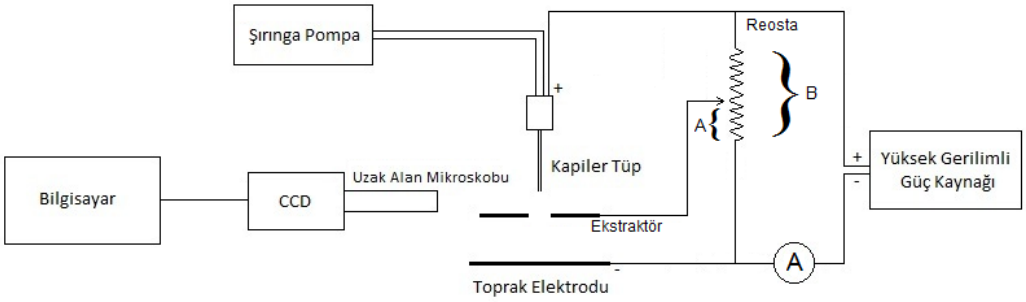
İki farklı deney düzeneği kurulmuştur. Birinci deney düzeneğinde ekstraktör elektrodu kullanılmamış, Şekil 5.2 ’de de görüldüğü gibi elektrosprey enjeksiyonu, kılcal tüpün karşısına yerleştirilen toprak elektrodu vasıtası ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2: Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ekstraktörsüz).

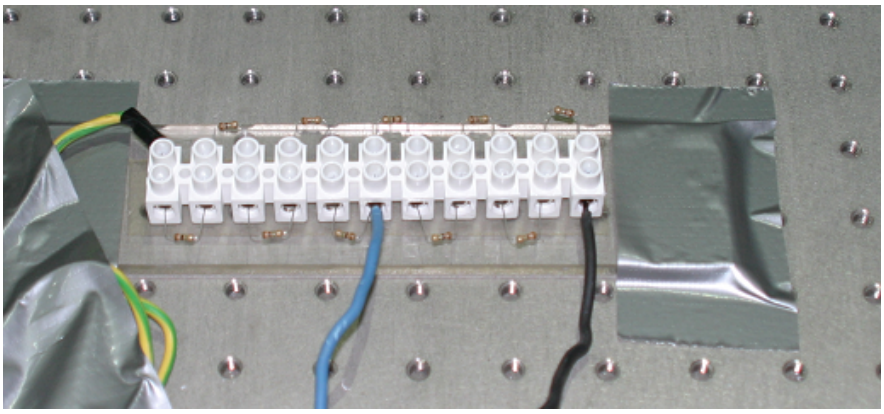
Şekil 5.3 ’de ise ekstaktör elektrodu kullanılarak oluşturulan deney düzeneği gösterilmektedir. Bu deney düzeneğinde, emitör ile toprak elektrodu arasında ekstraktör elektrodu bulunmaktadır.

Ekstraktör elektroduna bütün ölçümlerde, sıvıya uygulanan voltaj ile toprak elektrodu voltajı arası bir gerilim uygulanmıştır. Bu gerilim, sisteme bağlı bir reosta direnç sistemi vasıtası ile indirgenmiştir. Reosta, birbirine seri bağlı 10 adet 1’er mΩ ’luk dirençlerden oluşmaktadır. Dirençlerin yüksek değerli seçilmelerinin nedeni yüksek voltaja dayanabilmeleri içindir. Şekil 5.4 ’de görüldüğü üzere dirençler birbirine plastik bir klemens ile bağlanmıştır. Sistemde reosta kullanıldığından, ekstraktör voltajı her zaman sıvıya uygulanan voltaja bağlı olmuştur. Dirençlerin



Şekil 5.3: Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ekstraktörlü).

aynı seçilmesinin nedeni ise, istenilen voltaj oranına kolayca ulaşabilmek içindir. Örneğin, ekstraktör elektroduna ait kablo, A/B = 3/10 direnç oranında bağlanıldığında, güç kaynağından 1000 V gerilim uygulanması dâhilinde, ekstraktör elektroduna 300 V, sıvıya ise 1000 V gerilim uygulanacaktır. Aynı şekilde 2000 V uygulandığında bu değer 600 V olacaktır. Bu yüzden sıvı voltajını sabit tutup, ekstraktör voltajını değiştirmek için kablonun bağlantı yerinin değiştirilmesi gerekmektedir.

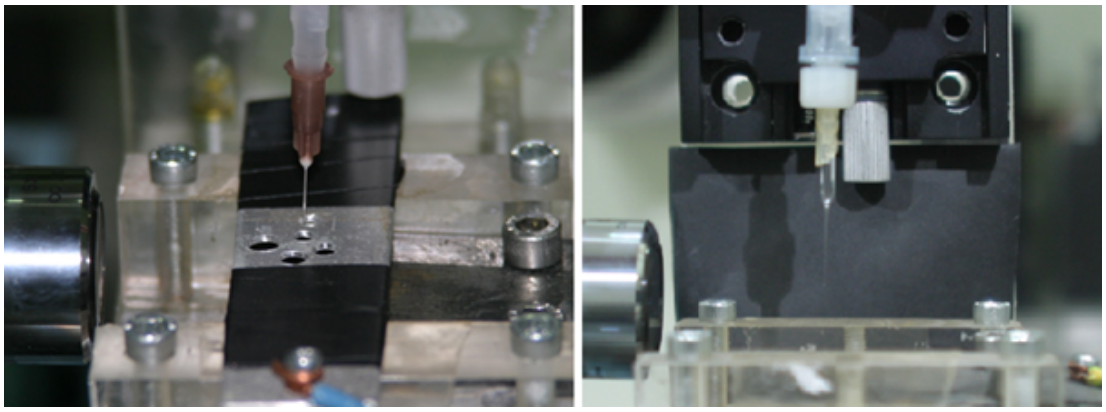


Şekil 5.4: 1'er mΩ'luk 10 adet direnç ile oluşturulmuş reosta sistemi.

Şekil 5.5 'de insülin iğnesi bağlı sistem görülmektedir. Ayrıca diğer fotoğrafta kılcal tüp bağlı sistem görülmektedir. Kılcal tüp silikon boru ile bağlantı elemanlarına bağlanmıştır. Şekilde görülen ekstraktör, 1 mm alüminyum sacdan üretilmiş olup, üzerine matkapla 3, 3,8 5,2 çapında delikler açılmıştır. Ekstraktör, toprak elektroduna 7 mm mesafe ile yerleştirilmiş, bu değer bütün deneylerde sabit tutulmuştur.

Elektrosprey akımı, Tektronix DMM4020 dijital multimetre vasıtasıyla ölçülmüştür. Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneylerde, 10 kΩ kontrol direnci, negatif elektrod ile toprak elektrodu arasına bağlanmıştır. Bu direncin üzerine

voltmetre paralel olarak bağlanmış, voltmetrede okunan değerden akım değeri hesaplanmıştır. Bu sayede elektrosprey akımı bulunabilmiştir. Voltmetrede okunan değer sistem çalışmadığı zamanlarda bir gürültü değeri göstermektedir. Elektrosprey akımı başladığı anda bu değer değişmektedir. Bu sayede elektrospreyin oluşumu sadece voltmetreye bakılarak da anlaşılabilmiştir. Voltmetrenin ölçtüğü değeri, ilk değiştiren voltaj değeri başlangıç voltajı olarak kaydedilmiştir. Ekstraktör ile yapılan deneylerde multimetre ampermetre olarak sisteme seri bağlanmış, kontrol direnci kullanılmamıştır. Bu sayede direncin yarattığı kayıplar engellenmiştir.



Şekil 5.5: İnsülin iğnesi ve kılcal tüp.

Sistemin geri kalan destekleyici parçaları ise pleksiglastan imal edilmiştir. Çizimleri ekler bölümünde mevcuttur. Deneylerde kullanılan sıvılara ait özellikler Çizelge 5.1'de mevcuttur.

Çizelge 5.1: Sıvıların fiziksel özellikleri

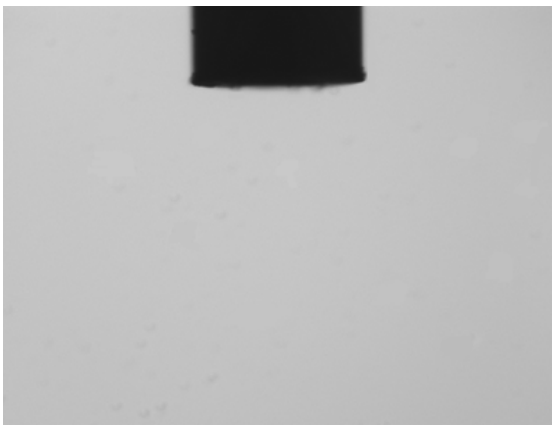
	Yoğunluk (kg/m^3)	**Yüzey Gerilimi** (N/m)	**Bağıl Yalıtkanlık Sabiti**	**İletkenlik** (Sm^{-1})
Metanol	791,3	0,023	33,1	2,1 x 10^{-7}
Etanol	780	0,024	24,3	1,9 x 10^{-5}

6. SONUÇLAR

Elektrospreyin oluşumu gözlemlemek ve karakterizasyonunu gerçekleştirmek için birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler iki farklı deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Birinci deney düzeneğinde ekstraktör elektrodu kullanılmamış, sıvı direkt olarak toprak elektroduna püskürtülmüştür. Sıvı enjeksiyonu hem borosilikat kılcal tüp ile hem de insülin iğnesi ucu ile gerçekleştirilmiştir. Borosilikat kılcal tüpün iç çapı 0,1 mm'dir ve bu değer elektrosprey enjeksiyonu için oldukça uygundur. Ayrıca kılcal tüplerin uçları kapalı üretildikleri için, kesilmeleri gerekmiştir. Ancak tüpün yapıldığı malzeme cam olup ve çok kırılgan bir malzeme olduğundan, kesme işlemi çok iyi uygulanamamıştır. Hidroflorik asit kullanılarak uçları eritilmeye çalışılmış olsa da, bir türlü düzleştirilmiş uç formu sağlanamamıştır. Normal yollarla (pense yardımıyla kırılarak) uçları kesilmiş ve olabilecek en düz uç sağlanılmaya çalışılmıştır.

Ekstraktör elektrodu kullanılarak yapılan deneyler için cam kapiler tüpün uygun olmadığı görülmüştür. Kapilerin ucunun olabilecek en düzgün formunda bile düzgün bir akış sağlanamamış, güvenilir ölçümler alınamamıştır. Çünkü elektrosprey enjeksiyonunda kapiler geometrisi oldukça önemlidir. Kapilerin ucunda oluşabilecek bir sivrilik ya da girinti, elektrosprey karakteristiğini değiştirebilir ve farklı ve beklenmedik sonuçların çıkmasını sağlayabilir. Bu yüzden ekstraktör elektrodu ile yapılan deneylerde insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. İnsülin iğnesi metal malzemeden üretildiğinden ucunu düzleştirmek oldukça kolay olmuştur. Şekil 6.1 'de mikroskop yardımıyla çekilen fotoğrafta iğnenin ucunun düzlüğü gözükmektedir. 0,23 mm iç çapa sahip bu iğne literatürde kullanılan emitörlere göre biraz daha büyük olsa da, ucunun düz olması, beklenen sonuçların gerçekleşmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu düzlük normal taşlama ve zımpara yöntemleriyle sağlanmıştır.

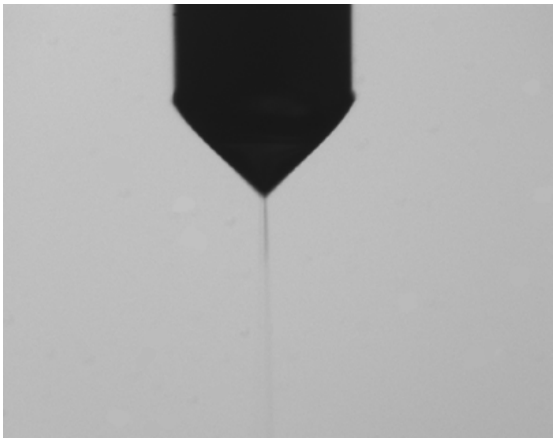
Yapılan deneylerin tamamında, şırınga pompa ile 0,5 ml/saat değerinde debi uygulanmıştır. Bu debinin uygulanmasının sebebi, emitör içerisindeki sıvı basıncını sabit tutmaktır. Çünkü deneyler, şırınga pompa kullanılmadan da yapılmaya çalışılmış,



Şekil 6.1: İnsülin iğnesi ucu.

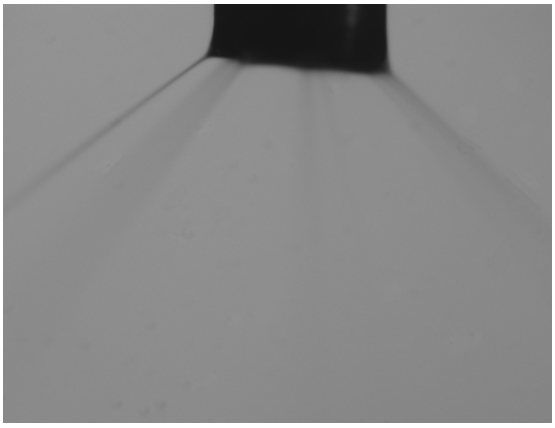
ancak başarı sağlanamamıştır. Bunun nedeni, elektrosprey oluşumu ile sıvı aktıkça, emitör içerisindeki basıncın değişmesi ve bu yüzden de ampermetrede okunan akım değerinin değişmesidir ki bu da istenilmeyen bir durumdur. Şırınga pompanın çalıştırılması durduğunda bile bir müddet sıvı akışının kesilmemesi de deneyleri zorlaştıran bir başka nedendir. Sonuç olarak, 0,5 ml/saat gibi düşük bir debi değeri uygulamak, parametrik çalışma için oldukça uygun olmuştur.

G. Taylor'ın 1964 yılında bulduğu ve kendi ismi ile anılan Taylor Konisi başarıyla elde edilmiştir. Şekil 6.2 'de şırınga pompa çalıştırılmadan elde edilmiş bir Taylor Konisi fotoğrafı bulunmaktadır. Elbette ki şırınga pompa ile debi sağlandığında da Taylor Konisi oluşmaktadır, ancak böylesine net bir görüntü için pompanın çalıştırılmaması gerektiği uygun görülmüştür. Ayrıca bu görüntü, konik jet moduna bir örnek olarak da gösterilebilir.



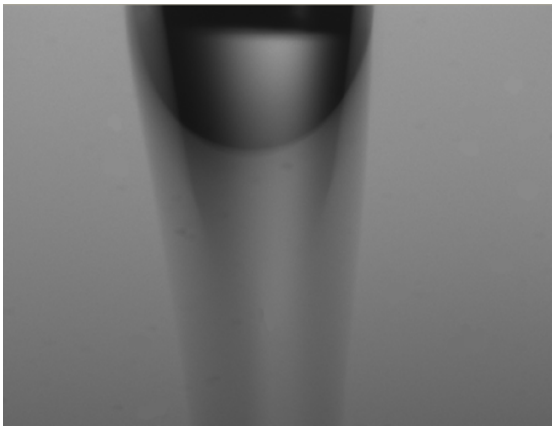
Şekil 6.2: Taylor konisi.

Eğer sisteme, başlangıç voltajının çok üzerinde bir gerilim uygulanırsa, sıvı yüzeyinde birden fazla koni oluşur. Bu küçük koniler, sıvı yüzeyinde genel bir kabarma yaratmaz, ufak jetler halinde emitörün ucundan yayılırlar. Buna çoklu jet modu(multijet modu) denir. Şekil 6.3 'de multijet modunun başarı ile oluşturulduğunu gösteren fotoğraf yer almaktadır. Bu fotoğraftaki akış yaklaşık, 5,5 kV voltaj değeri uygulanarak, etanol sıvısı ile oluşturulmuştur.



Şekil 6.3: Multijet modu.

Bu deney düzeneği ile gözlenebilen bir diğer mod ise, mikro damlama modudur. Şekil 6.4 'deki görünüm, her ne kadar konik jet moduna benzese de, ampermetrede okunan akım değerinde bir değişiklik yaratmadığı için mikro damlama modu olarak alınabilir.

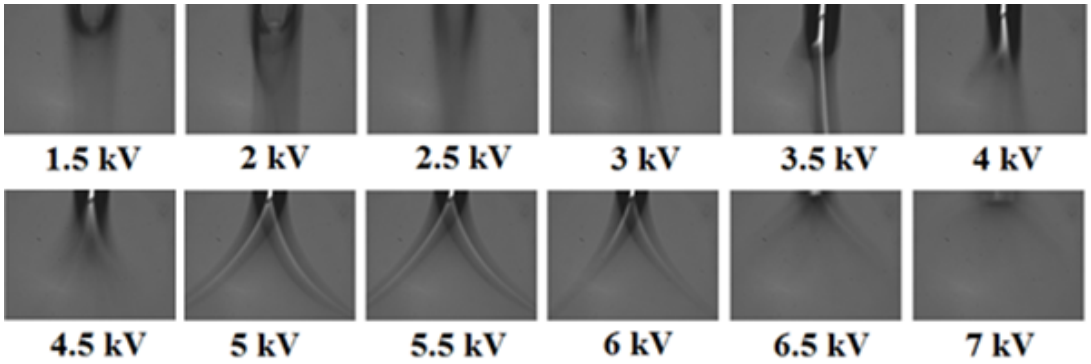


Şekil 6.4: Mikrodamlama modu.

6.1 Ekstraktör Elektrodu Kullanılmadan Yapılan Deneyler

Parametrik çalışmanın ilk deneyleri, ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılmıştır. Bu deneylerde emitör olarak borosilikat cam kapiler tüp kullanılmıştır. Dielektrik

sıvı olarak ise metanol kullanılmıştır. Sisteme 0 ile 7 kV voltaj değerleri 0,5 kV aralıklarla uygulanmış olup farklı voltaj değerlerindeki elektrosprey fotoğrafları Şekil 6.5 ’de görülmektedir. Sisteme 1,5 kV voltaj değeri uygulandığında, Taylor Konisi’nin uç kısmında ilk ayrılmalar meydana gelmiştir. Voltaj artırıldıkça, Taylor Konisi’nin yüksekliği artmış, toprak elektroduna doğru bir yaklaşma gözlemlenmiştir. Şekil 6.5 ’de de görüldüğü üzere, 3,5 kV ve bundan sonraki değerlerde Taylor Konisi toprak elektrodu ile neredeyse birleşmiştir ve stabil bir akış oluşmuştur. 5, 5,5 ve 6 kV uygulandığında akışta çatallaşma meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak da toprak elektrodununun yüzey genişliğinin, kılcal tüpün çapından oldukça büyük olmasıdır. 6,5 ve 7 kV’a ait fotoğraflar, diğerlerine göre daha düşük çözünürlüklüdür. Bunun sebebi kılcal tüpün elektriksel kuvvetlere dayanamayıp titremesidir. Ayrıca, 3,5 ve 4 kV değerine ait şekillerde akışın simetrik olarak gerçekleşmediği gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak cam kapilerin ucunun düzgün olmaması olarak gösterilebilir.

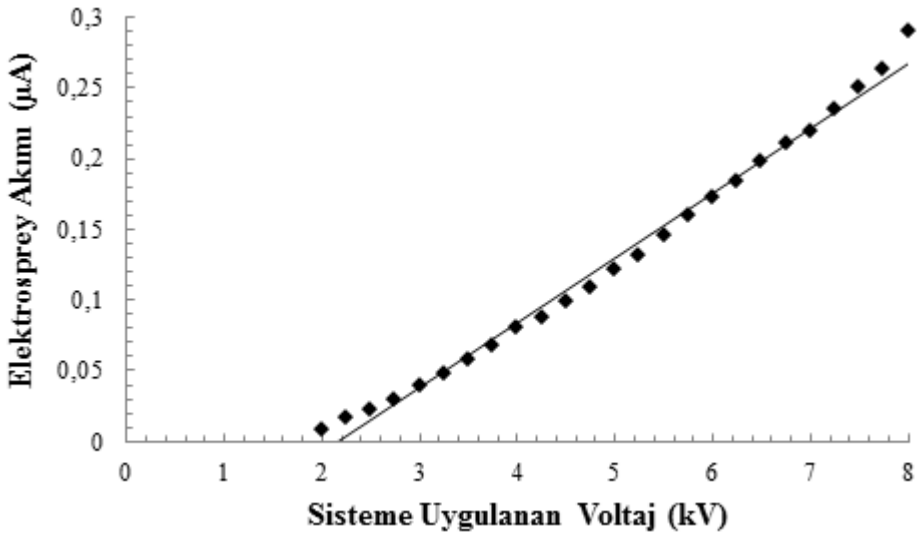


Şekil 6.5: Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp.

Teorik olarak, başlangıç voltajı, denklem **4.1** ile 2,5 kV olarak bulunmuştur. Bu hesaplamada kılcal tüp ile toprak elektrodu arasındaki mesafe 15 mm alınmış olup, iletken sıvı olarak metanol kullanılmıştır.

Şekil 6.6 ’deki grafik, elektrospreyden geçen akım, elektrik yüklenmiş sıvı ile toprak elektrodu arasındaki potansiyel farkın fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Grafikteki değerler üzerine lineer bir doğru oluşturulmuş, bu doğru çizdirilmiştir. Bu doğrunun korelasyon katsayısı R^2 = 0,99’dur. Doğrunun x-eksenini kestiği nokta başlangıç voltajı değeridir ve şekilde görüldüğü üzere bu değer yaklaşık 2,2 kV civarıdır. Ayrıca,

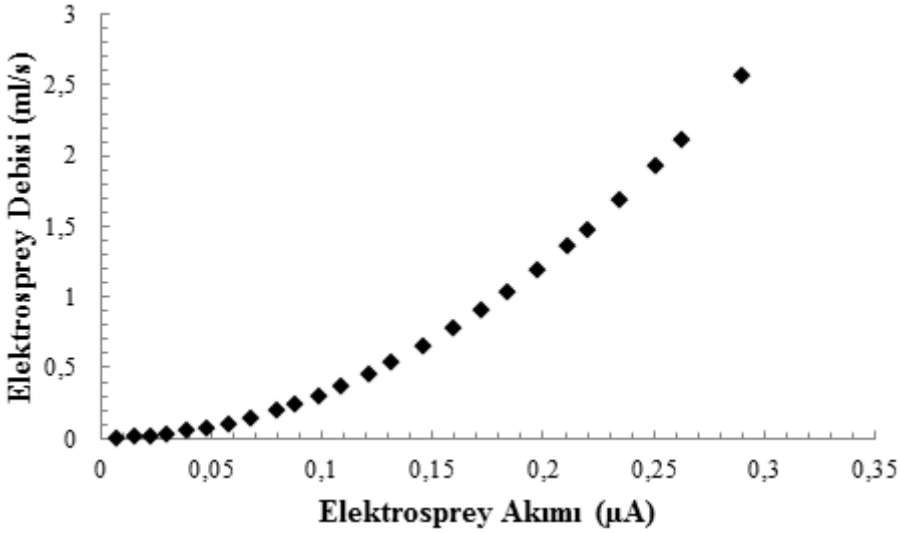
elektrosprey ilk oluştuğu sırada, multimetrede ani bir değer değişimi olmaktadır. Bu şekilde de başlangıç voltajını bulmak mümkündür.



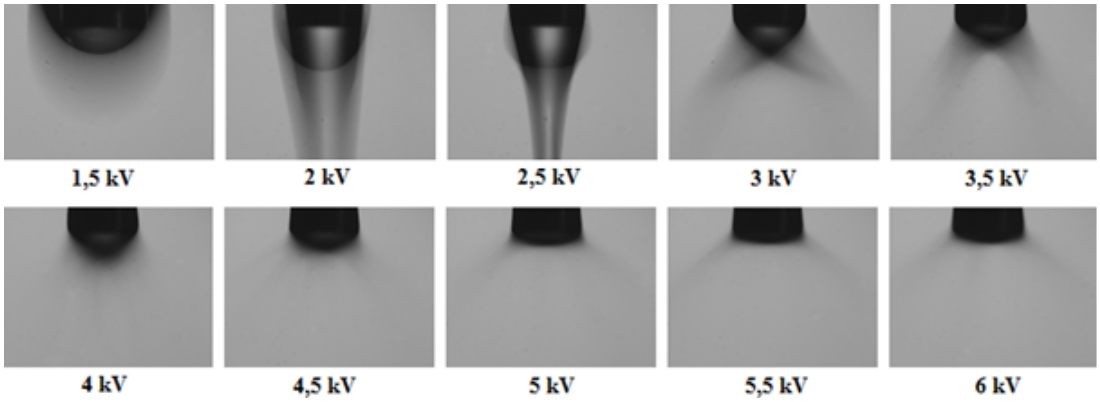
Şekil 6.6: Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp.

Elektrosprey debisi denklem **4.2** vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu denklemdeki, $f(\varepsilon)$ haricindeki değerler için Çizelge 5.1' den yararlanılmıştır. $f(\varepsilon)$ değeri için ise Fernandez de la Mora'nın 1994 yılında yazdığı makaleden yararlanılmıştır. Bu makalede bütün saf çözeltilerin değerlerine karşılık gelen $f(\varepsilon)$ değerleri çizdirilmiştir. Metanol için dielektrik sabiti 33,1'dir ve bu değere karşılık gelen $f(\varepsilon)$ değeri 15 civarıdır. Bunun sonucunda, elektrosprey akımına karşılık gelen elektrosprey debisi Şekil 6.7 'de gösterilmiştir.

Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneyler, insülin iğnesi ile de gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8 'deki elektrosprey fotoğraflarında dielektrik sıvı olarak etanol kullanılmıştır. İğne ucu ve toprak elektrodu arası mesafe 5 mm olarak alınmıştır. 1,5 kV'a ait fotoğraflarda damlama modu, 2 kV'a ait fotoğraflarda mikro-damlama modu gözlenmektedir. 2,5 kV'da elektrosprey enjeksiyonu artık başlamıştır. 3 kV ve sonrasında, sıvı, toprak elektrodunun oldukça geniş olması nedeniyle, genişlemiştir. 5 kV ve daha sonrasındaki fotoğraflarda ise multijet modu görülebilir. Ekstraktör elektrodu kullanmadan yapılan deneylerde emitör – toprak elektrodu arası mesafede 5 mm'nin altına inilememiştir. Parametrik çalışma esnasında toprak elektrodu üzerinde biriken sıvı tabakası, sağlıklı ölçümlerin yapılmasını engeller nitelikte olmuştur.



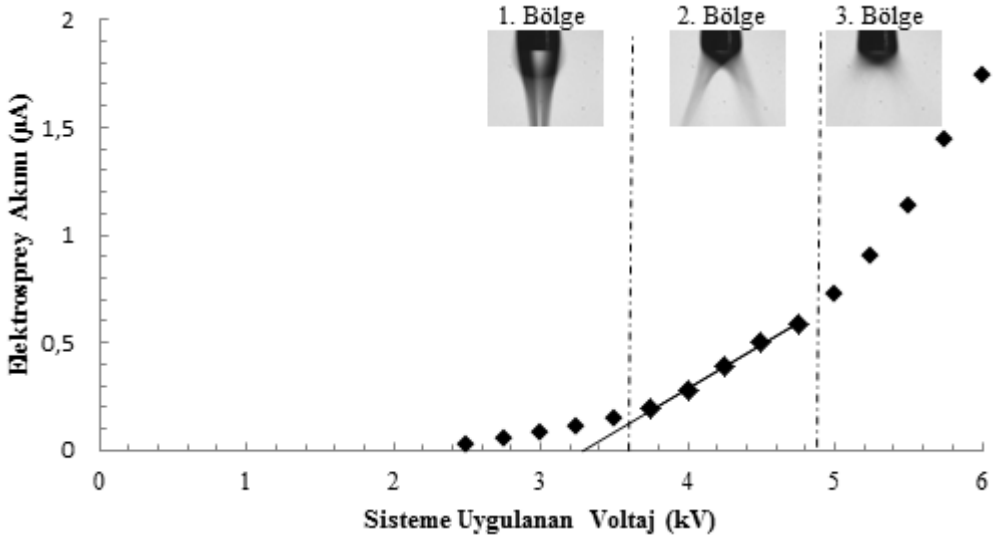
Şekil 6.7: Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Dielektrik sıvı: Metanol, Emitör: Kılcal tüp.



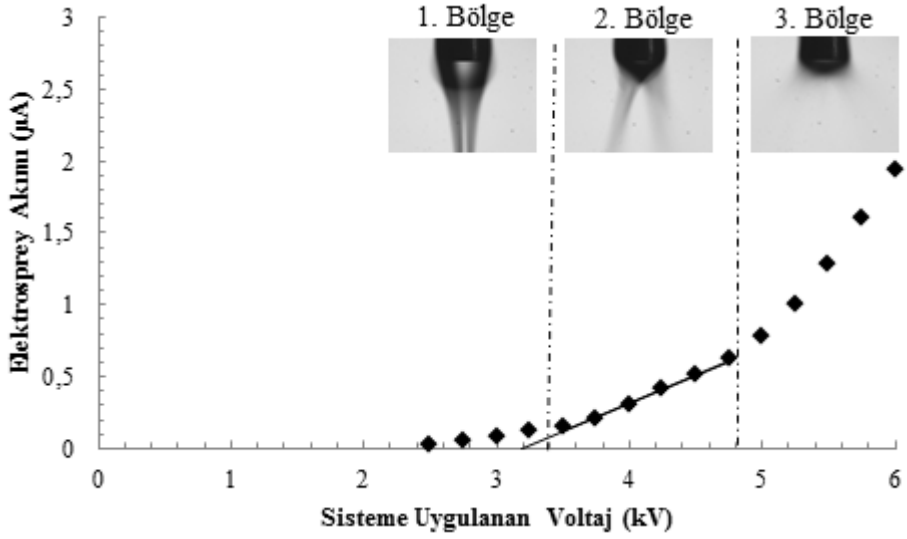
Şekil 6.8: Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi.

Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'in ikinci bölgelerinde lineer bir artış gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalarda bütün veri noktaları için çizilen lineer doğru bu kez, sadece ikinci bölge için çizdirilmiştir. Bunun sonucunda, bu doğrunun x-eksenini kestiği noktalar Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'de sırasıyla 3,23, 3,2 ve 3 kV'dur. Emitör ucunun toprak elektroduna yaklaşması ile bu değerin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.12'de üç farklı emitör ucu – toprak elektrodu mesafeleri için elektrosprey akımları karşılaştırılmıştır. 11 mm ve 10 mm gibi uzak mesafelerde elektrosprey akımı en fazla 2 μA olarak ölçülmüşken, 5 mm mesafe için en fazla 9 μA değerine ulaşmıştır. Bu grafik, emitör ucu ile toprak elektrodu arası mesafenin azalması ile elektrosprey akımının arttığını göstermektedir.

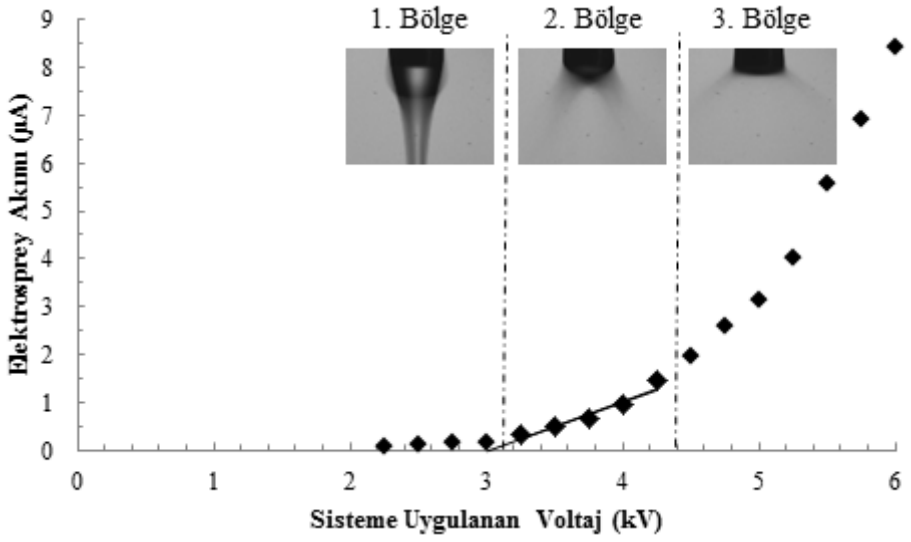


Şekil 6.9: Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı.Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi:11 mm.

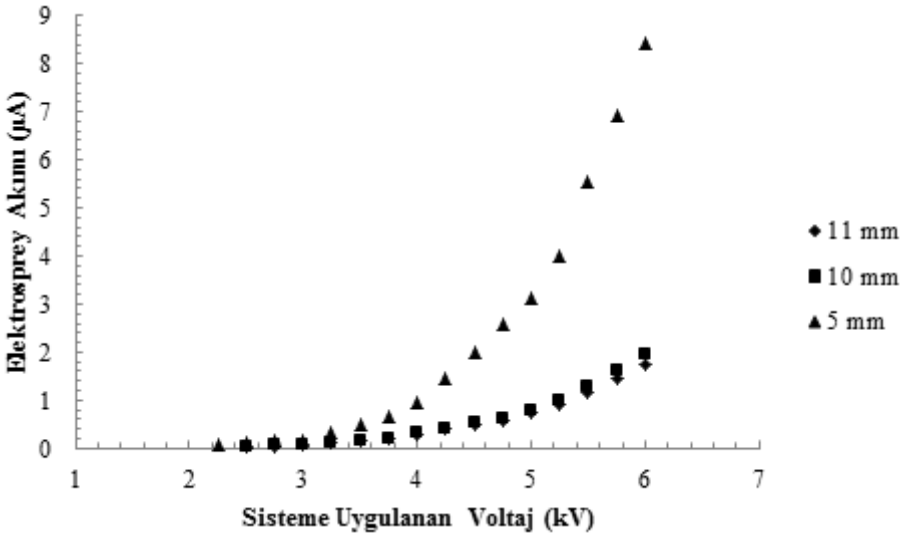


Şekil 6.10: Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi: 10 mm.

Şekil 6.13'de, ölçülen elektrosprey akımlarına karşılık gelen elektrosprey debi değerleri gösterilmiştir. Bu grafikler, yalnızca Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'de gösterilen, 1. ve 2. bölgeler için çizdirilmiştir. Debinin bulunmasında, bir önceki deneylerde de kullanılan denklem **4.2** 'den yararlanılmıştır. Etanol için $f(\varepsilon)$ değeri, Şekil 4.1'den 12 olarak bulunmuştur. Çizilen grafikler yalnızca akım değerlerine göre çizildiğinden, üç mesafe için veri noktaları aynı eğrinin üzerinde yer almaktadır.

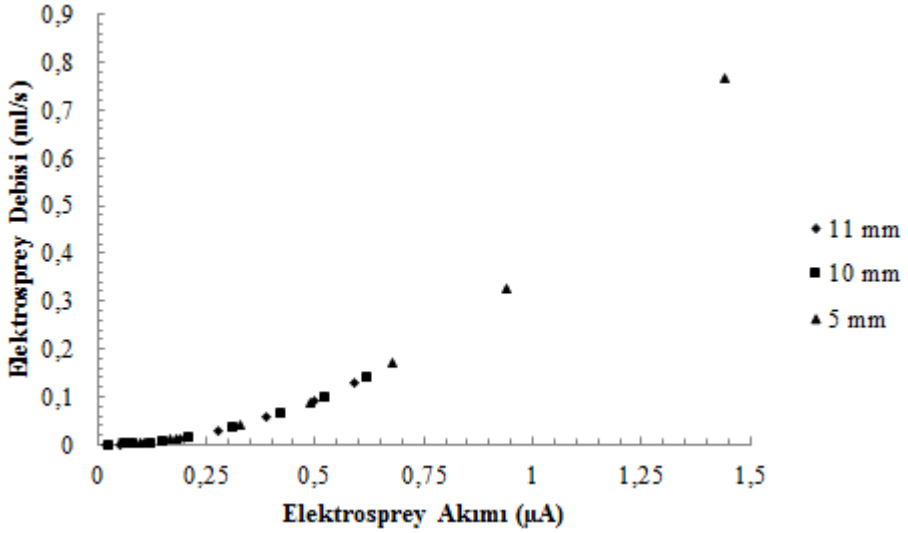


Şekil 6.11: Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi, Emitör - Toprak Elektrodu mesafesi: 5 mm.



Şekil 6.12: Farklı voltaj değerleri ve üç farklı emitör ucu – toprak elektrodu mesafeleri için elektrosprey akımlarının karşılaştırılması.

Elektrosprey akımı arttıkça, debi değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bulunan debi değerleri literatürde yer alan değerler ile yaklaşık aynı mertebededir [20]. Emitör ucu ile toprak elektrodu arası mesafe azaldıkça, ulaşılan debi değerleri yükselmiştir. Şekil 6.13'de de görüldüğü üzere, en yüksek debi 5 mm emitör ekstraktör mesafesi için çıkmıştır, çünkü bu mesafede en fazla akım değerine ulaşılmıştır. Bu mesafede ulaşılan en yüksek akım değeri yaklaşık 1,4 μA ölçülmüş ve buna karşılık gelen debi değeri 0,8 ml/s olarak hesaplanmıştır. 11 mm ve 10 mm mesafeler için ölçülen en



Şekil 6.13: Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Dielektrik sıvı: Etanol, Emitör: İnsülin iğnesi.

yüksek akım değeri yaklaşık aynı olup, 0,6 μA ölçülmüş ve bu değer için debi değeri 0,15 ml/s olarak hesaplanmıştır.

6.2 Ekstraktör Elektrodu Kullanılarak Yapılan Deneyler

Parametrik çalışmanın ikinci deneyleri, ekstraktör elektrodunun, elektrosprey karakteristiğine etkisini inceleme yönünde gerçekleşmiştir. Bu deneylerde önceden de belirtildiği gibi ekstraktör elektrodu, sıvı ile toprak elektrodu arası bir yük ile yüklenmiştir. Yüksek gerilimli güç kaynağından sağlanan gerilimi ikiye ayırmak için dirençlerden oluşan bir reosta sistemi kullanılmıştır.

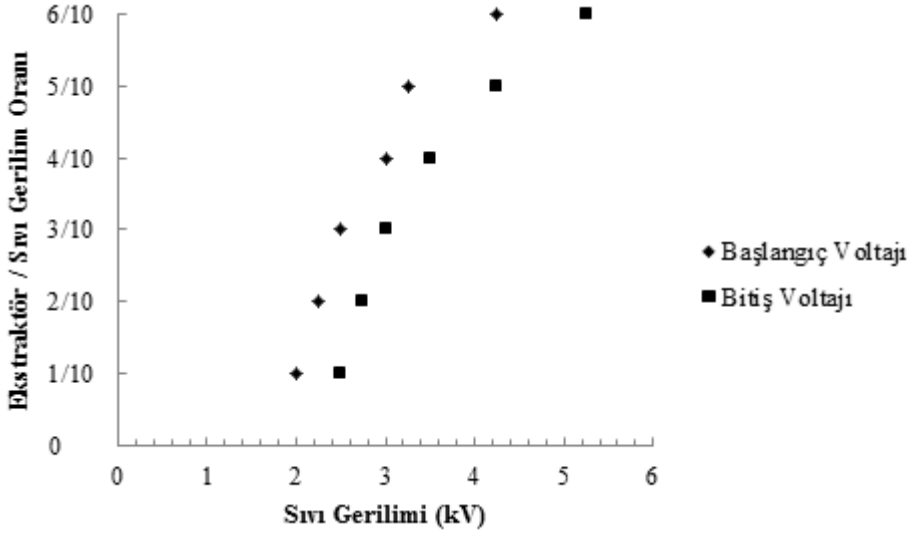
Ekstraktör elektrodu ile toprak elektrodu arası mesafe bütün deneylerde sabit tutulmuş ve 7 mm'dir. 3 mm, 3,8 mm ve 5,2 mm ekstraktör elektrodu çapı için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafeleri için uygulanmıştır. Dielektrik sıvı olarak etanol kullanılmıştır. Sıvıya uygulanan voltaj, şırınga pompadan gelen boru ile emitörü birbirine bağlayan metal bağlantı elemanına gerilim uygulanmasıyla sağlanmıştır. 0 ile 6 kV arası gerilim değerleri 250 V'luk artırımlarla uygulanmıştır. Bu voltaj değerleri sıvıya uygulanırken, ekstraktör voltajı da farklı reosta oranları sayesinde sağlanmıştır. Şekil 5.3 te görüldüğü gibi, (ekstraktör voltajı) / (sıvı voltajı) = A/B olarak gösterilebilir. Burada A ve B değerleri direnç sayısıdır. B değeri sıvıya uygulanan voltaj değerini temsil etmektedir bu da toplam direnç sayısına eşittir, yani 10'dur. A değeri ise 1 ile 7 arasıdır.

A/B oranı arttıkça, bir başka deyişle ekstraktöre uygulanan voltaj değeri arttıkça elektrospeyin oluşması için gereken sıvı başlangıç voltajı değerinde artış gözlemlenmiştir. 8/10 ve 9/10 oranı uygulandığında, sıvıya uygulanması gereken değer neredeyse 6 kV'u geçmiştir. Reostadaki elemanların direnç değerleri bu gerilime dayanamadıkları için bu oranlar için ölçüm alınmamıştır. Bu yüzden deneylerde 6 kV'un üzerine çıkılmamıştır.

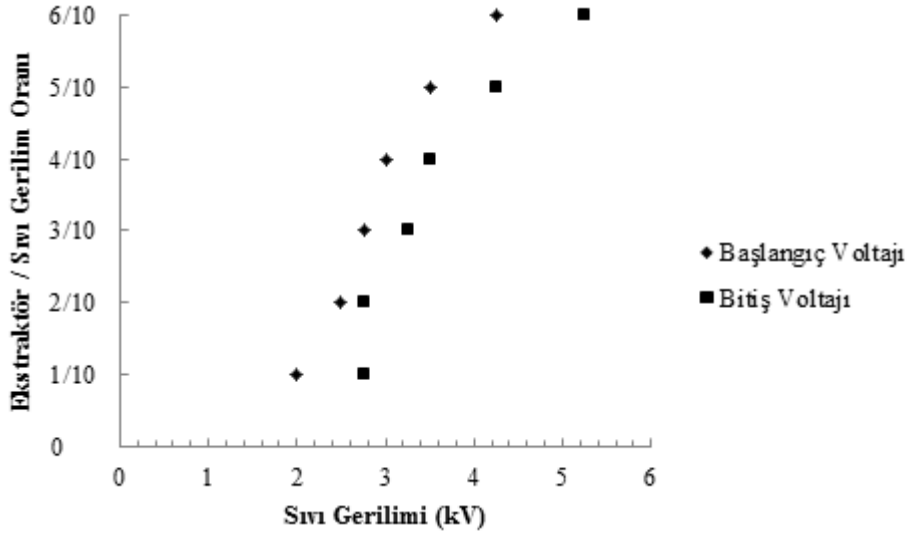
Elektrosprey enjeksiyonu sırasında, sıvıya uygulanan voltaj değeri belirli bir değere ulaştığında, sıvının ekstraktör elektroduna temas etmeye başladığı gözlemlenmiştir. Böyle durumlarda ampermetrede okunan, belirli bir oranda artması gereken elektrosprey akımı değeri artmamıştır. Bu durum özellikle çoklu elektrosprey sistemlerinde istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden, sıvının temas etmeye başladığı voltajdan, bir önceki voltaja elektrosprey bitiş voltajı denmiştir ve bu voltaj değerinden sonra ölçüm alınmamıştır. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de, 3 mm ekstraktör çapı ile yapılan deneyler doğrultusunda, 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör elektrodu arası mesafe için başlangı ve bitiş voltajları gösterilmiştir. Grafiklerdeki noktalar gösterilirken, sıvı geriliminin kV cinsinden değeri ile ekstraktör/sıvı gerilim oranı esas alınmıştır.

Grafiklerde görüldüğü üzere, ekstraktör elektrodu ile sıvıya uygulanan gerilim oranı (A/B) arttıkça, başlangıç ve bitiş voltajının artması gerektiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.14 ile Şekil 6.15 karşılaştırıldığında, emitör ile toprak elektrodu arası mesafenin artması ile başlangıç ve bitiş voltajı değerlerinin biraz arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde, her A/B oranında elektrosprey enjeksiyonunun belirli bir voltaj aralığında olması gerektiği görülmüştür. A/B oranı arttıkça, bazı değerlerde bu çalışma aralığı sabit kalırken, bazı oranlarda bu değerin arttığı gözlemlenmiştir. Bu aralık 1/10'dan 4/10 oranına kadar 0,5 kV olurken, 5/10 ve 6/10 oranlarında 1 kV olmuştur. Şekil 6.15'deki çalışma aralıklarında, özellikle 1/10 ve 2/10 voltaj oranları değerinde deneysel belirsizlikler oluşmuştur. Daha sonraki oran değerlerinde aralığın A/B oranı arttıkça çalışma voltajı aralığı artmış ve önceki şekilde olduğu gibi 6/10 oranında 1 kV olmuştur.

3,8 mm ekstraktör çapı ile yapılan deney sonuçları incelendiğinde, önceki sonuçların burada da geçerli olduğu görülmüştür (Şekil 6.16 ve Şekil 6.17). Şekil 6.16'de

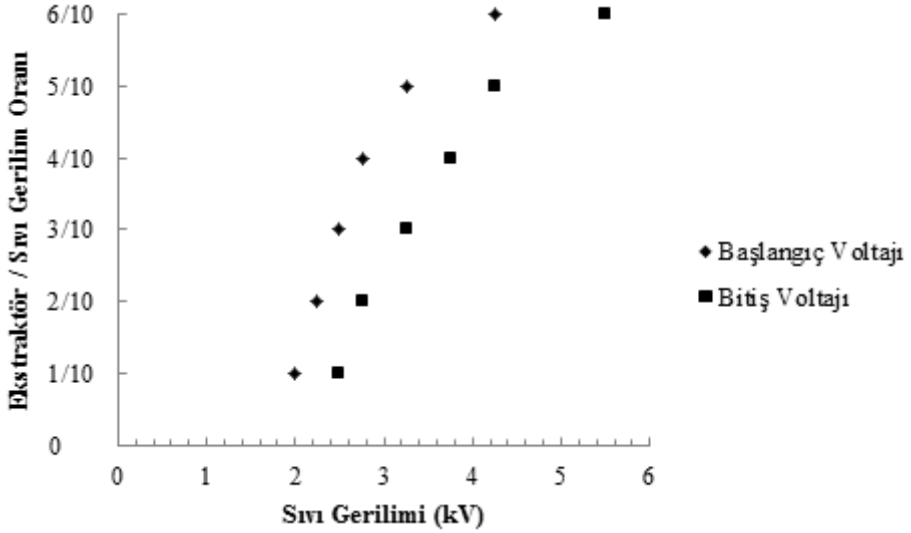


Şekil 6.14: 3 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

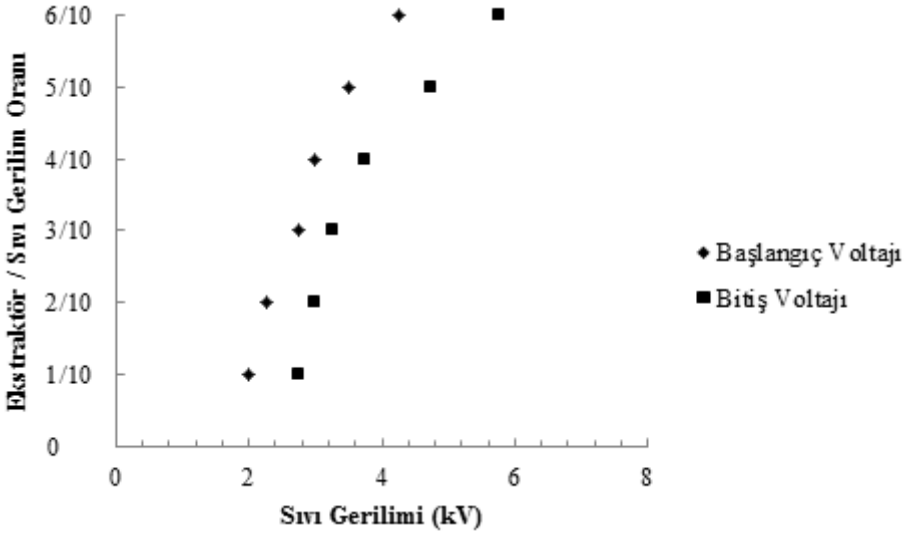


Şekil 6.15: 3 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

görüldüğü üzere, elektrosprey çalışma aralığı A/B oranı arttıkça artmış, 1/10 oranında 0,5 kV iken, 6/10 oranına ulaşıldığında 1,25 kV olmuştur. Şekil 6.17'da ise, 3/10 oranındaki deneysel belirsizlik dışında, çalışma aralığı diğer grafiklerde olduğu gibi artmış 1/10 değerinde 0,75 kV iken, 6/10 oranında 1,5 kV'a yükselmiştir. Ayrıca deney sonuçları incelendiğinde, ekstraktör delik çapı artınca, başlangıç voltajı aynı kalırken, bitiş voltajında artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni delik çapının artması ile sıvı ile ekstraktör elektrodu temasının yüksek voltaj değerlerinde gerçekleşmesidir.



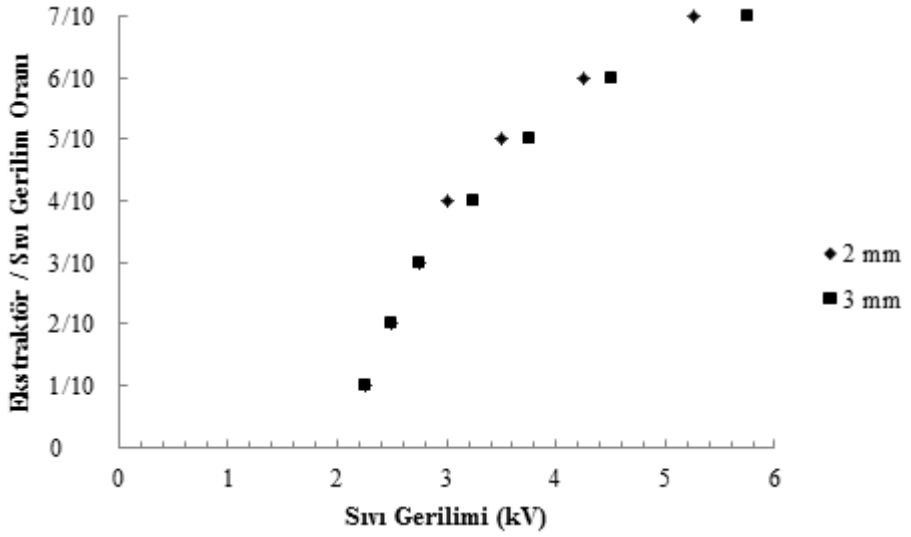
Şekil 6.16: 3,8 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.



Şekil 6.17: 3,8 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

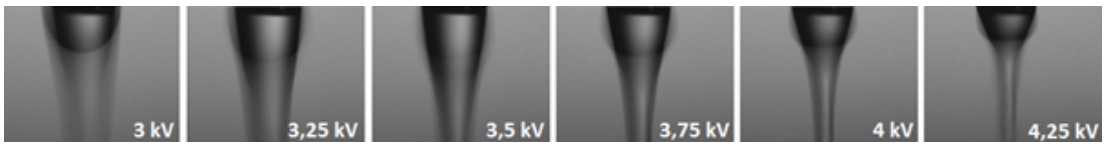
Çoklu elektrosprey sistemlerinde emitörler belirli mesafe oranlarıyla yerleştirilmektedir. Karşısına yerleştirilen ekstraktör üzerinde bulunan delikler de emitörler ile eş merkezli olacağından bu mesafe oranıyla yer alırlar. Bu yüzden açılabilecek maksimum delik çapı belli bir değerde olacaktır. Böyle sistemlerde, ekstraktöre uygulanabilecek maksimum voltaj olan bitiş voltajının önceden bilinmesi, tasarımda faktörleri için ölçüt olarak sayılabilir.

Deneyler, 5,2 mm ekstraktör elektrodu çapı için de uygulanmıştır. Yalnız bu çap değeri oldukça büyük olduğu için, hiçbir voltaj değerinde sıvı ekstraktör elektroduna temas etmemiştir, bu yüzden bitiş voltajı değeri söz konusu değildir. Şekil 6.18'de 2 ve 3 mm emitör – ekstraktör arası mesafe için başlangıç voltajı değerleri görülmektedir. 1/10, 2/10 ve 3/10 oranları için başlangıç voltajı değeri, her iki delik çapı için aynı olurken, daha sonraki değerlerde, delik çapının artması ile artmıştır. Ayrıca her iki delik çapı değerinde de değerler logaritmik olarak artış göstermiştir. Bitiş voltajının ölçülmesi gerekmediğinden, 7/10 oranında başlangıç voltajı ölçülebilmiştir. 1/10 oranında başlangıç voltajı 2 kV mertebesinde gerçekleşmişken, 7/10 oranında 5 kV mertebesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 6.18: 5,2 mm ekstraktör çapı ve 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

Şekil 6.19'de 3,8 mm ekstraktör elektrodu çapı için, A/B=5/10 reosta direnç oranı için, farklı voltajlardaki elektrosprey fotoğrafları gösterilmiştir. Bu çalışmada emitör – ekstraktör arası mesafe 2 mm olarak alınmıştır. İlk fotoğraftaki görünüm, her ne kadar konik jet modunu andırsa da, atomize olmuş bir sprey modu değildir. Çünkü bu akışın olduğu esnada ampermetrede, elektrosprey enjeksiyonu esnasında gerçekleşmesi gereken akım değişimi olmamıştır. Akım değişiminin gerçekleşmediği, ancak görünümü konik jet moduna benzeyen bu yapı, mikro damlama modudur. Elektrosprey enjeksiyonu 3,25 kV değerinde başlamıştır. Bu voltaj değerindeki



Şekil 6.19: 5/10 direnç oranı ve 3,8 mm ekstraktör çapı kullanılmış, çeşitli voltalarla oluşturulmuş elektrosprey fotoğrafları. Ekstraktör elektrodu - emitör arası mesafe: 2 mm.

elektrosprey akımı yaklaşık 4,7 x 10^{-5} Amper olarak ölçülmüştür. Voltaj arttırıldıkça jet akışı daha ince bire hal almaya başlamıştır.

Bu incelme bize, ekstraktör elektrodunun görevini doğru yaptığını gösterir. Çünkü çoklu elektrosprey sistemlerinde, bu incelme sayesinde, emitörlerin uçlarında oluşan konik jetler birbirlerini etkilemezler, her biri tek bir elektrospreyin davranışını gösterebilir. 4,25 kV ise bitiş voltajıdır, bu voltajda ölçülen akım değeri ise 1,2 x 10^{-4} Amper'dir. Bu voltajdan sonraki değerlerde sıvı, ekstraktör elektrodunu ıslatmaya başlamıştır, bu yüzden ölçüm bu voltaj değerinde sona erdirilmiştir.

7. TARTIŞMA

Bu çalışmada, elektrosprey enjeksiyonu gerçekleştirmek için, ekstraktörlü ve ekstraktörsüz olmak üzere iki farklı deney düzeneği tasarlanıp kurulmuş ve elektrosprey karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Dielektrik sıvı olarak metanol ve etanol kullanılmış, kılcal boru olarak da, borosilikat cam kapiler tüp ve insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. Elektrosprey akıımı, direnç üzerinden voltmetre yardımı ile ve seri bağlı ampermetre yardımı ile olmak üzere iki türlü ölçülmüştür. Enjeksiyon anının fotoğrafları, önünde 10x büyütme oranına sahip mikroskop bulunan CCD Kamera ile çekilmiştir. Ekstraktöre uygulanan gerilim, reosta üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular ve fotoğraflar sistemin doğru olarak çalıştığının bir göstergesi olmuştur. Bulunan veriler literatür ile karşılaştırılmış ve verilerin literatürdekiler ile aynı mertebede olduğu görülmüştür. Özellikle şırınga pompa çalışmadan elde edilen Taylor Konisi fotoğrafı ve şırınga pompa çalışırken yüksek voltajlarda oluşan multijet modu fotoğrafı literatürde yer alan fotoğrafların neredeyse aynısıdır.

Borosilikat cam kapilerin ucu düzgün olarak kesilemediği için, elektrosprey enjeksiyonuna uygun olmadığı görülmüştür. Emitörün ucunun oldukça düzgün kesilmiş olup, pürüzsüz olması gerekmektedir. Aksi takdir de, emitörün ucunda istenmeyen akışlar gerçekleşmektedir. Bu yüzden metal insülin iğnesi ucu, düzgün kesilip zımparalanabildiği için elektrosprey enjeksiyonu için daha uygundur.

Özel elektrosprey modları hariç, bir çok elektrosprey modu gözlemlenebilmiştir. Enjeksiyon gerçekleşmeden önce gözlemlenebilen “Damlama Modu”, damlama modu esnasında voltaj biraz arttırılınca elde edilen “Mikro-damlama Modu”, konik jet modundan hemen önce gözlemlenebilen “Vurgulu Konik Jet Modu”, karakterizasyonu gerçekleştirmek için ulaşılmak istenen “Konik Jet Modu” ve oldukça yüksek voltaj uygulanınca elde edilen “Multi-jet Modu”, bu deney düzeneği ile gözlemlenebilen elektrosprey modları olmuştur. Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneylerde gözlemlenebilen en önemli bulgu, emitör ucunun toprak elektroduna yaklaşması ile

elektrosprey akımının ve debisinin arttığıdır. Ayrıca başlangıç voltajı bu mesafenin azalması ile azalmıştır. Sisteme uygulanan voltajın artması ile elektrosprey akımının arttığı gözlemlenmiştir.

Ekstraktöre uygulanan gerilim, içerisinde 10 adet eş değerde direnç bulunan, reosta sistemi sayesinde uygulanmıştır. Bu yüzden, tek bir güç kaynağı kullanılan sistemde, ekstraktör voltajı sıvı voltajı ile belirli bir oran dahilinde olmuştur. Her oran için, sıvı voltajının 0'dan 6 kV'a kadar olan değerlerine karşılık gelen akım değerleri ölçülmüştür. 1 mΩ'luk dirençler, bu deney düzeneğinde 6 kV voltaj değerine kadar dayanmıştır. Daha yüksek voltaj değerlerinde ölçüm alabilmek için, daha yüksek değerli dirençlerin kullanılması gerekebilir. Ekstraktör elektrodu kullanılarak yapılan deneylerde, başlangıç ve bitiş voltajları ölçülmüştür. Bitiş voltajı değeri, sıvının ekstraktör ile temas etmeye başlamasından bir önceki voltaj değeridir. Başlangıç ve bitiş voltajı, sadece 3 mm ve 3,8 mm ekstraktör delik çapları için ölçülmüşken, 5,2 mm ekstraktör çapı için bitiş voltajı ölçülememiştir, çünkü bu sistemde uygulanabilen hiç bir voltaj değerinde sıvı ile ekstraktör teması söz konusu olmamıştır. Ekstraktör/Sıvı gerilim oranı arttıkça, başlangıç ve bitiş voltajının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca elektrospreyin çalışma aralığı, bu oranın artması ile yükselmiştir. Emitörün ekstraktör elektroduna yaklaşması bu değerlerin artmasına yol açmıştır. Ekstraktör delik çapındaki artış, başlangıç voltajında çok fazla bir değişiklik yaratmazken, bitiş voltajının yükselmesine yol açmıştır.

Bu sonuçlar, elektrosprey sistemi tasarımı için büyük önem taşımaktadır. Tek bir emitörden elde edilen değerlerin, pratik hayattaki gereksinimler için oldukça düşük olduğu göze alındığında, çoklu elektrosprey sistemlerinin kullanılması gerektiği oldukça açıktır. Bu tarz sistemlerin olmazsa olmaz parçası olan ekstraktör elektrodunu tasarlarken, bu çalışmada yer alan bulgular oldukça yararlı olmaktadır.

Çoklu elektrosprey sistemlerinde emitörler, belli kriterler ışığında yerleştirileceğinden, karşısına eşmerkezli yerleştirilecek olan ekstraktör elektrodu, özellikle bitiş voltajı değerleri göz önüne alınarak tasarlanabilir. Ayrıca ekstraktör üzerinde yer alan deliklerin birbirleri içine geçmemesi için çıkılabilecek delik çapı değeri bir diğer kısıtlama olarak sayılabilir. Kullanım alanına bağlı olarak tüm sistemin boyutu düşünüldüğünde, ekstraktör elektrodu ile emtör ucu arası mesafe bir başka kısıtlama

olarak yer alır. Ekstraktör elektrodunun delik çapını etkileyen bir başka unsur ise emitörün delik çapıdır. Tüm bu kısıtlamalar göz önüne alındığında, bu tezde elde edilen veriler kullanılabilir. Örneğin; insülin iğnesi çapı kadar lüleler barındıran nozül elektrodunun önüne yerleştirilecek olan ekstraktör elektrodunun, tasarım gereği yerleştirilmesi gereken mesafe 2 mm uzaklıkta ise ekstraktör çapını belirlemek için Şekil 6.14, Şekil 6.16 ve Şekil 6.18'den yararlanılabilir.

Sıvı voltajının artması ile parçacık boyutunun azalması ve buna bağlı olarak yanmanın daha verimli olduğu göz önüne alındığında, yüksek voltajlara çıkılabilen tasarımların daha uygun olduğu düşünülmektedir. Elektrospreyin başlaması için ekstraktöre uygulanması gereken voltaj değeri, emitör/sıvı voltajı oranı arttıkça artmaktadır. Bu yüzden, yüksek emitör/sıvı voltajı oranlarında, sıvıya da uygulanacak voltaj değeri artacağından, bu tarz sistemlerin bu ihtiyacı karşılar nitelikte olduğu âşikardır. Ayrıca tasarım kriterleri göz önüne alınarak, ekstraktör elektrodu delik çapının olabildiğinde büyük olması, hem başlangıç voltajı değerini yükseltip tanecik boyutunu düşüreceğinden, hem de bitiş voltajının oldukça yüksek olacağından, verimli yanmanın gerektiği çalışmalarda önemli bir rol oynayacağının göstergesidir.

KAYNAKLAR

[1] **Krpoun, R.**, 2009. Micromachined Electrospray Thrusters for Spacecraft Propulsion, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Doktora Tezi.

[2] **Bocagnera, R.**, **Galan, D.** *ve diğerleri*, 2005. Multiple Electrosprays Emitted from an Array of Holes, *Journal of Aerosol Science*, **36**, 1387–1399.

[3] **Waits, C.**, **Jankowski, N. ve Geil, B.**, 2006. Scalable Electrospray Components for Portable Power Applications Using MEMS Fabrication Techniques,, MEMS 2008, Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on, U.S. Army Research Laboratory, Adelphi, MD,, s.76–79.

[4] **Deng, W.**, **Klemic, J.F.** *ve diğerleri*, 2006. Increase of Electrospray Throughput Using Multiplexed Microfabricated Sources for The Scalable Generation of Monodisperse Droplets, *Journal of Aerosol Science*, **37**, 696–714.

[5] **Deng, W.**, **Klemic, J.F.** *ve diğerleri*, 2007. Liquid Fuel Microcombustor Using Microfabricated Multiplexed Electrospray Sources, *Proceedings of the Combustion Institute*, **31**, 2239–2246.

[6] **Zeleny, J.**, 1914. The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring The Electric Intensity at Their Surfaces, *Physical Review*.

[7] **Zeleny, J.**, 1917. Instability of Electrified Liquid Surfaces, *Physical Review*.

[8] **Macky, W.**, 1931. Some Investigations on the Deformation and Breaking of Water Drops in Strong Electric Fields, cilt133.

[9] **Taylor, G.**, 1964. Disintegration of Water Drops in an Electric Field, Mathematical and Physical Sciences, Series A, Royal Society of London, s.383–397.

[10] **Dole, M.**, 1968. Molecular Beams of Macroions, *J. Chem. Phys.*, **49**, 2240–2247.

[11] **la Mora, F.D.**, 1994. The Current Emitted by Highly Conducting Taylor Cones, *J. Fluid Mechs.*, **260**, 155–184.

[12] **Ganan-Calvo, A.M.**, **Davilla, J. ve Barrero, A.**, 1997. Current and Droplet Size in the Electrospraying of Liquids. Scaling Laws, *J. Aerosol Sci.*, **28**, 249–275.

[13] **Jaworek, A. ve Krupa, A.**, 1998. Main Modes of Electrohyrodynamic Spraying of Liquids, Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France.

[14] **Tang, K.**, **Lin, Y.** *ve diğerleri*, 2001. Generation of Multiple Electrosprays Using Microfabricated Emitter Arrays for Improved Mass Spectrometric Sensitivity, *Analytical Chemistry*, **73**, 1658–1663.

[15] **Regele, J., D.**, **Papac, M., J.** *ve diğerleri*, 2001. Effects of Capillary Spacing on EHD Spraying from an Array of Cone Jets, *J. Aerosol Sci.*, **33**, 1471–1479.

[16] **Marginean, I.**, **Parvin, L.** *ve diğerleri*, 2004. Flexing the Electrified Meniscus: The Birth of a Jet in Electrosprays, *Anal. Chem.*, **76**, 4202–4207.

[17] **Duby, M.H.**, **Deng, W.** *ve diğerleri*, 2006. Stabilization of Monodisperse Electrosprays in the Multi-Jet Mode via Electric Field Enhancement, *Analytical Chemistry*, **37**, 306–322.

[18] **Alexander, M.S.**, **Paine, M.D. ve Stark, J.P.W.**, 2006. Pulsation Modes and the Effect of Applied Voltage on Current and Flow Rate in Nanoelectrospray, *Anal, Chem.*, **78**, 2658–2664.

[19] **Smith, K.L.**, **Alexander, M.S. ve Stark, J.P.W.**, 2006. Voltage Effects on the Volumetric Flow Rate in Cone-Jet Mode Electrospraying, *Journal of Applied Physics.*, **99**.

[20] **Velasquez-Garcia, L.F.**, **Akinwade, A.I.** *ve diğerleri*, 2006. A Micro-Fabricated Linear Array of Electrospray Emitters for Thruster Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **15**, 1260–1271.

[21] **Castro, S.**, **de la Mora, F.** *ve diğerleri*, 2007. Effect of Liquid Properties on Electrosprays from Externally Wetted Ionic Liquid Ion Sources, *Journal of Applied Physics*, **102**.

[22] **Deng, W. ve Gomez, A.**, 2007. Influence of Space Charge on the Scale-up of Multiplexed Electrosprays, *Journal of Aerosol Science*, **38**, 1062–1078.

[23] **Si, B.Q.T.**, **Byun, D. ve Lee, S.**, 2007. Experimental and Theoretical Study of a Cone-jet for an Electrospray Microthruster Considering the Interference Effect in an Array of Nozzles, *Journal of Aerosol Science*, **38**, 924–934.

[24] **Wang, L.**, **Stevens, R.**, **Malik, A.** *ve diğerleri*, 2007. High-aspect-ratio Silica Nozzle Fabrication for Nano-emitter Electrospray Applications, *Microelectronic Engineering*, **84**, 1190–1193.

[25] **B., Gassend, L.**, **Valesquez-Garcia, F.** *ve diğerleri*, 2008. Fabrication of a Fully Integrated Electrospray Array with Applications to Space Propulsion, MEMS 2008, Tucson, AZ, USA.

[26] **Krpoun, R.**, **Raber, M. ve Shea, H.R.**, 2008. Microfabrication and Test of an Integrated Colloid Thruster, MEMS 2008, Tucson, AZ, USA.

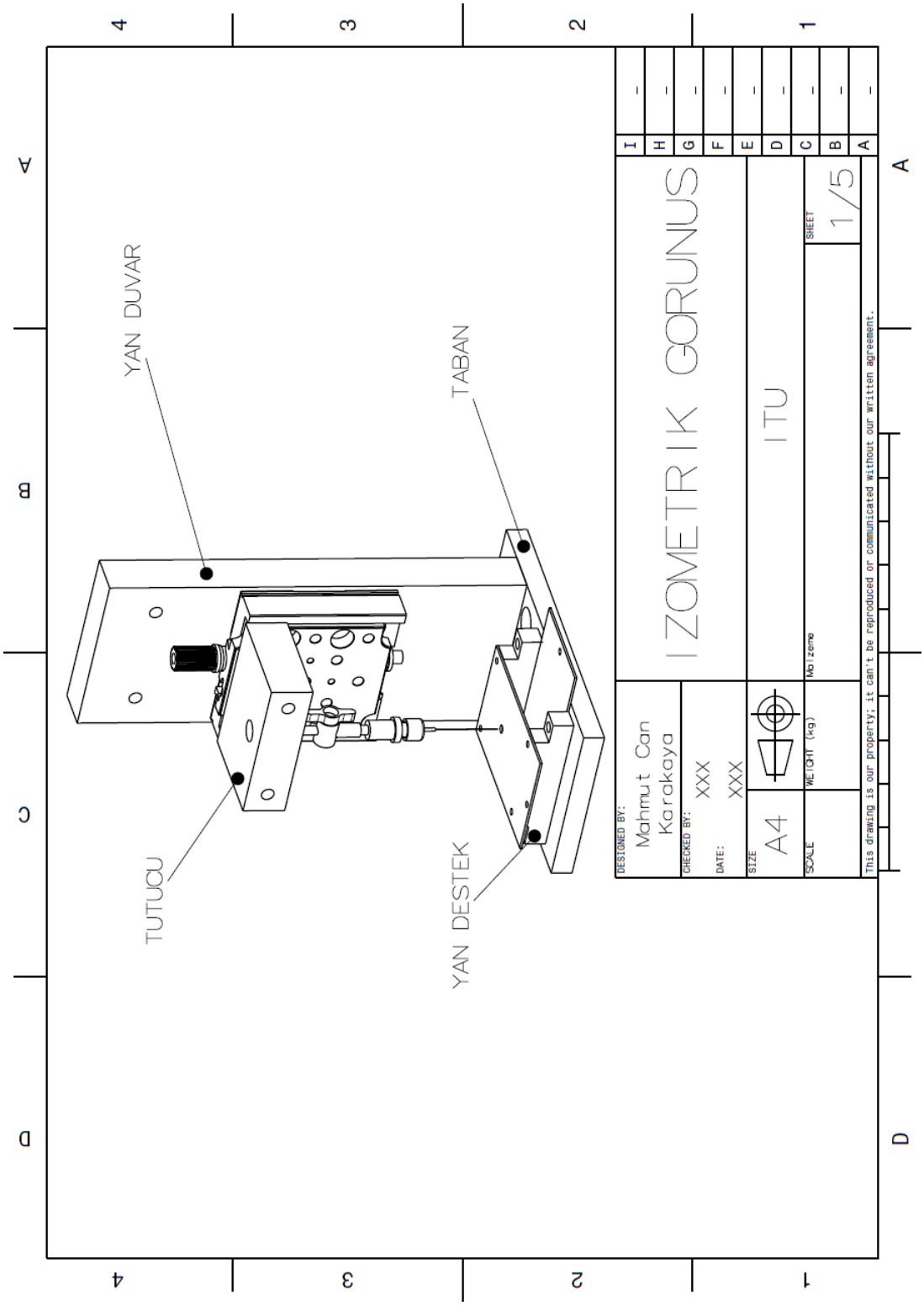
[27] **Deng, W. ve Waits, C.M.**, 2009. Compact Multiplexing of Monodisperse Electrosprays, *Aerosol Science*, **40**, 907–918.

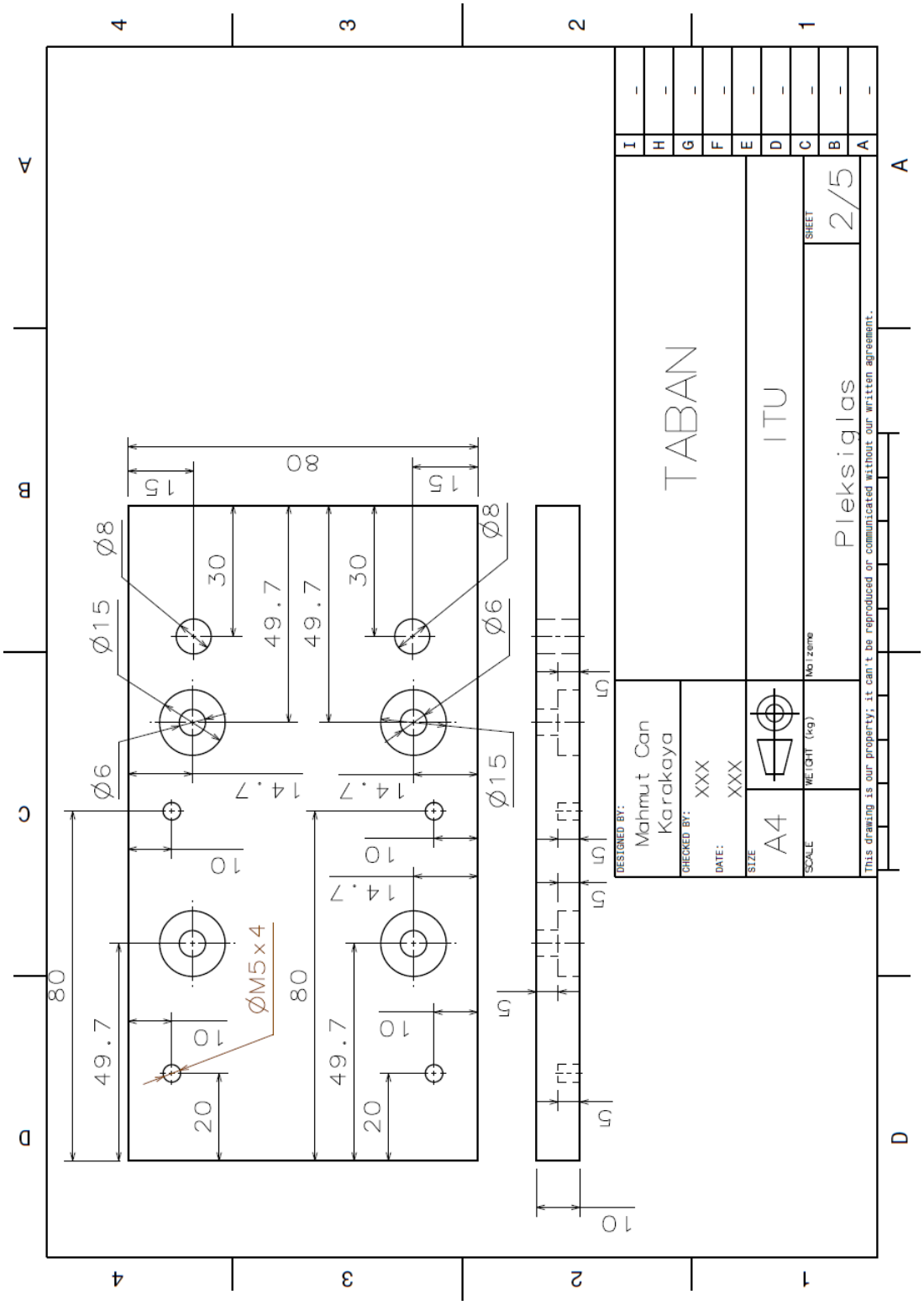
[28] **Jaworek, A. ve Krupa, A.**, 1999. Jet and Drops Formation in Electrohydrodynamic Spraying of Liquids. A Systematic Approach, *Experiments in Fluids*, **27**, 43–52.

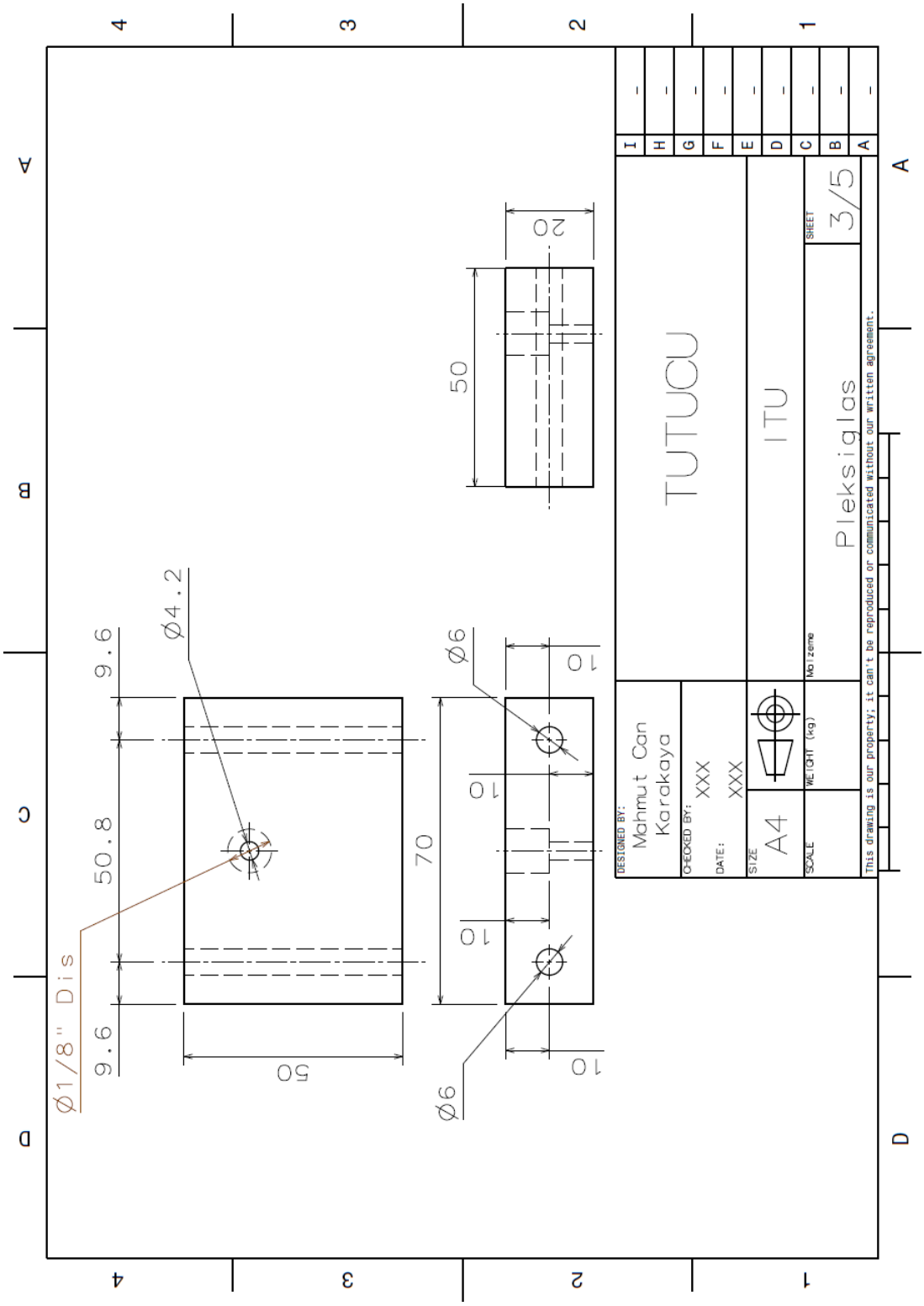
[29] **Juraschek, R. ve Röllgen, F.**, 1998. Pulsation Phenomena During Electrospray Ionization, *International Journal of Mass Spectrometry*, **177**, 1–15.

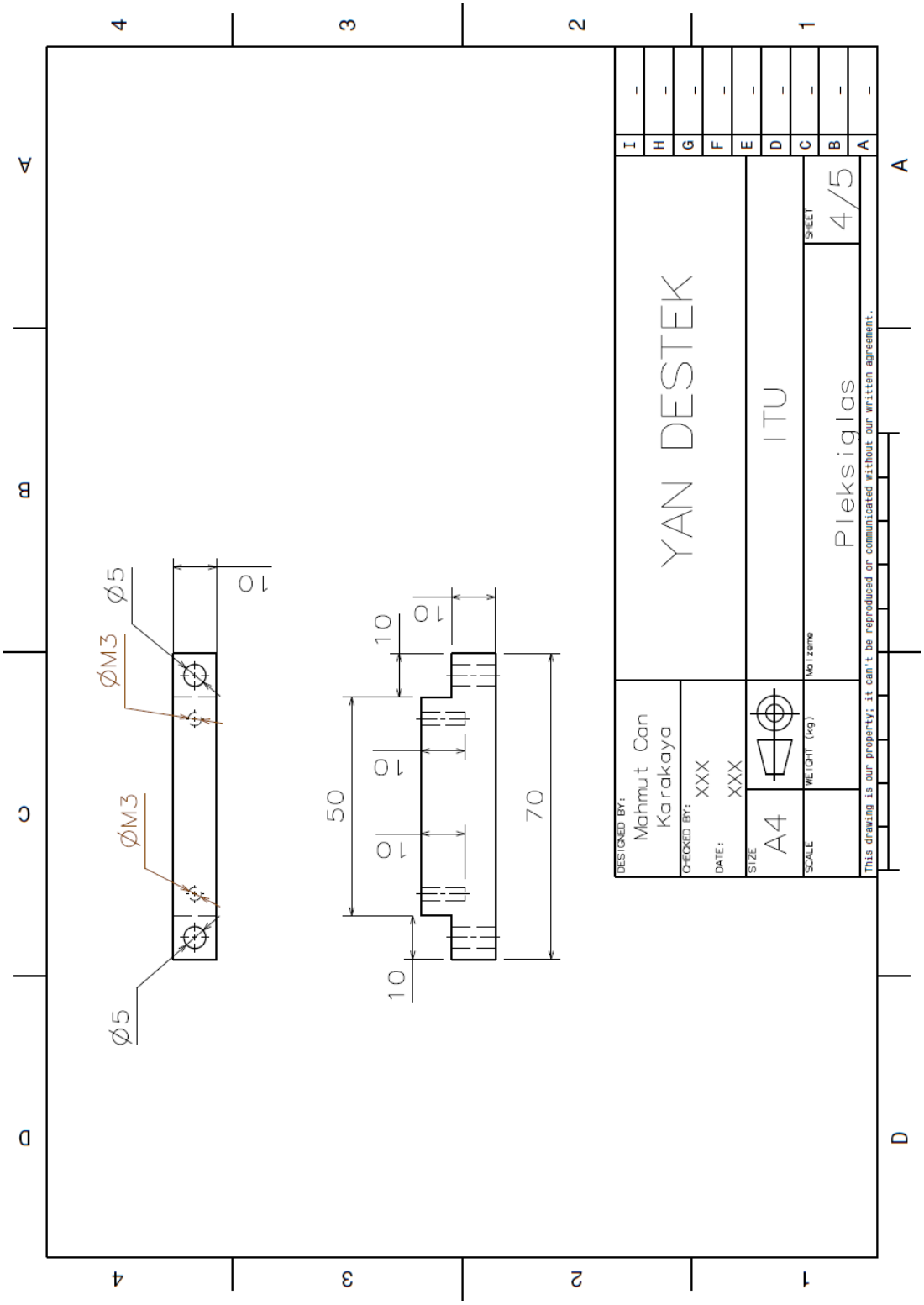
[30] **Martinez-Sanchez, M.**, 2006. Space Propulsion Lecture Notes, Massachusets Institute of Technology.

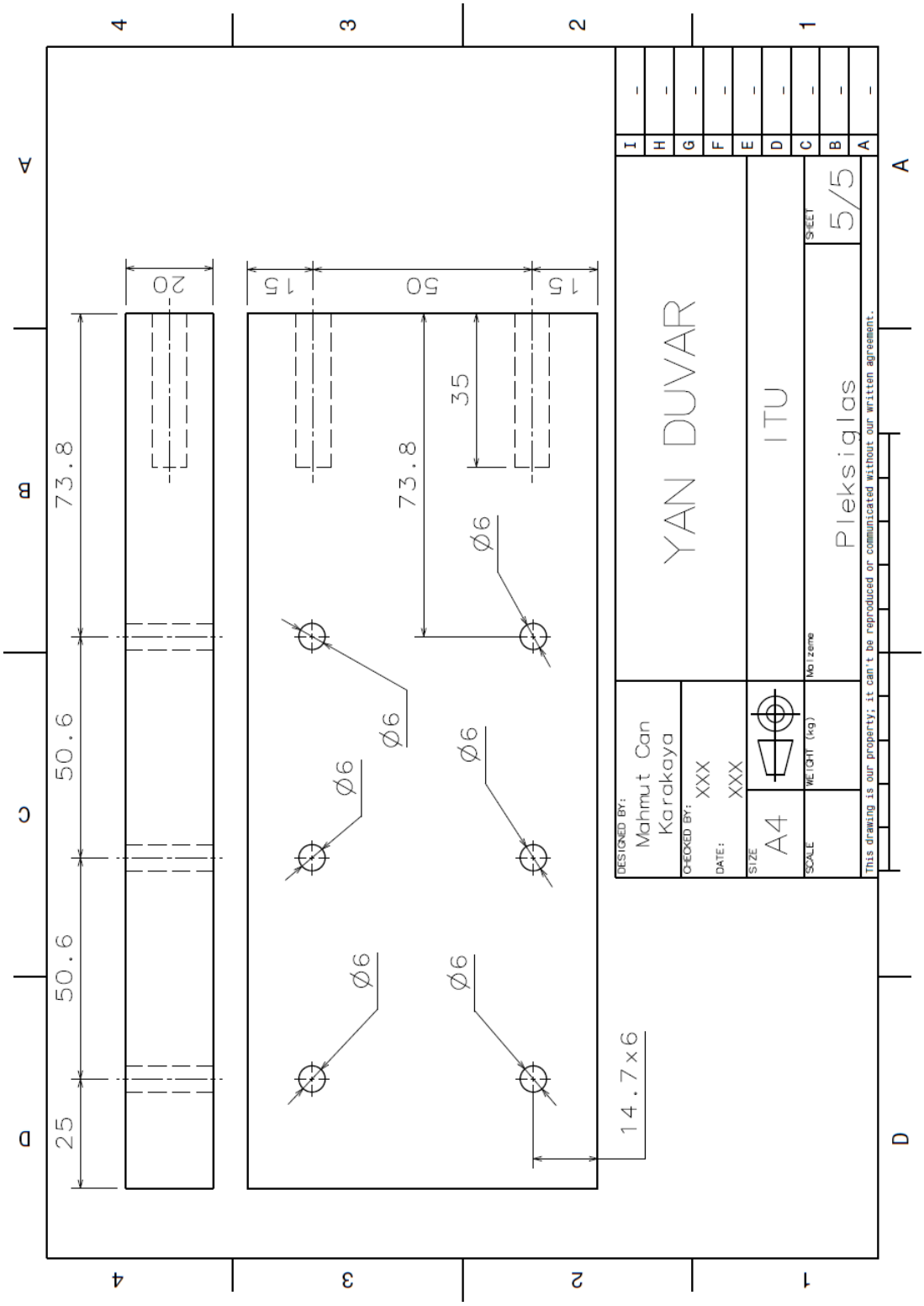
EKLER


YAN DUVAR
TABAN
TUTUCU
YAN DESTEK
DESIGNED BY:
Mahmut Can Karakaya
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX
SIZE
A4
SCALE
WEIGHT (kg)
Malzeme
SHEET
1/5
I ZOMETRIK GORUNUS
ITU
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


TABAN
ITU
Pleksiglas
2/5
SHEET
Malzeme
WEIGHT (kg)
SCALE
A4
SIZE
DATE:
XXX
XXX
CHECKED BY:
DESIGNED BY:
Mahmut Can
Karakaya
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.
80
15
15
Ø8
Ø8
Ø15
Ø6
Ø6
Ø15
30
30
49.7
49.7
14.7
14.7
10
10
14.7
ØM5x4
80
80
49.7
49.7
10
10
20
20
5
10


Ø1/8" Dis
Ø4.2
9.6
50.8
9.6
50
Ø6
Ø6
70
10
10
10
10
50
20
DESIGNED BY:
Mahmut Can Karakaya
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX
SIZE
A4
SCALE
WEIGHT (kg)
Malzeme
TUTUCU
ITU
Pleksiglas
SHEET
3/5
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


Ø5
ØM3
ØM3
Ø5
10
10
10
10
10
50
70
DESIGNED BY:
Mahmut Can Karakaya
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX
SIZE
A4
SCALE
WEIGHT (kg)
Malzeme
YAN DESTEK
ITU
Pleksiglas
SHEET
4/5
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.


20
15
50
15
73.8
35
73.8
Ø6
Ø6
Ø6
Ø6
Ø6
Ø6
50.6
50.6
25
14.7x6
YAN DUVAR
ITU
Pleksiglas
DESIGNED BY:
Mahmut Can Karakaya
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX
SIZE
A4
SCALE
WEIGHT (kg)
Malzeme
SHEET
5/5
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Mahmut Can KARAKAYA

Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL

Adres: A. Nafız Gürman Mah. Lale Bahçe Sok. No:31/16 Merter/İstanbul

E-Posta: mahmutcank@gmail.com - karakayama@itu.edu.tr

Bölüm: Uzay Mühendisliği

Yayınlar ve Patentler Listesi:
YAYINLAR

- **Karakaya, M. C.** ve diğerleri, 2012, "Bir Elektrosprey Enjeksiyon Sisteminin Karakterizasyonu", İTÜ Dergisi
- **Karakaya, M. C.** ve diğerleri, 2012, Ekstraktör Elektrodunun Elektrosprey Davranışına Etkisi, 4. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Makale No: UHUK-2012-1105, İstanbul, Türkiye
- **Karakaya, M. C.**, Abdullahoglu, M. R. ve diğerleri 2011: Demonstration of an Electrospray Injection System, International Science and Technology Conference, page, 181-186
- Tunçer, O., Kaynaroğlu, B., **Karakaya, M. C.** ve diğerleri, 2012, Preliminary Investigation of a Swirl Stabilized Premixed Combustor", International Combustion Symposium, ICS 2012, Kocaeli, Türkiye
- Abdullahoğlu, M. Ragıp, **Karakaya, M. C.** ve diğerleri, 2011, Derin Reaktif İyon Aşındırma Değişkenlerinin Silisyum ve SU8'in Aşındırma Hızları Üzerindeki Etkileri, Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt 52, Sayı: 622, Sayfa:40-46
- Abdullahoğlu, M.R., **Karakaya, M. C.** ve diğerleri, 2010, DRIE ile Çoklu Düzlemsel Elektrosprey Sisteminin Üretimi ve Karakterizasyonu, 1. Ulusal MEMS ve Mikrosistem Teknolojileri Çalıştayı, Ankara, Poster Sunumu