

Fakoemülsifikasyon Cihazı, Çalışma Prensipleri ve Parametreler

Phacoemulsification Machine, Working Principles, and Parameters

Kemal TEKİN¹, Mehmet ÇITIRIK², Murat UZEL¹, Çağrı İLHAN¹

ÖZ

Katarakt, tedavi edilebilir körlüğün en önemli nedenlerinden biridir. Günümüzde henüz katarakt gelişimini engelleyecek ve lenste oluşan kesafeti ortadan kaldıracak tıbbi tedavi yöntemi mevcut değildir. Opaklaşmış lensin çıkarılması amacıyla tarihsel süreçte farklı yaklaşımlar denenmiş olsa da günümüzde katarakt ekstraksiyonunda standart yöntem fakoemülsifikasyondur. İlk kez 1967’de Dr. Charles D. Kelman tarafından ultrasonografik fakoemülsifikasyon cerrahisi yönteminin tanımlanmasından sonra fakoemülsifikasyon yöntemlerinde ve cihazlarında geliştirilme sürecine girilmiştir. Bu yazıda fakoemülsifikasyon cihazı ana üniteleri ve çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

Anahtar Kelimeler: Fakoemülsifikasyon, fakoemülsifikasyon cihazı, fakoemülsifikasyon cihazının çalışma prensipleri.

ABSTRACT

Cataract is the one of the major causes of treatable blindness. Nowadays, there is no medical treatment method to prevent the development of cataracts and eliminate the opacification in the lens. In the historical process, different approaches for removing the opacified lens have been tried. The standard method of cataract extraction today is phacoemulsification. For the first time in 1967, Dr. Charles D. Kelman defined ultrasound phacoemulsification surgery method. Then, phacoemulsification methods and machines entered in a process of development. This article mentions about main units and working principles of phacoemulsification machine.

Key Words: Phacoemulsification, phacoemulsification machine, working principles of phacoemulsification machine.

- 1- M.D. Asistant, Ulucanlar Eye Training and Research Hospital, Ankara/TURKEY
TEKİN K., ktekinc@hotmail.com
UZEL M., muzel@yahoo.com
İLHAM C., cilhan@gmail.com
- 2- M.D. Associate Professor, Ulucanlar Eye Training and Research Hospital, Ankara/TURKEY
CITIRIK M., mcitirik@hotmail.com

Geliş Tarihi - Received: 12.10.2015
Kabul Tarihi - Accepted: 27.11.2015
Glo-Kat 2016;11:73-84

Yazışma Adresi / Correspondence Address:
M.D. Associate Professor, Mehmet CITIRIK
Ulucanlar Eye Training and Research Hospital, Ankara/TURKEY

Phone: +90 312 362 32 22
E-mail: mcitirik@hotmail.com

GİRİŞ

Katarakt cerrahisi için uygulanan farklı cerrahi yaklaşımlar tarihin çok eski dönemlerine uzanmaktadır. Hindistan'da mil çekme anlamına gelen "Couching" ameliyatı bu alanda ilk tanımlanan operasyondur.¹ Ancak modern katarakt cerrahisi 1748'te Fransa'dan Jacques Daviel'in 1748'de limbus alt yarısından girerek kataraktlı lensin iris arkasındaki anatomik yerleşiminden glob dışına ekstraksiyonu yöntemi tekniği ile başlamıştır.² Bu teknikte hastalar afak bırakılmıştır. 1753'te Londra'dan Samuel Sharp, intrakapsüler katarakt cerrahisi (İKKE) yöntemini ilk olarak belirleyen cerrah olmuştur.³ Samuel Sharp, kataraktlı lensin glob dışına alınması esnasında gereken basıncı başparmağı yardımıyla uygulamıştır. Bu yöntemde, yaklaşık 180 derecelik bir insizyon ile lens ve kapsülü bir bütün olarak uzaklaştırılmakta ve hastalar afak bırakılmaktaydı. Bu cerrahide vitreus kaybı, hemoraji, retina dekolmanı ve kronik kistoid maküla ödemi gibi komplikasyonlar sık olarak görülüyordu ve hastalar daha uzun zamanda iyileşiyordu. İntrakapsüler cerrahide önemli bir gelişme, krioekstraksiyona geçme ile olmuştur. Polonya'dan Krwawicz, nikel plakalı ve bakır uçlu bir aplikatör dizayn edip kullanmış ve buna krioekstraktör adını vermiştir.⁴ Yirminci yüzyılın ilk yarısına kadar intrakapsüler cerrahi popülerliğine devam ederken, 1949 yılında Dr. Harold Ridley daha küçük bir kesiden kapsül bütünlüğünü koruyarak ekstrakapsüler katarakt ekstraksiyonu (EKKE) yöntemini tariflemiştir.⁵ Bu yöntemde göz içi lens (GİL) implantasyonu mümkün olabilmekte ve arka kapsül korunduğu için vitreus kaybı, retina dekolmanı ve kistoid maküla ödemi gibi komplikasyonlar daha az görülmekteydi.⁶ Ancak ameliyat sırasında kortikal materyalin temizlenmesindeki zorluk ve kalan kortikal materyalin neden olduğu postoperatif inflamasyon, göz içi basınç artışı ve yoğun arka kapsül opasitesi nedeniyle 1950 yıllarında tekrar intrakapsüler cerrahiye geri dönmüştür. 1970'lerde ise irrigasyon-aspirasyon (İ/A) yöntemlerinin gelişmesi ve gelişen kapsülotomi teknikleriyle tekrar EKKE tekniği popüler olmuştur.

Modern EKKE dönemi yeni yeni başlarken, Kelman 1967'de kataraktlı lensi küçük insizyondan almak amacıyla fakoemülsifikasyonu yöntemini geliştirmiştir. O dönemde dış doktorlarının dışteki lekeleri uzaklaştırmak için kullandığı ultrasonik enerji ile çalışan aletten esinlenilmiş ve ultrason enerjisi ile lens parçalarını göz içinden uzaklaştırmak denenmiştir. Tekniğin icadından sonra pratiğe geçmesi için deneyler yapılmış ve bugünkü modern fakoemülsifikasyon cihazının atası olan sistem ancak 1971 yılında patentini almıştır.^{7,8} Kelman'ın cihazı, ucunda bir titanyum tip bulunan elcikle bağlantılı boylamsal ultrasonik titreşim sağlayan elektromanyetik jeneratörden oluşmaktaydı.

Ultrasonik fakoemülsifikasyonda piezoelektrik kristaller ile elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilmekte ve fako ucunun vibrasyonları ile lens parçalanmakta, aspirasyon sağlayan vakum pompa sayesinde parçalar göz içinden uzaklaştırılmaktaydı.⁹ O dönemde Kelman'ın cihazı termal yanık ve ciddi endotel hasarı başta olmak üzere yaşanan komplikasyonlar nedeniyle bazı meslektaşları tarafından şüpheyle ve karşıt eleştirilerle karşılanmış ve kabul görmemiştir.¹⁰ Zaman içinde kontinü kürvilineer kapsüloreksisin (KKK) uygulanmaya başlanmış, GİL implantasyonu esnasında manevra kolaylıkları sağlayan ve kornea endotel hücrelerini intraoperatif travmalardan koruyan viskoelastik maddeler geliştirilmiş ve bu sayede fakoemülsifikasyon yönteminde karşılaşılan komplikasyonlar azaltılabilmiş, teknik kabul görmüş ve geniş bir hekim grubu tarafından kullanılır hale gelmiştir. Özellikle 1980 yıllarından sonra teknolojinin ve fakoemülsifikasyon yöntemlerinin birlikte gelişim süreci devam etmiş ve günümüzde kullanılan tekniklere yakın teknikler geliştirilmiştir.

Modern pompa sistemlerinin fakoemülsifikasyonun farklı aşamalarındaki sıvı dinamiğinde oluşturduğu olumlu etkiler ve daha etkin nükleus parçalanması ve aspirasyonuna izin veren gelişmeler ile yüksek ultrason enerjisi kullanımını gerektiren teknikler yerine, daha düşük ultrason enerjisi ve daha yüksek vakum teknikleri tercih edilmeye başlanmış, emülsifikasyon için kullanılan enerjinin verimliliği artırılarak daha düşük enerjilerle daha güvenli ve etkin cerrahinin gerçekleştirilmesine olanak sağlanmıştır.¹¹ Böylelikle fakoemülsifikasyon cerrahisinde gelişmelerin ana hedeflerinden biri olan nükleusun parçalanması için minimal enerji temeli gerçekleştirilebilmiştir. Gelişmelerdeki diğer bir hedef olan kesi yerine bağlı komplikasyonları önlemek için daha küçük kesilerden cerrahinin geliştirilmesine olanak veren fako uçları ve elcikleri ile mikroinsizyonel katarakt cerrahisi teknikleri geliştirilmiştir.¹² Fakoemülsifikasyon cerrahisindeki gelişmelerin diğer bir önemli hedefi olan cerrahi sırasında ön kamarada basınç değişikliklerine bağlı oluşabilen komplikasyonları önlemek için sızdırmazlık sağlayan tünel insizyon teknikleri tanımlanmıştır. Ayrıca arka kapsülün aniden fako ucuna gelmesine neden olan ön kamaranın ani çökmesi (surge) gibi komplikasyonları en aza indiren, venting ve reflü mekanizması sağlayan cihazlarla topikal anestezi altında güvenli cerrahiler gerçekleştirilebilmeye başlanmıştır.¹³

Fakoemülsifikasyon dünya genelinde en sık gerçekleştirilen oftalmolojik prosedürlerinden biri olsa da ameliyat esnasında komplikasyonlara neden olabilen özellikli bir ameliyat olarak kabul edilmektedir. Teknolojideki gelişmelerle ameliyat esnasında komplikasyon oranını azaltan, güvenliliği artıran ve daha hızlı cerrahi gerçekleştirilmesine imkân veren yeni modern fakoemülsifikasyon cihazları geliştirilmiştir.¹⁴

Temelde fakoemülsifikasyon cihazından beklenen; mümkün olan en az ultrason enerjisi ile farklı sertliklerdeki nükleusun küçük parçalar halinde aspire edilmesine olanak tanıyan bir sistem oluşturmaları, cerrahi sırasında oklüzyon sonrasında ani vakum artışının neden olabileceği ön kamara dalgalanmasının (surge) azaltılması, termal hasarın minime indirgenmesi ve daha emniyetli ve efektif bir cerrahi gerçekleştirilmesine olanak sağlamasıdır. Bu basit görünen ancak oldukça komplike sistemin anlaşılabilmesi için öncelikle fakoemülsifikasyon cihazının ünitelerinin, fonksiyonlarının ve sıvı dinamiklerinin anlaşılması gerekir.

A. FAKOEMÜLSİFİKASYON CİHAZI ÜNİTELERİ

Standart bir fakoemülsifikasyon cihazı ana gövde, kaset sistemi (tubing sistem), bağlantı sistemi, fakoemülsifikasyon elciği, irrigasyon- aspirasyon elciği, ön vitrektomi probu ve ayak pedali bölümlerinden oluşmaktadır.

1. Ana Gövde ve Kontrol Paneli: Cihazın ana ünitesidir, çalışma şeklini belirler ve fonksiyonların kontrolünü sağlar.¹⁵ Ultrasonik gücün oluşumu için gerekli manyetik alan ya da elektrik alanının (piezoelektrik sistem) oluşturulması, fako gücünün, irrigasyon, akım hızı ve aspirasyon pompasının kontrolü ana ünite- den gerçekleştirilir.¹⁵ Genellikle bipolar diatermi ve ön vitrektomi için de bir sistem içermektedir. Fakoe- mülsifikasyon için cerrahın istediği değerler buradan değiştirilir. Ana gövdenin hafıza ünitesinde cerrahın tercih ettiği fako, irrigasyon-aspirasyon, vitrektomi ve diatermi ile ilgili tüm parametreler kaydedilerek saklanabilmektedir.¹⁶ Bir fonksiyondan diğerine hızlı ve kolay geçiş birçok cihazda olduğu gibi genellikle ayak pedali kullanılarak mümkün olmaktadır. Sistemde kullanılan çoğunlukla dokunmatik olan panel ile istenen çalışma değerlerinin girilebilmesi, devamlı sıvı akışının kontrol edilebilmesi, nükleus tipine uygun fako modunun seçilebilmesi ve anlık bilgilerin görülebilmesi mümkün olmaktadır. Yeni cihazlarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte; en az ultrason enerjisiyle, surge oluşmasını engelleyecek artırılmış vakum düzeyi ve değişken akım özellikleri gibi parametreleri sofistike bir şekilde koordine eden, kapalı bir ortamda daha hızlı ve daha güvenli cerrahi prosedür sağlayan fakoemülsifikasyon cihazları geliştirilmiştir.

2. Kaset Sistemi (Tubing Sistem) ve Pompa: Pompa, fakoemülsifikasyon cihazının en önemli ve komplike parçasıdır. Temelde pompa akım tabanlı ve vakum tabanlı olmak üzere iki tiptir.¹⁷ Vakum tabanlı pompa cihaz daha güçlü çalıştığında daha fazla vakum üretirken (mmHg); akım tabanlı pompa daha fazla akım (ml/dk) üretir.¹⁷ Günümüzde gelişmiş fakoemülsifikasyon cihazları her iki pompanın birlikte sunulduğu tubing sistemlerini içerebilmektedir.¹⁸

Akım pompaları grubunda; peristaltik ve helezon pompalar bulunmaktadır.¹⁹ Her iki pompadaki sistemin çalışması için ameliyat sırasında fako ucunun lens materyali ile kapatılması (oklüzyon) gerekir. Aspirasyon yolu tıkanmadığı sürece vakum etkisi oluşmayacaktır. Bu pompada vakum indirekt olarak ayarlanabilir. Akım tipi pompalarda temel belirleyici değişken vakumdan bağımsız olarak belirlenebilen aspirasyon akım hızıdır. Bu pompa sisteminde vakumun oluşması için aspirasyon ucunda kısmen veya tamamen oklüzyon gereklidir. Oklüzyon gerçekleştiğinde vakum daha önceden belirlenen eşik değere kadar yükselir. Fako ucunun tıkanma miktarı arttıkça vakum giderek artar ve tam oklüzyon gerçekleştiğinde önceden belirlenmiş maksimum değere ulaşılır. Kısmen veya tamamen oklüzyon yoksa vakum oluşmaz. Ancak pompa daha güçlü çalıştığında aspirasyon ucunun oluşturduğu dirençle bağlı olarak oklüzyon gerçekleşme bile bir miktar vakum etkisi gözlenir.²⁰

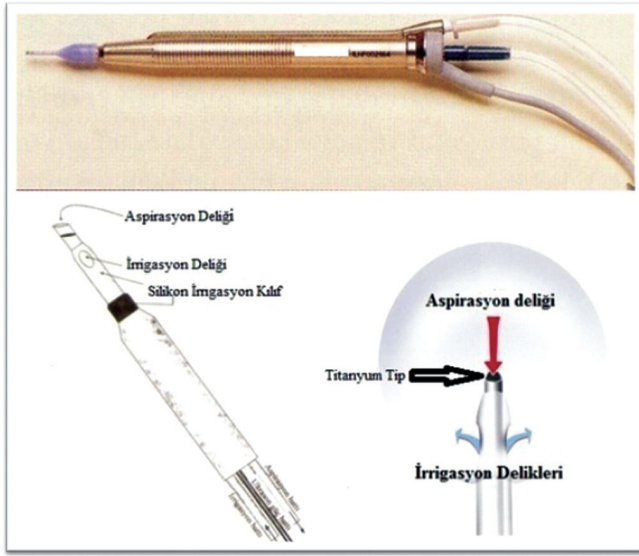
Vakum pompaları vakum tabanlı pompalardır. Bu sistemde; ventüri, diyafram ve döner kanat (rotary vane) pompaları bulunmaktadır.¹⁹ Ventüri pompalarda, aspirasyon kontrolü vakuma bağlıdır. Bu pompalarda vakumun doğrudan kontrolüne izin verilmekte iken aspirasyon akımı indirekt olarak belirlenmektedir. Sistem aspirasyon sıvısının bağlı olduğu esnekliği olmayan rijid bir toplama haznesine vakum yapılması esası ile çalıştığı için vakum arttırıldığı sürece rijid hazne içerisindeki negatif basınç artmaya devam etmektedir. Yani vakum tabanlı pompalarda oklüzyon gerçekleşme bile vakum hızla yükselmekte ve bu durumda uygulanacak fakoemülsifikasyon gücü azaltılsa da ani ön kamara silinmesi (surge), iris ve kapsül aspirasyonu gibi komplikasyonları ortaya çıkabilmektedir.²⁰

Pompalarda yapılan modern değişiklikler ile hem ventüri hem peristaltik pompa özellikleri taşıyan tubing sistemleri ile hibrid pompalar geliştirilmiştir.²¹ Böylece fakoemülsifikasyon sırasında oluk açılması ve nükleusun kırılması aşamalarında daha düşük vakum düzeyleri ve makul akım hızı sağlayan akım tabanlı peristaltik pompa tercih edilebilirken; irrigasyon-aspirasyon ve ön vitrektomi gibi oklüzyon olmaksızın vakum gerektirebilen durumlarda vakum tabanlı venturi pompalar tercih edilebilmektedir.

3. Bağlantı Sistemi: Ana üniteye üretilen elektromanyetik gücün fakoemülsifikasyon elciğine iletilmesi ve böylece fakoemülsifikasyonun gerçekleştirilmesinin sağlanması için gereken bağlantı kablolarını ve irrigasyon-aspirasyon borularını içeren sistemdir.¹⁵

4. Fakoemülsifikasyon Elciği (Handpiece): Fakoemülsifikasyon elciği transdüser içeren fakoemülsifikasyon probu, titanyum uç (tip) ve silikon bir kılıf olmak üzere üç parçadan oluşur. Elciğin gövde kısmında elektrik enerjisini ultrasonik enerjiye dönüştüren, piezoelektrik ya da magnetostriktif sistem vardır.

Güç kaynağı ile irrigasyon ve aspirasyon boruları da gövdeye bağlıdır. Gövdede üretilen ultrason enerjisi elciğin ucundaki iğne (tip) vasıtasıyla nükleusa iletilir. Titanyum iğne ortalama 1 mm çapında, kenarları keskin, sert ve ultrasonik dalgaları iletmeye uygun yapıda üretilmiştir. Aspirasyon iğnenin lümeni içinden gerçekleşmektedir. Silikon kılıf fako iğnesinin üzerine takılmaktadır Elcik içinde ayrıca aspirasyon ve irrigasyon hattı bulunur.²² Aspirasyon hattı elciğin içindeyken, irrigasyon hattı infüzyon şişesi ile ilişkilendirilmiştir ve elciğin dışına monte edilmiş olan çelik hattın dışarı çıkar. Distal kısmına yakın iki adet delik bulunmaktadır. İrrigasyon sıvısı iğne ile kılıf arasından geçmekte ve bu deliklerden göz içine girmektedir (Resim 1). Bu akım aynı zamanda iğnenin titreşimleri ile aşırı ısınmasına da mani olmaktadır.



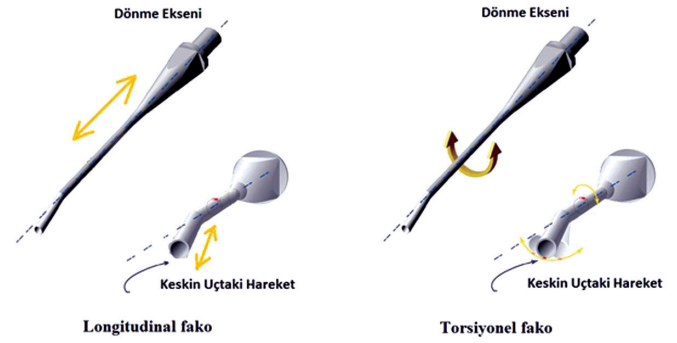
Resim 1: Fakoemülsifikasyon elciği ve şematik resmi birlikte görülmektedir. Standart bir fakoemülsifikasyon elciği prop, titanyum uç (tip) ve silikon bir kılıf olmak üzere üç parçadan oluşur.

4a. Fakoemülsifikasyon Probu: Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren fakoemülsifikasyon probu piezoelektrik kristaller içerir (Resim 1).²³ Elektrik enerjisi ile belli bir hızda titreşen bu özel kristallerin oluşturduğu titreşim ile nükleus kırıcı bir güç oluşturulur. Oluşturulan güç iki değişkene bağlıdır. Bunlar, frekans ve vuruş uzunluğudur.^{24,25} Frekans; birim zamanda fako tipinin oluşturduğu ileri-geri hareket sayısıdır.²⁶ Prob içerisindeki kristaller 20 000 - 80 000 Hz lik bir titreşim oluşturur. Bu titreşim enerjisi probun ucundaki titanyum uca iletilir. Tipin hareketi lensi parçalara ayırır, bu parçalar tipin ortasındaki giriş yerinden aspire edilir. Vuruş uzunluğu ise fako ucunun hareketinin maksimum uzunluğu olarak tanımlanabilir.²⁷

Probta üretilen ultrasonik güç fako iğnesine ulaştırıldığında iğnede 70-120 mikron kadar ileri gitme hareketi oluşmaktadır. İğnenin hareketinin maksimum uzunluğuna "vuruş uzunluğu (stroke length)" denir.

Bu değer cerrahın isteğine göre panelden fakoemülsifikasyon gücü değiştirilerek ayarlanır. Frekans ve vuruş uzunluğu birlikte düşünüldüğünde cerrahi esnasında fakoemülsifikasyon tipi 70-120 mikron yolu saniyede 20 bin-80 bin defa gidip gelmektedir. Bu kadar yüksek hızda gidiş gelişin oluşturduğu darbe etkisi ile önüne gelen materyali parçalayabilmektedir.²⁴⁻²⁸

Modern fakoemülsifikasyon cihazlarında daha az ultrason enerjisi ile nükleusu parçalamak için klasik longitudinal ultrason enerjisine yani ileri geri hareketlere ilaveten ossilatuar komponenti olan elcikler geliştirilmiştir (Resim 2).²⁹ Farklı yönlerde hareket edebilen ve rotasyonel komponent içeren bu teknoloji sayesinde fakoemülsifikasyon ucunun nükleusu direk itmesi sırasında etrafa yayılan parçaların ve açığa çıkan ısının oluşturabileceği komplikasyonlar azaltılmış ve daha hızlı ve etkin cerrahi gerçekleştirilmesine olanak sağlanmıştır.³⁰



Resim 2: Longitudinal ve torsiyonel fakoemülsifikasyonda fako tipinin hareketi.

4b. Fakoemülsifikasyon Ucu (Tip): Elcik distalindeki titanyum parça olup, probtan üretilen enerji ile nükleusu mekanik olarak parçalamaktadır (Resim 1).³¹ Tip titreşim özelliği ile nükleer materyalde kavitasyon yapar; bu titreşim esnasında nükleer materyal itilir. Tipin ortasındaki aspirasyon lümeninde oluşan emici güç de nükleer materyali kendine doğru çeker. Bu şekilde tipin kesme, fragmentasyon ve aspirasyon özellikleri arasında bir denge sağlanarak fakoemülsifikasyon işlemi gerçekleştirilir.³²

Tipin lümen çapına ve uç kısmının eğimine göre çeşitleri vardır. 0-15-30-45 derece açılı uçlara sahip standart fako tipleri bulunmaktadır (Resim 3). Uç açısı küçük olan 0-15 dereceli uçlar oklüzyon ve kavitasyon için yani nükleer materyalin fako ucunda sabitlenmesi için daha uygundur.^{33,34} Uç açısı büyük olan 30-45 dereceli uçlar ise vurucu etki, tıraşlama ve parçalama yani etkin kesici özellikler açısından uygundur.^{33,34} Fakoemülsifikasyonun etkinliğini ve sıvı dinamiğini tip açısı kadar tip çapı da etkilemektedir. Standart 19 gauge (G)'luk tiplerde dış çap 1.1 mm; iç çap ise 0.9 mm iken özellikli 21-G'lik tiplerde dış çap 0.8 mm; iç çap 0.6 mm'dir. Dış çapın küçültülmesi ile küçük kesiden cerrahinin gerçekleştirilebilmesi, indüklenmiş astigmatizmanın azaltılması ve yara yerinde sızdırmazlığın sağlanması temin edilmiştir.³⁵

İç çapın değişmesi ise fakodinamiğini ve sıvı akımını değiştirmektedir. Daha küçük iç çaplı bir tip ile çalışıldığında; uç tamamen açıkken aspirasyon borucuğu içinde daha yüksek bir direnç oluşmakta bu da ön kamaranın ani çökmesi (surge) olasılığını azaltmaktadır. Ancak uç tam oklüde iken nükleus parçacıklarını tip ucunda tutan güç azalmaktadır ve lümen daha kolay tıkanmaktadır.³⁵ Yani küçük çaplı tip ile ameliyat daha güvenli olurken süre uzamaktadır.³⁶

Son teknoloji fakoemülsifikasyon cihazlarında ayrıca özellikli, kesme gücü artırılmış çan şeklinde (kobra tipi) ya da uçları bükülmüş (kelman tipi) şekilde tasarlanmış fako tipleri kullanılmaktadır (Resim 4). Bu modifikasyonda aspirasyon lümen çapı değiştirilmesizin sadece ultrasonik dalganın lense temas yüzeyi artırılarak kesme gücü artırılmıştır. Böylece akustik dalga nükleus içinde daha geniş bir alana ve daha derine yayılarak emülsifikasyon verimi artırılmıştır.³⁷

Kelman tarafından geliştirilen, günümüzde sıklıkla tercih edilen ve eğimi 30 derece olan Kelman uçlarında, fakoemülsifikasyon sırasında nükleusa minimal temasla nükleusta belli bir itme oluşturmadan kesme ve oluk açma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.³⁸ Nükleusla minimal temas ve minimal itme özelliği bulunan bu tipler özellikle sert nükleuslarda ve zonüler zayıflığı olan olgularda avantaj sağlamaktadır.^{38,39} Ayrıca transvers ve longitudinal ultrasonu kombine ederek etkili bir kesi yapan Ellips fx elciği güncel cihazlarda yerini almıştır (Resim 5).³⁹

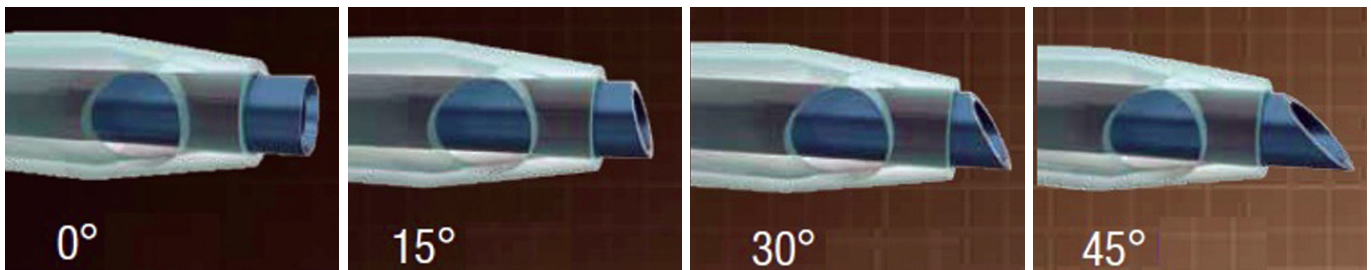
4c. Silikon Kılıf: Silikon kılıf, titanyum ucun etrafına giydirilmiş olup irrigasyon delikleri ile irrigasyon akımını yönlendirmekte ve fakoemülsifikasyon sırasında oluşan termal hasardan koruma görevi görmektedir (Resim 1).⁴⁰ Silikon kılıflar daha esnek ve sıkıştırılabilir oldukları için yuvarlak fako tipinin geçtiği eşkenar dörtgen yapıdaki bir korneal insizyonu doldurabilmektedir.

Böylece kesiye daha kolay giriş ve kesi içinde daha serbest hareket sağlanarak fako elciğinin korneaskleral dokuda oluşturduğu cerrahi stres en aza indirilmeye çalışılmaktadır.⁴⁰

5. İrrigasyon-Aspirasyon Elciği: Nükleus emülsifikasyonundan sonra kalan epinükleus ve korteks materyallerini temizlemek için kullanılan irrigasyon-aspirasyon elciği keskin olmayan yuvarlak tasarıma sahiptir. Elciğin aspirasyon deliği tam uç kısmında olmayıp yan yerleşimlidir. Standart aspirasyon delik çapı 0.3 mm olup bu küçük çap sayesinde, delik ucu tıkalı olmasa bile aspirasyon sisteminde vakum var olmaktadır.⁴¹ İrrigasyon-aspirasyon uçları genellikle düz olsa da 45-90-80 derecelik açılarla bükülmüş farklı tasarımlar da yara yerinin altında kalan ve düz uçlarla ulaşılması kolay olmayan korteks materyallerinin aspirasyonu için kullanılmaktadır.⁴¹

Ayrıca son fakoemülsifikasyon cihazlarında kullanılabilen silikon materyalden yapılmış uç kısmı bulunan saydam elciklerle (Steerable I/A ucu), uç her yöne bükülebilmekte ayrıca aspire edilen korteks saydam uçtan görülerek irrigasyon-aspirasyon için cerraha daha etkin bir kontrol sağlamaktadır. Tercih edilen fakoemülsifikasyon tekniğine göre irrigasyon-aspirasyon tek elikte olabileceği gibi irrigasyon ve aspirasyon olarak iki ayrı elcikle de olabilmektedir (Resim 6). Bimanuel irrigasyon-aspirasyon tekniğinde uçlar çok incedir ve etrafında kılıf bulunmaz.⁴² Ayrıca yan girişlerden sokulan irrigasyon ve aspirasyon elcikleri karşılıklı değiştirilerek özellikle yara yeri altındaki korteks materyali kolaylıkla temizlenebilmektedir.^{43,44}

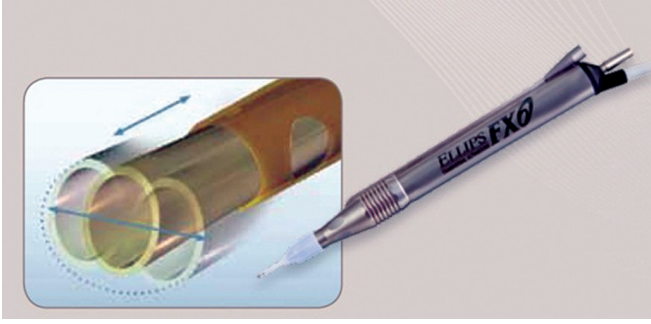
6. Ön Vitrektomi Probu: Ön vitrektomi probu fakoemülsifikasyon için kullanılan aspirasyon hattına bağlanmaktadır. Arka kapsül açılması ve zonüler diyaliz gibi ön kamarada vitreus bulunan durumlarda vitreusu keserek aspire eder.



Resim 3: Farklı açıdaki Fako tipleri.



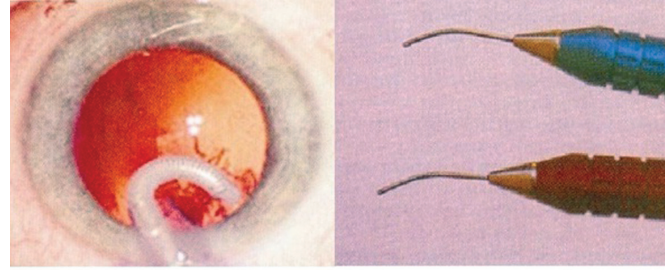
Resim 4: Farklı tasarlanmış Fako tipleri.



Resim 5: Transvers ve longitudinal ultrasonu kombine ederek etki gösteren Ellips fx elciği.

Ön vitrektomi probu, minimal traksiyon ile vitreusu uzaklaştırmak için kullanılır. Vakum ve kesi hızı cerrahın tercihinine göre değiştirilebilir. Güncel cihazlarda ön vitrektomi hızı 1500 kesi/dakikaya kadar çıkartılmıştır. Yüksek kesi hızı tercih edilmesi vitreus uzaklaştırılırken retina traksiyonu riskini en aza indirmektedir.^{45,46} Ön vitrektominin katarakt cerrahisinde en önemli olduğu yerlerden biri de pediatrik katarakt cerrahisidir.⁴⁷ Pediatrik olgularda katarakt cerrahisi sonrası arka kapsül opasifikasyonu insidansı anterior, posterior kapsüloreksis ve ön vitrektomi sonrasında çeşitli çalışmalarda %16.7, %50 ve %29.4 olarak belirtilmektedir.⁴⁷ Pediatrik olgularda arka kapsülötomisi anterior yaklaşım ile vitrektör kullanılarak gerçekleştirilebilir. Anterior yaklaşım ile gerçekleştirilen bir cerrahide, lens materyalinin temizlenmesinden sonra arka kapsül, vitrektörün aspirasyon özelliğinin kullanılması ile yakalanır, takiben kesici aktive edilerek arka kapsülötomisi ve bu sırada bir miktar ön vitrektomi yapılabilir.

7. Ayak Pedalı: Fakoemülsifikasyon cihazının ve fonksiyonlarının kontrolünü sağlayan ayak pedalının temelde dört pozisyonu vardır.^{48,49} Pedalın 0. pozisyonu dinlenme pozisyonudur, bu kademede irrigasyon hattında bulunan bir valvli sistem ön kamaraya sıvı akışını engeller. Pedala basılmaya başlanıp pedal 1. pozisyona getirildiğinde, irrigasyon valvi açılarak ön kamaraya sıvı akışı başlar. Ön kamaraya bu sıvı akışı irrigasyon sıvısı yüksekliği ve ön kamera basıncı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Sistemde dışarı sızma yoksa ön kamaradaki sıvı basıncı şişe yüksekliğine eşitleninceye kadar devam eder. Pedalın bu pozisyonda tutulması derin bir ön kamera gerektiren ancak vakum veya ultrason enerjisi gerektirmeyen nükleusun döndürülmesi veya kırılması gibi fakoemülsifikasyon manevralarında tercih edilmektedir. Birçok fakoemülsifikasyon cihazında devamlı irrigasyon modu vardır, bu mod aktifleştirildiğinde fakoemülsifikasyon süresince pedala hiç basılmadığı halde irrigasyonun devam etmesi sağlanmaktadır.⁵⁰ Pedala basılmaya devam edilip orta kademeye yani 2. pozisyona getirildiğinde, birinci kademede fonksiyonlara ilaveten pompa önceden belirlenen hızda dönmeye başlar ve aspirasyon akımı oluşur.



2a

2b

Resim 6: İrrigasyon-aspirasyon işlevini tek elcikle gerçekleştiren (2a) ve bimanuel yöntem olarak bilinen irrigasyon ve aspirasyonu ayrı olarak iyi ayırtan elcikle (2b) gerçekleştiren farklı tip elcikler görülmektedir.

Pedalın bu pozisyonunda fakoemülsifikasyon ucu açıkken aspirasyon; uç tıkalı ise vakum oluşur. Ayak pedalı 3. pozisyona getirilirse, birinci ve ikinci kademede fonksiyonlara ilaveten ultrasonik güç aktifleşir. Bu pozisyonda ayak pedalına bastıkça gücün arttığı lineer kontrol modu veya pedala ne kadar basılırsa basılsın önceden belirlenmiş sabit bir güçte ultrasonik enerji oluşturan sabit kontrol modu gibi farklı kontrol modları cerrahın tercihinine göre seçilebilir.

Yeni fakoemülsifikasyon cihazlarında ayrıca ayak pedalıyla reflü özelliği ve irrigasyon şişesi yüksekliğini ayarlayabilme özelliği bulunmaktadır.⁵¹ Cerrahinin güvenliliğini artıran ameliyat esnasında iyatrojenik yaralanma riskine karşı geliştirilmiş reflü özelliğiyle, yanlışlıkla tutulan bir doku (arka kapsül, iris) ön kamaradan fako tipine doğru olan aspirasyon akışı tersine çevrilerek aniden geri bırakılabilmektedir.

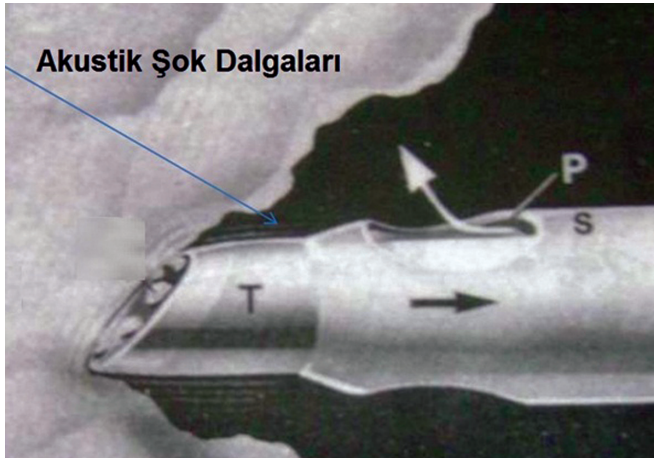
B. FAKOEMÜLSİFİKASYON CİHAZI FONKSİYONLARI

Fakoemülsifikasyon cihazının nükleus emülsifikasyonu, irrigasyon-aspirasyon ve ön vitrektomi fonksiyonları vardır. Bu başlık altında cihazın ana fonksiyonu olan emülsifikasyon ve irrigasyon-aspirasyondan bahsedilecektir.

1. Emülsifikasyon Fonksiyonu: Temel fonksiyonu kesif nükleusu çok küçük parçalara ayırarak oluşan parçaları aspire etmek olan fakoemülsifikasyon cihazında ultrason enerjisinin nükleusu parçalaması ile ilgili şu üç teori öne sürülmüştür:⁵²

a. Akustik Parçalama: Fako tipinin frekansı ve vuruş uzunluğu düşünüldüğünde, titreştiği ön kamarada tipin önünde 400 km/saat hızla hareket eden yaklaşık 500 atmosfer basınca sahip bir sıvı dalgası oluşmakta ve bu etki nükleus parçalanmasında etkili olmaktadır (Resim 7).^{22,53}

b. Kavitasyon Etkisi: Fako tipinin ön kamera sıvısında nükleus içinde hareketi sırasında kabarcıklar oluşmakta ve bu kabarcıkların taşıdığı enerji lens nükleusunu parçalamaya yardımcı olmaktadır (Resim 8).²² Ancak son çalışmalarda bu etkinin minimal olduğu gösterilmiştir.⁵⁴

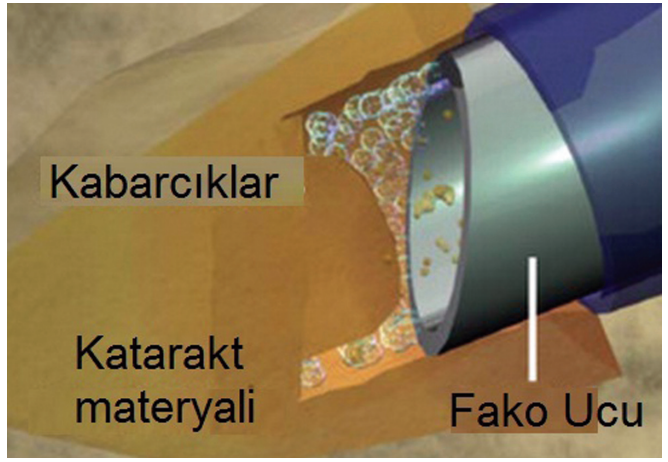


Resim 7: Fakoemülsifikasyonda akustik parçalama.

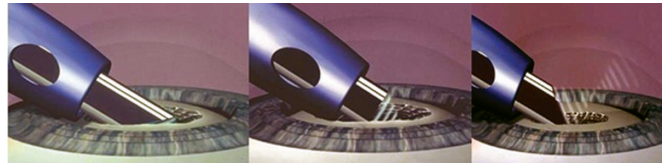
Akustik etki ve kavitasyon etkisi fako tipinin hareketi sırasındaki oluşan basınç farkı ile ilişkilidir ve birlikte düşünülmelidir. Fako tipinin hareketi sonucu ön kamara sıvısı içinde alçak ve yüksek basınç alanları oluşur. Fako ucunun geri çekilmesi sırasında oluşan alçak basınç ön kamara sıvısının içinde mikro kabarcıklar yaratır. Sonra fako ucunun ileri hareketi sırasında ortaya çıkan yüksek basınç artışıyla oluşmuş bu mikro kabarcıklar patlayarak kollabe olur. Bu kollapsın son döneminde kabarcık içinde basınç ve ısı artışı çok yüksek düzeylere ulaşır. Bu yüksek ısı enerjisi moleküler bağlantıların kopmasına neden olur. Kabarcıkların tekrar oluşmasının ardından yüksek basınç şok dalgası yaratarak çevre dokuları bozar ve dağıtır. Bu bağlamda ultrasonik kavitasyon enerjisiyle aşırı doku harabiyeti ortaya çıkar. Başlangıçta ortaya çıkan geçici kavitasyon çabucak stabil kavitasyona dönüşür. Stabil kavitasyonda daha az kollaps ve daha az enerji oluşmaktadır.^{55,56}

c. Mekanik Parçalama: Frekans ve vuruş uzunluğu birlikte düşünüldüğünde cerrahi esnasında fakoemülsifikasyon tipi 70-120 mikron yolu saniyede 20-80 bin defa gidip gelmektedir. Bu hızlı ileri geri hareket sırasında fako tipi nükleusta direk parçalayıcı bir etki açığa çıkartır. Bu etki, nükleus emülsifikasyonu sağlayan en önemli etki olup çekiç (hammer) etkisi olarak da bilinir (Resim 9).^{22,54}

Aslında fakoemülsifikasyon sırasında nükleusun parçalanmasında bu üç etki birlikte olur. Fako probundaki piezoelektrik mekanizma elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Bu sayede fako probunun ucun saniyede 20-80 bin defa hareket eder.⁵⁴ Bu titreşim hareketi ile hızla patlayan mikrokabarcıklar ve geçici kavitasyon oluşarak masif miktarda enerji salınımı olur. Sonuçta bu enerji 500 atm.'e kadar ulaşarak lensi emülsifiye eden şok dalgaları ve 400 km/saat'e kadar ulaşan sıvı dalgaları oluşur.



Resim 8: Fakoemülsifikasyonda kavitasyon.

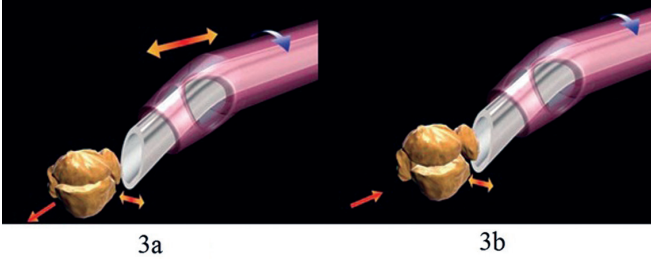


Resim 9: Fakoemülsifikasyonda mekanik parçalama.

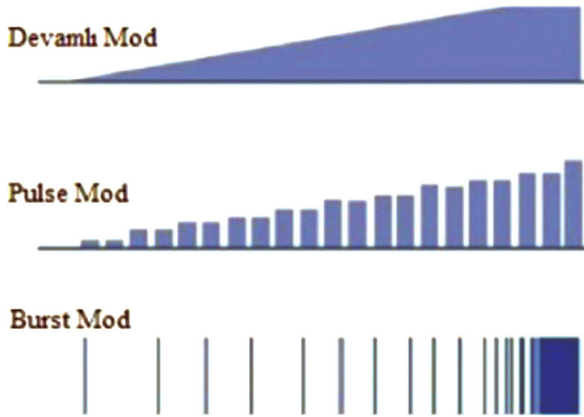
Konvansiyonel fakoemülsifikasyonda, longitudinal olarak fako tipinin ileri-geri hareketi sırasında ortaya çıkan ısı enerjisi ve sıvı türbülansı nükleusta bir itiş etkisi oluşturmaktadır; bu etki de ultrason enerjisinin verimli kullanımını azaltmakta, cerrahi süresini uzatmakta ve nükleustan kopan partiküllerin de etkisiyle korneal endotel hasarı oluşmaktadır.⁵⁷ Bu olumsuz etkiyi azaltmak ve ultrason enerjisini daha efektif kullanmak için standart ileri-geri hareketten farklı bir hareket tarzı oluşturularak yatay salınım hareketi gerçekleştiren emülsifikasyon sırasında itiş etkisini minimele indiren torsiyonel mod geliştirilmiştir (Resim 10).⁵⁸ Yapılan çalışmalarda özellikle orta ve sert nükleuslarda, torsiyonel modun longitudinal fako cerrahisine göre daha az enerji açığa çıkaran ve daha etkin bir metot olduğu gösterilmiştir.^{59,60} Longitudinal fakoemülsifikasyon sırasında tipin ileri hareketi nükleusu parçalarken, geri hareket esnasında ısı ve enerji üretilmesine rağmen emülsifikasyon olmamaktadır; yani geri hareket pasiftir. Torsiyonel fakoda ise yatay salınımlı özel hareket şekli döngünün her iki fazında da sağa-sola salınım hareketi ile nükleusu emülsifiye etmektedir; yani her iki faz da aktiftir. Ayrıca torsiyonel fakoda fakoemülsifikasyon sırasında nükleusta itiş etkisi oluşturulmadığı için nükleus daha iyi takip edilebilmektedir.^{59,60}

Fakoemülsifikasyon cerrahisinde kullanılan ultrasonik gücün yanı sıra kullanılan mod ve nükleusu parçalama yöntemi de ortama çıkan ısı enerjisini belirler. Cerrahi sırasında oluşan bu ısı etkisini azaltmak ve termal hasardan korunmak için ultrason enerjisinin aralıklarla uygulanması ve fako tipinin arada soğuma

için dinlenme sürelerinin oluşturulması amaçlanarak farklı fakoemülsifikasyon modları geliştirilmiştir (Resim 11).⁶¹ Bu modlarda ultrason enerjisi sürekli olmayıp aralıklarla uygulanır. Ultrasonik enerjinin aktif olduğu zaman ‘on-aktif dönem’; enerjinin inaktif olduğu dönem ise ‘off-dinlenme dönemi’ olarak adlandırılır. Belli bir zaman diliminde, enerjinin aktif (on) olduğu sürenin toplam süreye oranı ise görev döngüsü (duty cycle) olarak adlandırılır.⁶² Fakoemülsifikasyon cerrahisinde kullanılan iki ana mod şunlardır:



Resim 10: Longitudinal fakoemülsifikasyonda fako tipinin ileri-geri hareket şekli ve nükleustaki itiş etkisi görülmektedir (3a). Torsiyonel fakoemülsifikasyonda fako tipinin yatay salınım hareketi görülmektedir (3b).



Resim 11: Farklı fakoemülsifikasyon modları ve bu modlarda ultrason enerjisinin aktif (on) ve inaktif (off) olduğu dönemler görülmektedir. (Resim 4).

1.1. Devamlı Mod: Üretilen ultrasonik enerji kesintisiz ve devamlıdır, dinlenme (off) dönemi yoktur (Resim 11). Yani görev döngüsü %100'dür. Devamlı modda tek değişken parametre nükleusun sertliğine göre cerrah tarafından değiştirilebilen maksimum güç seçeneğidir. Ayrıca “lineer ya da panel kontrol” seçeneklerinden biri seçilerek, ayak pedalı konum 3’e getirildiğinde belirlenen bu gücün tümünün verilmesi ya da basma miktarı ile doğru orantılı olarak gücün artırılması sağlanabilir. Termal hasar bu modda rölatif olarak daha fazladır.⁶³

1.2. Kesintili Mod: Üretilen ultrasonik enerji kesintilidir, dinlenme dönemi vardır. Özellikle sert nükleuslarda enerji kullanım süresini azaltmak, darbe etkinliğini artırmak ve termal hasarı en aza indirmek için tercih edilir.⁶³ Kesintili modlar pulse ve burst modları olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır:

1.2.a. Burst Mod: Tekli veya multi burst modları bulunmaktadır (Resim 11). Burst fakoda sabit güç mevcuttur ve gücün uygulanma aralıkları değişkendir.^{64,65} Tekli burst mod günümüzde tercih edilmemektedir. Tekli bu modda ayak pedalı 3. kademedeyken; daha önceden gücü ve süresi panel üzerinde belirlenmiş tek bir burst oluşturur. Bundan sonra ayak pedalını 3. kademe tutmak burst oluşturmaz; yeni bir burst oluşturulmak isteniyorsa ayak pedalı önce 1. veya 2. kademeye döndürülmeli ve sonrasında tekrar 3. kademeye getirilmelidir. Multi burst modda ise darbe amplitüdü ve süresi sabit, ancak darbe aralıkları değişken olan ardışık darbeler şeklinde ultrasonik güç üretilir. Bu mod kullanılırken devamlı moddakine benzer şekilde lineer ya da panel kontrol seçeneklerinden biri seçilebilir. Lineer kontrol seçildiğinde, ayak pedalı 3. kademeye geçtikten sonra ayak pedalına ne kadar fazla basılırsa darbeler arasındaki aralıklar o ölçüde giderek kısalır ve sonunda devamlı fakoya geçilir. Yani fakonun aktif olduğu süre (on) sabitken buna karşılık dinlenme süresi (off) pedala ne kadar fazla basılırsa o ölçüde kısalır. Dolayısıyla görev döngüsü de giderek artar. Panel kontrol seçildiğinde ise, ayak pedalı konum 3’e geçince panel üzerinde belirlenmiş olan güç ve uzunlukta burst şeklinde darbeler elde edilir. Özellikle çok sert kataraktlarda multi burst mod kullanımı devamlı fakoemülsifikasyonun oluşturduğu termal hasarları ve endotel hücre kaybını azalttığı için önerilmektedir.^{65,66}

1.2.b. Pulse Mod: Ultrasonik dalgaların sıklığı ve amplitüdü değişkendir; ancak ultrasonik enerjinin aktif (on) olduğu sürenin toplam süreye oranı yani görev döngüsü %50 olarak sabittir (Resim 11).⁶⁷ Longitudinal modda çalışan frekansı 40 Hz olan yani saniyede 40 000 titreşim oluşturan konvansiyonel bir fakoemülsifikasyon cihazı için; pulse mod bu titreşim sayısının saniyede 20 000’e inmesi demektir. Kalan süre dinlenme süresi olarak boş geçecektir. Dakika-daki pulse sayısı ve maksimum pulse amplitüdü cerrah tarafından panelden ayarlanabilir.

Yeni bir sistem olan hiperpulse fako modunda elcikteki oldukça yavaş etkileşime giren özel piezoelektrik kristaller ile gücün kullanıldığı süreler ve dinlenme süreleri oldukça kısadır. Bu şekilde ultrason enerjisi çok daha kısa zaman aralıklarında uygulanabilir ve darbeler arasındaki dinlenme süreleri değiştirilebilir. Fako gücünün kullanılmadığı dinlenme evresinde sadece aspirasyon yapılırken; fako sırasında oluşan ısı fako tipinden sıvı geçişi ile kaybolmaktadır. Böylece, çok kısa olan güç uygulanma süreleri ile fakonun mekanik parçalama etkisi maksimuma çıkarılmaya çalışılmaktadır.⁶⁸

2. İrrigasyon-Aspirasyon Fonksiyonu: Fakoemülsifikasyon cerrahisinde nükleus emülsifiye edildikten sonra kalan korteks artıkları irrigasyon-aspirasyon işlemi ile temizlenir, bu aşama hemen tamamen kapsüler kese içinde gerçekleştirilir. İrrigasyon yerçekimi sayesinde gerçekleştirilen pasif bir işlemken;

aspirasyon fakoemülsifikasyon cihazı tarafından sağlanan aktif bir işlemdir.⁶⁹ Ters çevrilmiş serum seti ve fakoemülsifikasyon elciği arasındaki bağlantı sağlanarak gerçekleştirilen irrigasyonla ön kamara-ya sağlanan sıvı akışının esas amacı, ön kamara derinliğinin sağlanması ve fakoemülsifikasyon ucunun soğutulmasıdır. Buna karşın ön kamaradan aktif sıvı boşaltılmasını sağlayan aspirasyon mekanizmasının esas amacı, aspirasyon ucundaki materyali aspire etmek için gerekli negatif basıncı oluşturmak ve materyali boşaltmak için yeterli güçte akım elde etmektir.⁷⁰ Aspirasyon sırasında oluşturulan bu dışarı akım hızı (flow rate) birim zamanda gözü terk eden sıvı miktarıdır ve ml/dk olarak ifade edilir.⁷¹

Fakoemülsifikasyonda olduğu gibi korteks temizliğinde de kullanılan pompanın irrigasyon-aspirasyon aşamasının güvenliliği, hızı ve kontrolü açısından büyük önemi vardır. Özellikle tecrübesiz cerrahlarda daha emniyetli olan, istenilmediği zaman vakum oluşturmamayan ve aspirasyon ucunun tıkanması ortadan kalkınca vakum etkisi kaybolan peristaltik pompalar daha güvenlidir ve bu nedenle tercih edilir.^{70,72} Akım tabanlı peristaltik pompalarda tıkanma ortadan kalkınca vakum kaybolurken; vakum tabanlı ventüri ve diyafragmatik pompalarda cerrah ayak pedalından bir önceki kademeye dönmedikçe yüksek vakum ve akım hızı devam eder. Venturi pompa, cerrahinin süresini kısaltsa da özellikle tecrübesiz ellerde arka kapsül yakalanması riskini arttırmaktadır.⁷² Ancak güncel fakoemülsifikasyon cihazlarında, teknolojik gelişmelerle birlikte venturi pompa kullanımının oluşturabileceği komplikasyonlar en aza indirilmeye çalışılmıştır.⁷³⁻⁷⁵ Ayrıca yeni bir teknoloji olan dual pompalarla birlikte venturi pompanın hızı ve peristaltik pompanın güvenilirliği kombine bir halde kullanılmaya başlanmıştır.⁷⁶

Irrigasyon-aspirasyon fonksiyonu birlikte tek bir elcikten gerçekleştirilebileceği gibi irrigasyon ve aspirasyon elciklerinin birbirinden ayrı olduğu bimanuel yöntem de mevcuttur. Tek elcikli sistemde kullanılan irrigasyon-aspirasyon ucunun etrafı metal veya silikon bir kılıf ile kaplıdır. Geçmişte kullanılan metal kılıfların özellikle yara yerinin altındaki kortekslerin temizlenmesinde zorluklara neden olduğu ve kesi yerini tam doldurmadığı için sıvı kaçışına neden olduğu bildirilmiş ve bu sorun farklı açılarla bükülmüş uçları bulunan, kesi yerinin şekline daha iyi uyan silikon materyalden yapılmış elciklerle çözülebilmektedir.⁷⁷⁻⁷⁹ Ayrıca metal kılıfların neden olduğu ışık yansıması silikon kılıflarda görülmemektedir.

Buratto'nun geliştirdiği genellikle 23 G olan iki küçük parasentez girişi ile gerçekleştirilen bimanuel yöntemde hafif eğimli, birbirinden ayrı irrigasyon-aspirasyon kanülleri kullanılmaktadır.^{80,81} Parasentez girişinden ön kamaraya yerleştirilen eğimli kanüller kendi aralarında yer değiştirilerek yara yeri altındaki korteksler kolaylıkla temizlenebilmektedir.

Bu yöntemle daha elverişli bir ön kamara derinliği sağlanabildiği, arka kapsül yakalanma riskinin azaldığı ve daha emniyetli bir şekilde ön kamarada hareket edilebildiği, subinsizyonel korteks materyaline daha kolay ulaşılabilirdiği bildirilmektedir.^{79,80}

Cerrahin tercihi, tecrübesi veya ihtiyacına göre bunlardan hangisi kullanılırsa kullanılsın kanüller uygun şekilde takılmış ve ön kamaraya girilmeden kontrolleri yapılmış olmalıdır. Irrigasyon ve aspirasyon tüpleri tamamen dolu olmalı, silikon kılıf ve uç düzgün şekilde monte edilmiş olmalıdır. Irrigasyon setindeki hava tanecikleri temizlenmeli ve böylece cerrahi sırasında ön kamaraya girmeleri engellenmelidir. Çünkü bunlar görüntüyü bozacak ve cerrahiye zorlaştıracaklardır. Ayrıca aspirasyon setindeki hava taneciklerinin varlığı pompanın etkinliğini azaltacaktır.

C. FAKOEMÜLSİFİKASYONDA SIVI DİNAMİKLERİ

Fakoemülsifikasyonda uygun sıvı dinamiği ön kamarada stabil basınç ve hacim sağlanması, güvenli ve etkin cerrahi gerçekleştirilmesi açısından önem taşır. Ön kamaradan sıvı aspirasyonu doğru infüzyonla dengelenmelidir. Ayrıca ön kamarada kollapsın önlenmesi için ön kamara basıncı, vitreus basıncından ve atmosfer basıncından yüksek olmalıdır. Fakoemülsifikasyon cihazının sıvı dinamiğini anlamak için bazı terimlerin anlaşılması gerekir:

1. Akım Hızı (Flow Rate): Birim zamanda fakoemülsifikasyon cihazındaki pompa tarafından aspire edilen sıvı miktarıdır, aspirasyon akım hızı olarak da ifade edilir, birimi mililitre/dakika'dır.⁷¹ Sıvı infüzyon hattını geçerek fako elciği aracılığı ile ön kamaraya ulaşır; aspirasyon hattından, ana giriş ve yan girişlerden gözü terk eder. Aspirasyon akım hızı artırılırsa lens partiküllerinin fako tipi ucuna doğru olan hareketi hızlanır, azaltılınca yavaşlar. Akım hızının dengede tutulması önemlidir, aspirasyon sırasında tip içerisinden geçen sıvı soğumayı sağladığı için; çok düşük akım hızlarında insizyon yanığı (fako burn) riski artar ve ameliyat süresi uzar.^{82,83} Diğer taraftan çok yüksek akım hızları ile ön kamarada kontrolsüz bir akım oluşur, bu akım lens partikülleri ile birlikte arka kapsül ve irisin yakalanmasına neden olabilir. Standart bir fakoemülsifikasyon sırasında kontrollü bir cerrahi için 20-30 ml/dk arasındaki akım hızları önerilir.⁸⁴

2. Vakum ve Vakum Artış Süresi (Vacuum Rise Time): Vakum oklüzyon gerçekleştiğinde fako tipinin ucunda oluşan basınçtır, birimi mmHg'dir. Vakum lens parçasını fako tipinde tutmak için gereken gücü sağlar. Fakoemülsifikasyon cihazında vakum için panel üzerinde bir değer belirlenir. Bu değer en üst vakum limit değeridir. Fako tipinde tam tıkanma gerçekleştiğinde vakumun bu üst vakum limit değerine ulaşması için gereken süreye vakum artış süresi (vacuum rise time) denir.⁸⁵ Bu süre aspirasyon akım hızına ve kompliyans olarak bilinen birim basınca karşılık değişen hacim miktarına bağlıdır.

Aspirasyon akım hızı artarsa vakum artış süresi kısalmır; kompiyans artarsa bu süre uzar.⁸⁵ Ayrıca cihazda tercih edilen pompa da bu süreyi etkiler; ventüri pompalarda bu süre daha kısadır. Vakum yükselme zamanının dengede tutulması cerrahinin güvenliği ve süresi açısından önemlidir.⁸⁶ Bu süre çok uzun ise cerrahi süresi uzar. Bu süre çok kısa ise güvenlik sınırı daralır, arka kapsül ve iris yakalanması riski artar. Özellikle tecrübesiz cerrahlar için vakum yükselme zamanının çok kısa tutulması komplikasyon riskini artıracaktır.

3. Tıkanma (Oklüzyon): Aspirasyon yapan fako tipi ya da irrigasyon-aspirasyon ucunun lens materyali ile kapatılması durumudur. Kısmen ya da tam olabilir. Vakumun gerçekleşmesi için tam tıkanmanın oluşması önemlidir. Tam tıkanma durumunda pompa çalışmaya devam ettiği halde aspirasyon durur ve aspirasyon borusu içinde vakum ortaya çıkar.⁸⁷

4. Surge (Çökme): Ayak pedalı 2. veya 3. kademe-
deyken fako tipinin ucu aspire edilen materyal ile tam olarak oklüde olduğunda, sıvı akımı geçici olarak durur ve aspirasyon hattında yüksek bir negatif basınç oluşur. Oklüzyon ortadan kalktığında bu negatif basınç aspire edilen sıvıda kontrol edilemeyen bir artışa neden olur, ön kamarada ani bir kollaps oluşur ve arka kapsül, iris veya kornea endoteli fako tipiyle temas edip hasar görebilir.⁸⁸ Surge oluşumu çeşitli hidrodinamik faktörler ve ile ilişkilidir:

a. Üst Vakum Limit Değeri: Vakum üst limit değeri arttıkça surge riski artar.

b. Aspirasyon Akım Hızı: Akım hızı ne kadar fazla ise surge riski o oranda artar.

c. İrrigasyon Şişe Yüksekliği: Düşük şişe yüksekliği surge riskini artırır.

d. Pompa Tipi: vakum tipi pompalarda vakum arttıkça akım hızı da arttığı için genellikle bu tip pompalarda surge olasılığı daha fazladır.

e. Aspirasyon-İrrigasyon Borusundaki Direnç: direnç azaldıkça surge riski artar.

f. Aspirasyon Borusunun Sertliği: sert ve kollabe olmayan aspirasyon borularının kullanılması surge olasılığını azaltır.

Günümüzde modern fakoemülsifikasyon cihazlarında bazı önlemler alınarak surge riski en aza indirilmeye çalışılmıştır. Küçük çapa sahip sert aspirasyon boruları kullanılması bunlardan birisidir. Ön kamara basıncını çok kısa aralıklarla ölçerek (saniyede 50 kez) oklüzyonun açılma anını saptayan ve pompaya müdahale ederek akım hızı ve vakumu ayarlayan sensörler kullanmak başka bir yöntemdir. Ayrıca, fako cihazına eklenmiş surge durumunda devreye giren ikinci bir irrigasyon şişesi kullanmak başka bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.⁸⁸⁻⁹⁰ Ancak bütün bu teknik ve aygıtla bağlı önlemlere karşın; yine de surge olayını önlemek büyük ölçüde cerraha ve kullandığı parametrelerin ayarlanmasına bağlıdır.

Dikkatli cerrah surge olayının oluşmaya başladığını fark eder etmez irrigasyon şişe yüksekliğini arttırıp vakum sınırını ve/veya aspirasyon akım hızını azaltarak tehlikeli miktarlarda surge oluşmasını önleyebilir.

5. Venting (Nefeslenme): Venting, aspirasyon hattındaki vakumun belli bir değerin üstüne çıkmasını engelleyerek surge oluşumunu azaltan bir mekanizmadır. Bazı mekanizmalarla gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki cerrah kontrolünde istemli olarak gerçekleştirilen, istenmeyen parçaların yakalanması durumunda ayak pedalında 1. veya 0. kademeye geçilmesi ile cihaz tarafından gerçekleştirilen venting mekanizmasıdır. İkincisi ise fakoemülsifikasyon cihazı kontrolünde gerçekleşir. Aspirasyon hattındaki vakum giderek arttığında ve önceden belirlenen limit değerine ulaştığında cihazın aspirasyon hareketini otomatik olarak durdurması ve/veya aspirasyon hattına hava veya sıvı vererek aspirasyon hattında oluşan negatif basıncın azaltılması şeklinde devreye sokulur. Böylece yanlışlıkla aspire edilen dokular serbest kalır.⁹¹

6. Reflü (Geri Verme): Aspirasyon hattı içinde pozitif basınç oluşturarak akımın tersine çevrilmesi ve aspirasyon hattına istenmeden alınmış olan iris veya kapsül gibi dokuların geriye bırakılmasını sağlar. Eğer venting bu iş için yeterli gelmemişse reflü uygulamak gerekir. Otomatik bir olay değildir, cerrah tarafından karar verilip uygulanması gerekir. Genellikle ayak pedalında bir geri dönüşüm kontrol bölümü bulunur ve buna basılarak gerçekleştirilir. Fako aygıtlarında geri verme işlemi ya aspirasyon pompası ters yönde çalıştırılarak ya da aspirasyon hattı pompadan ayrılıp infüzyona bağlanarak sağlanmaktadır.¹⁶

7. İrrigasyon Hattı ve Şişesi: Fakoemülsifikasyon sırasında irrigasyon şişesi içindeki sıvı önce irrigasyon hattı ile fako elciğindeki irrigasyon çıkışlarına gelir, oradan ön kamaraya geçer, fako tipindeki aspirasyon ucundan aspire edilir ve aspirasyon hattından geçerek sıvı torbasına alınır. Bu sıvı hareketi bir devre sistemi olarak tanımlanabilir. Zonüllere fazla yük bindirmemek, aşırı insizyon kaçığı olmasını önlemek ve yeterli derinlikte bir ön kamarada çalışmak için ön kamaradaki sıvı basıncının belirli bir düzeyde olması istenir. Eğer bu sıvı devresinde aspirasyon pompası çalışmıyor, sıvı hareketi yok ve herhangi bir insizyon kaçığı bulunmuyorsa bu basınç hidrostatik basınç olarak adlandırılır ve irrigasyon şişesinin yüksekliğiyle doğru orantılıdır. Ancak sıvı devresinde sıvı hareketi başladığında artık bu durumda göz içi basıncı irrigasyon şişesinin yüksekliği yanı sıra aspirasyon pompasının çalışma hızı, aspirasyon sistemindeki direnç ve insizyon kaçığı gibi faktörlerin tümü tarafından belirlenir. Cerrahi sırasında aspirasyon pompasının çalışma hızı artırıldığında, insizyondan sıvı kaçığı arttığında ve ön kamara derinliği ve basıncının artırılması durumlarında şişe yüksekliği artırılmaz; bunun tersi de doğrudur, örneğin herhangi bir nedenle şişe yüksekliği azaltılmışsa aspirasyon akım hızı da bu doğrultu da azaltılarak dengelenmelidir.⁹²

KAYNAKLAR/REFERENCES

- Roy PN, Mehra KS, Deshpande PJ. Cataract surgery performed before 800 B.C. *Br J Ophthalmol*.1975;59:171.
- J Daviel. On a new method to cure cataract by extraction of the lens. *Br J Ophthalmol*. 1967;51:449-58.
- Hubbell AA, Sharp S. The First Surgeon to make the Corneal Incision in Cataract Extraction with a Single Knife. *Medical Library and Historical Journal*. 1904;2:242-268.
- T. Krwawicz. Further experience with intracapsular cataract extraction by application of low temperature. *Br J Ophthalmol*. 1963;47:36-8.
- Sarwar H, Modi N. Sir Harold Ridley: innovator of cataract surgery. *J Perioper Pract*. 2014;24:210-2.
- Harold Ridley. Further Experiences of Intra-Ocular Acrylic Lens Surgery: With a Report of more than 100 Cases. *Br J Ophthalmol*. 1954;38:156-62.
- Kelman CD. Phaco-emulsification and aspiration. A new technique of cataract removal. A preliminary report. *Am J Ophthalmol*. 1967;64:23-35.
- Pandey SK, Milverton EJ, Maloof AJ. A tribute to Charles David Kelman MD: ophthalmologist, inventor and pioneer of phacoemulsification surgery. *Clin Experiment Ophthalmol*. 2004;32:529-33.
- Eichenbaum JW. Trends in cataract surgery. *Bull N Y Acad Med*. 1992;68:367-89.
- Clayman HM. Evolution and current status of cataract surgery. Albert DM (Ed.). *Ophthalmic surgery: principles and techniques*. 1 st edition. USA: Blackwell science inc., 1999;250-6.
- Devgan U. Phaco fluidics and phaco ultrasound power modulations. *Ophthalmol Clin North Am*. 2006;19:457-68.
- Khanna RC, Kaza S, Palamaner Subash Shantha G, et al. Comparative outcomes of manual small incision cataract surgery and phacoemulsification performed by ophthalmology trainees in a tertiary eye care hospital in India: a retrospective cohort design. *BMJ Open*. 2012;10:2.
- Sharwood PL, Thomas D, Roberts TV. Adverse medical events associated with cataract surgery performed under topical anesthesia. *Clin Experiment Ophthalmol*. 2008; 36: 842-6.
- Hoffman RS, Fine IH, Packer M. New phacoemulsification technology. *Curr Opin Ophthalmol*. 2005; 16:38-43.
- Gilger BC. Phacoemulsification. Technology and fundamentals. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*. 1997;27:1131-41.
- Yow L, Basti S. Physical and mechanical principles of phacoemulsification and their clinical relevance. *Indian J Ophthalmol*. 1997;45:241-9.
- Bethke W. Phaco: Getting Pumped For New Fluidics. *Review of Ophthalmology*. 2008;8:11.
- Bethke W. The Cutting Edge of Cataract Surgery. *Rev Ophthalmol*. 2007;7:76-80.
- Arun S, Jeevan ST, Namrata S, et al. Phacodynamics and Machines. In Sharma N, Pandey SK. *Phacoemulsification Surgery*. Jaypee Brothers Publishers, India 2005:123-7.
- Zanini M, Savini G, Buratto L. Physical principles of phacoemulsification. In: Buratto L, Werner L, Zanini M, Apple DJ, editors. *Phacoemulsification; Principles and Techniques*. 2nd ed. Thorofare, NJ: Slack Inc; 2003:41-46.
- Fishkind WJ, Neuhaan TF, Steinert RF. The Phaco Machine: The Physical Principles Guiding Its Operation. *Cataract Surgery*, R. F.Steinert, ed., Saunders Elsevier, Philadelphia, PA, 2010:75-92.
- Packer M, Fishkind WJ, Fine IH, et al. The physics of phaco: a review. *J Cataract Refract Surg*. 2005;31:424-31.
- Seibel BS. *Phacodynamics: Mastering the Tools and Techniques of Phacoemulsification Surgery* (ed 2), Slack, Thorofare, NJ 1995,2-52.
- Boukhny M. Phacoemulsification tips and sleeves. In: Buratto L, Werner L, Zanini M, Apple D, eds, *Phacoemulsification Principles and Techniques*, 2nd edn. Thorofare, NJ, Slack, 2003;247-54.
- Helvacıoğlu F, Şencan S, Tunç Z, et al. Katarakt ve Güncel Tedavi Yaklaşımları. *Maltepe Tıp Dergisi*. 2014; 6: 30-7.
- Tognetto D, Cecchini P, Leon P, et al. Stroke dynamics and frequency of 3 phacoemulsification machines. *J Cataract Refract Surg*. 2012;38:333-42.
- Olson RJ, Jin Y, Kefalopoulos G, et al. Legacy AdvanTec and Sovereign WhiteStar: a wound temperature study. *J Cataract Refract Surg*. 2004;30:1109-13.
- Bond LJ, Cimino WW. Physics of ultrasonic surgery using tissue fragmentation: Part II. *Ultrasound Med Biol*. 1996;22:101-17.
- Oakey ZB, Jensen JD, Zaugg BE, et al. Porcine lens nuclei as a model for comparison of 3 ultrasound modalities regarding efficiency and chatter. *J Cataract Refract Surg*. 2013;39:1248-53.
- Christakis PG, Braga-Mele RM. Intraoperative performance and postoperative outcome comparison of longitudinal, torsional, and transversal phacoemulsification machines. *J Cataract Refract Surg*. 2012; 38: 234-41.
- Tognetto D, Leon PE. Role of the phaco tip surface. *J Cataract Refract Surg*. 2012;38:381.
- Ito K. Experimental studies on clinical and pathological changes of neighbouring tissues of lens by ultrasonic vibrating tip for phaco-emulsification. 3. Clinical and pathological changes using tubular tip for phaco-emulsification and aspiration. *Nihon Ganka Gakkai Zasshi*. 1970;74:1484-8.
- Helvacıoğlu F, Yeter C, Şencan S, et al. Torsiyonel fakoemülsifikasyon ve fako iğnesi seçimi. *TJO*. 2014; 44: 392-5.
- Pandey S, Thakur J, Werner L et al. Instrumentation and Medication. In Agarwal S, Agarwal A, Agarwal A editors. *Phacoemulsification*. Jaypee Brothers Publishers, India 2004:110-5.
- Farukhi AM, Stagg BC, Ronquillo C Jr, Barlow WR Jr, Pettet JH, Olson RJ. Effect of phaco tip diameter on efficiency and chatter. *J Cataract Refract Surg*. 2014;40:811-7.
- Yılmaz ÖF. Fakoemülsifikasyon aygıtları ve sıvı dinamiği. TOD katarakt ve refraktif cerrahi birimi. *Türk Oftalmoloji Derneği eğitim yayınları no:2, Fakoemülsifikasyon*. Birinci baskı. Bursa Fikret Özsan Matbaası 2004;11-30.
- Hida WT, Tzelikis PF, Nakano CT, et al. Mini-flared Kelman tip, reverse tip, and sidewinder tip with torsional phaco: a prospective randomized comparative study. *Arq Bras Oftalmol*. 2015;78:19-22.
- Kim EK, Jo KJ, Joo CK. Comparison of tips in coaxial microincision cataract surgery with the bevel-down technique. *J Cataract Refract Surg*. 2011;37:2028-33.
- McNeill JI. Flared phacoemulsification tips to decrease ultrasound time and energy in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*. 2001;27:1433-6.
- Zacharias J. Thermal characterization of phacoemulsification probes operated in axial and torsional modes. *J Cataract Refract Surg*. 2015; 41: 208-16.
- Hagan JC 3rd. Irrigation/aspiration handpiece with changeable tips for cortex removal in small incision phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg*. 1992;18:318-20.
- Tuncer S, Altunbaş HH, Gücükoğlu A. İki taraflı İrrigasyon-Aspirasyon Metodunun Fakoemülsifikasyon Cerrahisinde Kullanılması. *TJO*. 2001;31:125-8.
- Öksüz H, Tamer C. Fakoemülsifikasyon Cerrahisinde Kapsüloleksis Yapılırken İrrigasyon Elciğinin Ön Kamara Korumucusu Olarak Kullanılması. *Glo-Kat* 2007;2:19-21.
- Sethi HS, Dada T, Rai HK, et al. Closed chamber globe stabilization and needle capsulorhexis using irrigation hand piece of bimanual irrigation and aspiration system. *BMC Ophthalmol*. 2005;5:21.

45. Lundström M, Behndig A, Montan P, et al. Capsule complication during cataract surgery: Background, study design, and required additional care: Swedish Capsule Rupture Study Group report 1. *J Cataract Refract Surg*. 2009;37:1762-7.
46. Clark A, Morlet N, Ng JQ, et al. Long-term trends and outcomes of anterior vitrectomy in Western Australia. *Acta Ophthalmol*. 2015;93:27-32.
47. Kugelberg M, Zetterström C. Pediatric cataract surgery with or without anterior vitrectomy. *J Cataract Refract Surg*. 2002;28:1770-3.
48. Halıcı H, Çilesiz İ, Elçioglu M. Yeni bir fakoemülsifikasyon cihazı tasarımı ve uygulaması. *İTÜ Dergisi*. 2006;5:15-26.
49. Yulan W, Yaohua S, Jinhua T, et al. Step-by-step phacoemulsification training program for ophthalmology residents. *Indian J Ophthalmol*. 2013;61:659-62.
50. Steinert RF, Schafer ME. Ultrasonic-generated fluid velocity with Sovereign WhiteStar micropulse and continuous phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg*. 2006;32:284-7.
51. Chang DF, Davis EA, Kim T. Improving surgical safety with modern phaco technology. *Cataract&Refractive Surgery Today*. 2008;8:30-37.
52. Pacifico RL. Ultrasonic energy in phacoemulsification: mechanical cutting and cavitation. *J Cataract Refract Surg*. 1994;20:338-41.
53. Obazawa H, Oguchi Y. Studies on the influence of various ultrasonic characters on phaco-emulsification effects. II. An experiments on the induced cavitation with ultrasonic vibrating tips. *Nihon Ganka Gakkai Zasshi*. 1970;74:395-401.
54. Zacharias J. Role of cavitation in the phacoemulsification process. *J Cataract Refract Surg*. 2008;34:846-52.
55. Tognetto D, Sanguinetti G, Sirotti P, et al. Visualization of fluid turbulence and acoustic cavitation during phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg*. 2005;31:406-11.
56. Svensson B, Mellerio J. Phaco-emulsification causes the formation of cavitation bubbles. *Curr Eye Res*. 1994;13:649-53.
57. Liu Y, Zeng M, Liu X, et al. Torsional mode versus conventional ultrasound mode phacoemulsification: randomized comparative clinical study. *J Cataract Refract Surg*. 2007;33:287-92.
58. Wang Y, Xia Y, Liu X, et al. Comparison of bimanual and micro-coaxial phacoemulsification with torsional ultrasound. *Acta Ophthalmol*. 2012;90:184-7.
59. Kim DH, Wee WR, Lee JH, et al. The comparison between torsional and conventional mode phacoemulsification in moderate and hard cataracts. *Korean J Ophthalmol*. 2010;24:336-40.
60. Köktekir BE, Aslan BS. Fakoemülsifikasyonda longitudinal ve torsional enerji parametreleri. *Glo-Kat* 2010;5:147-50.
61. Öncel B, Akova Y. Fakoemülsifikasyon Cerrahisindeki Yenilikler. *Türkiye Klinikleri J Ophthalmol-Special Topics*. 2010;3:8-13.
62. Ngo WK, Lim LW, Tan CS, et al. Heat profiling of phacoemulsification tip using a thermal scanning camera. *Int Ophthalmol*. 2013;33:645-9.
63. Fine IH, Packer M, Hoffman RS. Power modulations in new phacoemulsification technology: improved outcomes. *J Cataract Refract Surg*. 2004;30:1014-9.
64. Liu YZ, Cheng B. Phacoemulsification using burst mode. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi*. 2004;40:239-42.
65. Yang J, Lu Y. A clinical report on the use of burst mode phacoemulsification. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi*. 2005;41:27-30.
66. Chakrabarti A, Singh S, Krishnadas R. Phacoemulsification in eyes with white cataract. *J Cataract Refract Surg*. 2000;26:1041-7.
67. Ozkurt YB, Evciman T, Sengor T, et al. Comparison of burst, pulse, and linear modes used in phacoemulsification surgery. *Eur J Ophthalmol*. 2010;20:353-64.
68. Fishkind WJ. The phaco machine: Analysing new technology. *Curr Opin Ophthalmol*. 2013; 24: 41-6.
69. Ayoub MI. Three-phase phacoemulsification. *J Cataract Refract Surg*. 1998;24:592-4.
70. Zanini M, Savini G, Buratto L. Physical principles of phacoemulsification. In: Buratto L, Werner L, Zanini M, Apple DJ, editors. *Phacoemulsification; Principles and Techniques*. 2nd ed. Thorofare, NJ: Slack Inc; Irrigton-Aspiraiton; 2003:155-65.
71. Auffarth GU, Holzer MP, Vissessook N, et al. Removal times and techniques of a viscoadaptive ophthalmic viscosurgical device. *J Cataract Refract Surg*. 2004;30:879-83.
72. Arnold PEP, Arshinoff SA, Fine H. At Issue: venturi vs. peristaltic pumps. *Ocular Surgery News U.S. Edition*. 2003;6:4.
73. Karaguzel H, Karalezli A, Aslan BS. Comparison of peristaltic and Venturi pumps in bimanual microincisional cataract surgery. *Int Ophthalmol*. 2009;29:471-5.
74. Patricio MS, Almeida AC, Rodrigues MP, et al. Correlation between cataract grading by Scheimpflug imaging and phaco time in phacoemulsification using peristaltic and venture pumps. *Eur J Ophthalmol*. 2013;23:789-92.
75. Pablo M. Arregui, MD. Take the Next Step: Convert to Venturi. *Cataract & Refractive Surgery Today*. 2013;3:33-4.
76. Ashwin PT, Shah S, Wolffsohn JS. Advances in cataract surgery. *Clin Exp Optom*. 2009;92:333-42.
77. Helfgott MA. A system for variable aspiration of material dissected from the posterior chamber. *Ophthalmic Surg*. 1984;15:529-30.
78. Abouali O, Bayatpour D, Ghaffariyeh A, et al. Simulation of flow field during irrigation/aspiration in phacoemulsification using computational fluid dynamics. *J Cataract Refract Surg*. 2011;37:1530-8.
79. Ozdemir HG. A long-term follow-up study of different irrigation/aspiration techniques on formation of posterior capsule opacification. *Can J Ophthalmol*. 2007;42:849-51.
80. Colvard DM. Bimanual technique to manage subincisional cortical material. *J Cataract Refract Surg*. 1997;23:707-9.
81. Cernák A, Cuvala J, Trnavec B. et al. Bimanual irrigation/aspiration. *Cesk Slov Oftalmol*. 1999;55:21-3.
82. Sippel KC, Pineda R Jr. Phacoemulsification and thermal wound injury. *Semin Ophthalmol*. 2002;17:102-9.
83. Ernest P, Rhem M, McDermott M, et al. Phacoemulsification conditions resulting in thermal wound injury. *J Cataract Refract Surg*. 2001;27:1829-39.
84. Vasavada AR, Praveen MR, Vasavada VA, et al. Impact of high and low aspiration parameters on postoperative outcomes of phacoemulsification: randomized clinical trial. *J Cataract Refract Surg*. 2010;36:588-93.
85. Han YK, Miller KM. Comparison of vacuum rise time, vacuum limit accuracy, and occlusion break surge of 3 new phacoemulsification systems. *J Cataract Refract Surg*. 2009;35:1424-9.
86. Adams W, Brinton J, Floyd M, et al. Phacodynamics: an aspiration flow vs vacuum comparison. *Am J Ophthalmol*. 2006;142:320-2.
87. Gimbel HV, Chin PK. Phaco sweep. *J Cataract Refract Surg*. 1995;21:493-6.
88. Georgescu D, Payne M, Olson RJ. Objective measurement of postocclusion surge during phacoemulsification in human eye-bank eyes. *Am J Ophthalmol*. 2007;143:437-40.
89. Ward MS, Georgescu D, Olson RJ. Effect of bottle height and aspiration rate on postocclusion surge in Infiniti and Millennium peristaltic phacoemulsification machines. *J Cataract Refract Surg*. 2008;34:1400-2.
90. Wade M, Isom R, Georgescu D, et al. Efficacy of Cruise Control in controlling postocclusion surge with Legacy and Millennium venturi phacoemulsification machines. *J Cataract Refract Surg*. 2007;33:1071-5.
91. Bethke W. Phaco: New Tech, New Techniques. *Review of Ophthalmology*. 2011;3:6.
92. Bayramlar H, Karadağ R, Sarı S, et al. Ön kamara yokluğu veya sığığında katarakt cerrahisi. *TJO* 2014;44:388-91.