

## Çocuklarda kalp ve akciğer desteği

Faruk Cingöz (\*)

### Özet

Yetişkin hastaların acil durumlarında intraaortik balon ilk öncelikle tercih edilirken, ikinci sırada ventriküler yardımcı kalp cihazları kullanılmaktadır. Çocuklarda izole sol ventrikül yetmezliği nadir görülürken, sağ ventrikül yetmezliği pulmoner hipertansiyon ve hipokseminin katkısıyla daha sıklıkla görülmektedir. Bu fizyolojik etkilerden dolayı sol ventrikülün tek başına desteklenmesini sağlayan intraaortik balon pompası ve sol ventriküler yardımcı kalp cihazlarının çocuklarda kullanımı sınırlıdır. Ekstrakorporeal membran oksijenasyonu ise tıbbi tedavinin yetersiz kaldığı vakalarda hem sağ, hem de sol ventrikül desteği sağlar. Bu derlemede çocuklarda, acil kardiyak desteğin sağlanması için ekstrakorporeal membran oksijenasyonu kullanımı üzerinde durulacaktır. Bunun yanı sıra ventriküler yardımcı kalp cihazları ve intraaortik balon pompası konuları da gözden geçirilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Acil, kalp-akciğer desteği, pediatrik

### Summary

**Cardiopulmonary support in children**  
Intraaortic balloon pumping is firstly, and ventricular assist heart devices are secondly used in emergency situations of adults. In children, however, isolated left ventricular failure is rare, and right

ventricular failure with the contribution of pulmonary hypertension and hypoxemia is more common. Due to these physiological effects, the use of intraaortic balloon pumping and left ventricular assist heart devices which provide isolated support of the left ventricle is limited in children. Extracorporeal membrane oxygenation provides biventricular support in cases in whom medical treatment is inadequate. This review will focus on extracorporeal membran oxygenation that are used for emergency cardiac support in children. Ventricular assist heart devices and intraaortic balloon pumping will be reviewed as well.

**Key words:** Emergency, cardiopulmonary support, pediatrics

### Ekstrakorporeal membran oksijenasyonu (ECMO)

*ECMO'nun bileşenleri:* Çocuklarda kullanılan ECMO cihazını oluşturan ana unsurlar, solunum yetmezliği tedavisinde kullanılan cihazlarla pek çok benzerlik gösterir (1-3). Günümüzde pek çok merkez membran oksijenatör, ısıtıcı ve "roller" başlıktan oluşan standart ECMO sistemini kullanmaktadır. Son yıllarda hollow fiber oksijenatörler klinik kullanıma girmesine rağmen, çoğu merkez halen membran oksijenatörü tercih etmektedir (4-6). Ancak hollow fiber oksijenatörler özellikle solunum gazları alışverişindeki mevcut üstünlüğü

ve kolay bir şekilde "prime" solüsyonu hazırlamasını sağlamasından dolayı kardiyak arrest gibi acil olgularda daha çok tercih edilmektedir (7,8). "Roller" başlığın kullanıldığı ECMO'da venöz dönüş hastanın pozisyonuna bağlı yer çekimi kuvveti ile sağlanır. Bu durumda pompanın düzenli çalışması kısmen de olsa hasta ile pompa rezervuarının birbirleri ile olan pozisyonuna bağlıdır. Öyle ki; venöz kan akımı aşırı vakuma bağlı oluşan negatif basınçla kesilebilir. Ancak kontrol mekanizmaya bağlı olarak bir miktar kan rezervuarda uzun süre bekleyebilir ki böylelikle, staz ve müteakiben trombüs formasyonu gelişebilir. Bu problem, günümüzde halen ciddi bir sorun olarak durmaktadır (9).

"Roller" başlığın aksine sentrifügal pompalar venöz kanı yer çekiminden bağımsız olarak alır ve hastanın pompaya göre yüksekliğinin önemi yoktur. Bu özellik sayesinde vücut yüzey ölçümü büyük hastalarda uygun ve yeterli venöz dönüş sayesinde yüksek akım sağlanabilir (10-13).

*Kanıllasyon:* Kanıllasyon yaklaşımında temel esas olan hatların esnek olması ECMO'nun kullanımını kolaylaştırmaktadır. ECMO için gerekli kanıllasyon acil durumun gelişimine

\*GATA Kalp ve Damar Cerrahisi AD

**Ayrı basım isteği:** Dr. Faruk Cingöz, GATA Kalp ve Damar Cerrahisi AD, Etlik-06018, Ankara  
E-mail: fcgingoz@yahoo.com

**Makalenin geliş tarihi:** 28.11.2006  
**Kabul tarihi:** 09.02.2007

göre ya göğüs açılarak ya da periferik vasküler yapılar kullanılarak yapılır. Ameliyattan sonra kardiyak arrest gelişen olgularda göğüs açılarak yapılan kanülasyon çok idealdir ve hızlı davranıldığında hasta için inanılmaz derecede zaman kazanılır. Özellikle yenidoğanlarda ve 1 yaş altı vakalarda sağ internal jugüler ven ve karotid arter kanülasyonu tercih edilir.

**Sol ventrikül dekompresyonu:** ECMO uygulaması sırasında kesinlikle sol ventrikül distansiyonu engellenmelidir. Bunun yanı sıra hastaya ekokardiyografi eşliğinde kardiyak kateeterizasyon laboratuvarında balon atriyal septostomi yapılarak dekompresyon da sağlanabilir (15,16).

**Antikoagülasyon:** Hastaların antikoagülasyon paneli aktive edilmiş pıhtılaşma zamanı (ACT) ile takip edilir. Devamlı heparin infüzyonu ile ACT'nin 80-200 saniye arasında olması trombüs riskini önemli derecede yok eder (2,5,11,12,14,17,18). Trombosit düzeyi 100.000/mm<sup>3</sup> civarında olacak şekilde çalışmalıdır (4). Postoperatif kanama riskinin azaltılması konusunda antifibrinolitik ajanların kullanılması faydalı olabilir (2,19).

**Diğer tedavi başlıkları:** ECMO uygulanırken mümkün olduğunca dopamin gibi kardiyak inotropikler ve milrinon gibi vazodilatörlerin dozu azaltılır, ancak tamamiyle kesilmez (20,21). Genel olarak ventilatör desteği için fraksiyone oksijen %40, solunum sayısı 16/dakika, 5 cm H<sub>2</sub>O' luk PEEP ve 10 cc/kg tidal volüm şeklinde düzenleme yapılır.

**Hastanın destekten ayrılması:** Son verme aşamasında kan akımı tedricen saatler içerisinde 25-40 cc/kg/dk oluncaya kadar azaltılır. Gerekli ise inotrop ve vazodilatörler uygun dozlara çıkarılır. Arteriyel ve venöz hatlara klemp konur ve hasta stabil hale gelinceye kadar 15-20 dakikada bir antikoagülasyon verilmek suretiyle beklenir.

**Endikasyonlar:** Boston Çocuk Hastanesi tarafından, 67 hastadan oluşan 10 yıllık ECMO uygulanmış hastalara ait bilgiler yayınlanmıştır (2). Bu yayına göre hastaların büyük kısmında siyanotik kalp hastalığı vardır. Yüzde 33 hastada artmış ve %25 hastada azalmış pulmoner kan akımı vardır. Walters ve ark.nın serisinde postkardiyotomili hastalar çoğunlukta olup, bunların %20'sinde komplet atriyoventriküler defekt, %15'inde kompleks tek ventrikül, %14'ünde Fallot tetralojisi olduğu bildirilmiştir (22). Meliones ve ark., %24 soldan sağa şant, 22%'inde azalmış ve %17 hastada artmış pulmoner kan akımlı siyanotik hastalardan oluşan çalışmasını yayınlamışlardır (23).

Endikasyonlar ECMO'nun preoperatif veya postoperatif kullanımına göre değişiklik gösterir. Ancak kesin olarak şu söylenebilir ki, ECMO, hipoksi ve pulmoner hipertansiyonu olan hastalarda ameliyat öncesi (3,24), postoperatif dönemde ise kardiyopulmoner "by-pass"dan ayrılamama ve düşük kardiyak outputun devamı halinde veya kardiyak arrest gelişen olgularda esas endikasyonu oluşturur (10-14,17,18,22,25-27).

**Kontrendikasyonlar:** Genel olarak tedavisi mümkün olmayan maligniteler, ileri derecede multiorgan yetmezliği, prematürite ve belirgin serebral sistem hasarının varlığı ECMO için mutlak kontrendikasyon oluşturur (2,11,22,26). Ayrıca transplantasyon listesine alınması uygun olmayan hastalar ECMO adayı olarak değerlendirilmezler (11). Neonatal dönemde şant uygulanmış hipoplastik sol kalp sendromu bulunan tek ventriküllü olgular buna örnek olarak verilebilir (2,22,27).

**Sonuçlar, mortalite ve morbidite faktörleri:** Yayınlara göre ECMO desteğinden ayrılma oranı %45-80 ve hastane mortalite oranı %22-70 arasında bildirilirken (2,5,10-14,17,18,

22,25-29), en önemli morbidite faktörü olarak böbrek yetmezliği saptanmıştır (2,5,11,22,23). Ayrıca kalp yetmezliği, çoklu organ yetmezliği, ağır nörolojik lezyonlar bilinen en önemli mortalite nedenleridir (2,12,23,27,28). Pediatrik hastalarda ECMO'dan yeterli fayda sağlanması isteniyorsa düşük kardiyak debi gelişir gelişmez ve süre uzatılmadan, ECMO kurulmalı ve ventriküler fonksiyonun hızlıca iyileştirilmesi amaçlanmalıdır. ECMO'nun kurulması ile miyokardiyal perfüzyon, santral sinir sistemi ve visseral organ perfüzyonları düzelir.

**ECMO'nun özel amaçlar için kullanımı**

**Kardiyopulmoner arrestte ECMO'nun resüsitasyon amaçlı kullanımı:** Kardiyak arrest, pediatrik ECMO için yaygın bir endikasyondur (25). Değişik araştırmacılar kardiyopulmoner arrest gelişmiş ve rutinde yapılan tedavi yöntemlerine cevap vermeyen pediatrik hastalarda kolay kurulabilen, etkili ECMO sistemlerini geliştirmeye çalışmaktadır (8,30,31).

**Miyokarditli hastalarda ECMO'nun kullanılması:** Bu tip hastalarda endikasyon, yoğun bakımdaki hastaların medikal tedaviye verdiği klinik cevaba göre konmalıdır. Miyokarditli çocuklarda mekanik dolaşım desteği sonrası yaşama oranı yüksek oranlarda olarak bildirilmektedir (10,32-37). ECMO ile (12) ve ventriküler yardımcı kalp cihazı (VAD) desteklenen viral miyokarditli 15 hastanın değerlendirildiği çok merkezli çalışmada (3), %80 seviyelerinde yaşam oranı bildirilmiştir (38). Bu yayında, ECMO periferik kanülasyonla göğüs boşluğunu intakt bırakarak yapılabilesinden dolayı acil durumlarda VAD'ından daha iyi bir seçenek olarak bildirilmiştir. Önceleri akut miyokarditli çocukların büyük bir kısmında dilate kardiyomyopatinin devam ettiği, sonuçta bu hastaların

kardiyak transplantasyona ihtiyaç duyacakları düşünülürdü (39,40). Mekanik desteğin haftalar hatta aylarca uygulanmış genç yetişkinlerde ventriküler fonksiyonların normale döndüğü bildirilmektedir (41,42). Hatta mekanik destek süresi haftalar ve aylarca süren olgularda ventriküler fonksiyonlar geriye dönerek hasta için kalp nakline gerek kalmayabilir. Bu arada şunu da vurgulamak gerekir ki; pulsatil parakorporeal veya implantable VAD'lar bugün Avrupa'da pediatrik hastalarda uzun süre gerekli mekanik destek sağlamak için kullanılmış, etkinlikleri ve güvenilirlikleri ortaya konmuştur (43,44).

*ECMO hastalarında transplantasyon:* ECMO desteği pediatrik hastalarda transplantasyona zaman kazandırmak amaçlı kullanılabileceği gibi, transplantasyon işlemi sonrası, özellikle yüksek pulmoner hipertansiyon varlığında veya rejeksiyon atakları döneminde kullanılabilir. Frazier ve ark., Arkansas Çocuk Hastanesi'nde 17 hastalık serilerini yayınlamışlardır (35). ECMO desteği ile 15 hasta yaşatılabildiği, bunlardan 12 tanesine kalp nakli uygulanırken 3 hastada kendiliğinden iyileşme olduğu saptandığı, 2 hastanın ise kalp beklerken ECMO desteği altında kaybedildiği bildirilmektedir. ECMO uygulama zamanı ortalama 269 saat olarak bildirilmiştir (35).

Ağır seyreden akut rejeksiyon ataklarında ciddi kardiyak fonksiyonlarda meydana gelebilecek bozukluğu engellemek için ECMO kullanılabilir ve rejeksiyon tedavisi bitimine kadar geçici olarak hayat kurtarıcı anlamda görev yapabilir (45,46).

### **Ventriküler yardımcı cihazlar**

Bugün Amerika Birleşik Devletlerinde dolaşım desteği amacı ile halen ECMO ve sentrifügal VAD'ler çocuk yaş grubunda sıklıkla kullanılmaktadır (2). Bu nedenle bu bölümde VAD olarak sıklıkla kullanılan

Bio-Pump (Medtronic Bio-Medicus, Minneapolis, MN) üzerinde durulacaktır.

*Sentrifügal VAD'nin akut kardiyak yetmezliklerde kullanımı*

*Teknik destek ve idame:* Çocuklarda bugüne kadar en yaygın kullanılan VAD, sentrifügal özellikte olan Bio-Pump'dır. Bio-Pump pompa başlığı içerisinde koni şekilli pervane vasıtası ile manyetik bir alanda girdaplar oluşturarak gerekli akımı sağlar. Pervane vakum sistemi ile kanı pompanın baş kısmından alarak yumuşak bir eğim ile akıma dik açılı bir şekilde pompalar. Sistem herhangi bir yerde kapak içermez. Prime solüsyonu olarak 100 cc serum kullanılır ki; ECMO'da 300 cc kullanılmasına göre oldukça azdır (2,8). Pompanın "inflow" kısmı oldukça kısadır ve venöz sisteme yerleştirilir, "outflow" kısmı ise direkt aorta ile anastomoz edilir. Pompa venöz ve arteriyel tarafta basınç sensörleri ile sistemde oluşan değişiklikleri saptayarak reaksiyon gösterir (47-49). Bio-Pump ayrı ayrı olarak sağ ve sol ventrikülü desteklemek amaçlı kullanılabileceği gibi, her iki ventrikülü desteklemek için aynı zamanda kullanılabilir. Ancak pediatrik hastalarda çoğunlukla sol ventrikül destek amaçlı kullanılır (47-49). Tek ventriküllü hastaların ameliyatından sonra (Norwood) gerekli VAD desteği sağ atriyum ile asendan aorta arasında kurularak sağlanır. Böylece hem pulmoner hem de sistemik kan akımı tek VAD vasıtası ile sağlanmış olur. Bir nevi çift ventrikül desteği kurulmuş gibidir. Ayrıca hastanın kendi akciğerinin oksijenatör olarak kullanıldığı ECMO sistemi kurulmuş olarak da değerlendirilebilir (50).

Karl ve Horton tarafından VAD'ye ihtiyaç duyan pediatrik hastaların büyük çoğunluğunun konjenital kardiyak defekt tamirinden sonra pompadan ayrılamayanlar olduğu bildirilmiştir (47). Aşağıdaki kriterler

sağ ventrikül yetmezliği açısından gerekli bilgileri verir ve hastanın sol VAD'ı iyi bir şekilde tolere edeceğini açıklar.

1. Sağ atriyal basıncın 12 mm Hg'den az olması
2. Sistolik pulmoner arter basıncın, arteriyel kan basıncının yarısından daha az olması
3. Sağ ventriküler dilatasyonun bulunmaması
4. Asid baz dengesizliğinin olmaması
5. Kan gazlarının normal sınırlarda kalması

VAD kurulmasına rağmen sağ ventrikül yetmezliği bulgularının gözlenmesi ve bunun hiperventilasyona ve nitrik oksid tedavisine cevap vermemesi halinde, hastaya ECMO desteği uygulanması uygun olarak değerlendirilmektedir (47,49).

Sentrifügal VAD uygulanmış çocuklarda hastanın tedavisi ve idamesi oldukça basittir. ACT, 140-150 saniye civarında idame edilirken, inotropolar ventrikülleri desteklemek amacı ile ihtiyaç duyulan en düşük seviyeye getirilir. Serbest plazma hemoglobini günlük olarak ölçülür ve 60 mg/dL'nin altında tutulmaya çalışılır.

*Pediatrik hastalarda VAD'lerle ilgili klinik deneyimler:* Bio-Pump'ın sol ventrikülü desteklemek amaçlı kullanıldığı olgularda yaşama şansı %40-70 olarak bildirilmiştir (2,51-54). Bu bilgiler Melbourne Royal Çocuk Hastanesi tarafından 1988-1998 yılları arasında toplam 53 pediatrik hastadan elde edilmiştir. Hastaların yaş ortalaması 3.5 ay, ağırlıklarının ortalaması ise 4 kg civarında olarak bildirilmiştir (47).

Yukarıdaki bilgilerden anlaşılıyor ki; infant ve küçük çocuklarda gerekli mekanik desteğin ECMO ile daha iyi sağlandığının bildirilmesine rağmen, Melbourne grubu, Bio-Pump kullandıkları infantlarda ve ağırlıkları 6 kilonun [ortalama yaş 60 gün (2-258); ortalama ağırlık 3.7 kg (1.9-

5.98)] altındaki hastalarda, %63'lük grubun VAD'den ayrılırken, %31'inin hastaneden taburcu edildiğini bildirmişlerdir. Boston grubu 29 hastaya uyguladıkları 32 Bio-Pump olgusunu bildirilmişlerdir. Bu hastaların %75'ine sol VAD, 6'sına sağ VAD ve 2'sine her iki ventriküler destek uygulanmıştır (2). Hastaların 2/3'ü başarılı bir şekilde VAD'den ayrılırken, bunların %40'ı hastaneden taburcu edilmiştir. Bu oranlar, ECMO oranlarına çok yakındır. Bu makalede, pulmoner arter kaynaklı koroner arter anomallileri ve kardiyomiyopatilerin büyük çoğunluğu oluşturduğu bildirilmiştir. İlave olarak bu hastalarda hayatta kalma oranları (%71), diğer hasta grubuna göre (%60) daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Kanama en sık karşılaşılan komplikasyon olarak bildirilirken, ECMO grubuna göre santral sistem komplikasyonları belirgin bir şekilde daha az oranda saptanmıştır. Erken dönem böyle olmasına rağmen uzun dönemde ECMO desteği uygulanmış hastalarda, VAD uygulananlara göre nörolojik fonksiyonlarda daha fazla bozukluk olduğu da saptanmıştır (55,56). Oksijenatörün ve uzun tüp sisteminin varlığı serebral embolik olaylara neden olan partiküllere yol açmasının yanı sıra, VAD için kullanılan dozlardan daha yüksek antikoagülasyon kullanıldığı için serebral kanamalara da doğal olarak daha sık neden olur. İlave olarak; pediatrik yaş grubun tamamında sentrifügal VAD kullanımının mümkün olduğunu bildiren çalışmalar vardır (5,28,49,51-54,57-60).

### İntraaortik balon desteği (IABP)

*Genel yaklaşım ve hasta bakımı:* IABP'nin çocuklarda kullanımı ile ilgili ilk bilgiler 1980 yılında Toronto'dan yayımlanmıştır (61). Bu tarihten sonra çocuklarda IABP'nin kullanılmasını amaçlayan çalışmalar ve klinik kullanımına ait gelişmeler büyük oranda Salt Lake City'de bulu-

nan "Primary Children`s Medical Center" tarafından yapılmıştır (62-67). İABP ventriküler sistolde sönerek, ventrikül önündeki sistolik basınçta azalma ve diyastolde şişerek aort kökünde diyastolik basınçta artma (kontrapulsasyon) tarzında etkisini gösterir. Aort basıncındaki bu değişimler fizyolojik olarak, "afterload"da azalma ve koroner kan akımında düzelme ve artış ile karakterizedir (Tablo I). İABP'nin yetişkinlerdeki iskemik kalp hastalıklarının tedavisindeki etkinliği çok iyi bilinmesine ve tanımlanmasına rağmen, konjenital kalp hastalıklarındaki fizyolojik ve anatomik farklılıklarından dolayı, İABP tedavisi daha az fayda ve daha çok komplikasyona neden olmaktadır (Tablo II, III). İskemik komplikasyonları en aza indirmek için Hawkins ve ark. femoral artere anastomoz edilen PTFE (uç-yan) greftin içerisinden IABP'nin ilerletilmesini önermiş-

lerdir (67,68). Asendan aortanın (69) veya eksternal iliak arterin direkt kanülasyonu IABP'nin yerleştirilmesini kolaylaştırmasına rağmen, IABP'nin perkütan kullanımındaki yetersizlik infant ve küçük çocuklarda IABP'nin kullanımı için ciddi sınırlayıcı faktörlerden biridir.

Çocuklarda mekanik dolaşım desteğine genellikle kardiyopulmoner yetmezlik sonucu sıklıkla gelişen sağ kalp yetmezliği, hipoksemi, pulmoner hipertansiyon vakalarında ihtiyaç duyulur (1,2). IABP, bu tür vakalarda girişim yollarının sınırlı olması yanı sıra, sol ventrikül yetmezliği bulunan olgulardaki kadar da etkili değildir. Pediatrik vakalarda günümüzde kullanılan balon hacimleri, 2.5, 5.0, 7.0, 12.0 ve 20 cc, çap olarak 6-12 mm, uzunluk olarak 10.7-19.4 cm olarak sayılabilir (Datascope Corp., Fairfield, NJ). Doğru balon seçimi çocuğun tahmin edilen stroke volümüne göre ayarlanmalıdır. Uygun balon

**Tablo I.** İntraaortik balon desteğinin fizyolojik etkileri

Parametre	Etki				
Arteriyel basınç	↑	Sistolik basınç	↑	Diyastolik basınç	
Sol ventrikül basınçları	↓	LVESP	↓	LVEDP	
Ventriküler dolum	↓	Preload	↓	Afterload	
Genel kan akımı	↑	Koroner kan akımı	↑	Böbrek kan akımı	
Kalp	↑	CO	↓	PAP	↓LVEDV ↓İş yükü ↓Duvar gerginliği

LVESP: sol ventrikül sistol sonu basıncı, LVEDP: sol ventrikül diyastol sonu basıncı, CO: kardiyak output, PAP: pulmoner arter basıncı, LVEDV: sol ventrikül diyastol sonu hacmi

**Tablo II.** Çocuklarda intraaortik balon desteği kullanımını engelleyen faktörler

Femoral bölgeden sınırlı girişim
Aortanın yüksek kompliyansına bağlı kontrapulsasyonun etkisinde azalma
Yüksek kalp atımı nedeniyle zamanlama ve trigger ayarlama zorluğu
İskemik kalp hastalığının nadir olması
Sağ ventriküler veya çift ventrikül yetmezliğinin daha sık görülmesi

**Tablo III.** Her üç mekanik desteğin avantaj ve dezavantajları

	İntraaortik balon desteği	Ventriküler yardımcı kalp cihazı	Ekstrakorporeal membran oksijenizasyonu
Genel deneyim	-	-	+++
Sistemin basitliği	+++	++	
Kolay kurulum	+	+	++
Sol ventrikül dekompresyonu	++	+++	+
Pulmoner hipertansiyon ve hipoksi üzerine tedavi edici etki	-	-	+++
Yenidoğanda çift ventrikül desteği	-	+	+++

volümü çocuğun normal atım volümünün %40-60 kadarı olmalıdır.

Sonuç olarak biventriküler destek ECMO ya da her iki ventriküle yerleştirilmiş ventriküler yardımcı kalp cihazı (BVAD) ile sağlanabilirken yenidoğanlarda ve vücut yüzey alanı küçük çocuklarda, her iki ventrikül desteği uygun VAD olmadığından ECMO ile sağlanmak zorundadır. ECMO'nun kurulması için yalnızca 2 adet kanülasyon gerekirken, BVAD için 4 adet kanülasyon gerektiği de unutulmamalıdır.

#### Kaynaklar

- 1- Duncan BW. Mechanical circulatory support for infants and children with cardiac disease. *Ann Thorac Surg* 2002; 73: 1670-1677.
2. Duncan BW, Hraska V, Jonas RA, et al. Mechanical circulatory support in children with cardiac disease. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999; 117: 529-542.
3. Trittenwein G, Furst G, Golej J, et al. Preoperative ECMO in congenital cyanotic heart disease using the AREC system. *Ann Thorac Surg* 1997; 63: 1298-1302.
4. Del Nido PJ. Extracorporeal membrane oxygenation for cardiac support in children. *Ann Thorac Surg* 1996; 61: 336-339.
5. Langley SM, Sheppard SB, Tsang VT, et al. When is extracorporeal life support worthwhile following repair of congenital heart disease in children? *Eur J Cardiothorac Surg* 1998; 13: 520-525.
6. Saito A, Miyamura H, Kanazawa H, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for severe heart failure after Fontan operation. *Ann Thorac Surg* 1993; 55: 153-155.
7. Willms DC, Atkins PJ, Dembitsky WP, et al. Analysis of clinical trends in a program of emergent ECLS for cardiovascular collapse. *ASAIO J* 1997; 43: 65-68.
8. Jacobs JP, Ojito JW, McConaghey TW, et al. Rapid cardiopulmonary support for children with complex congenital heart disease. *Ann Thorac Surg* 2000; 70: 742-750.
9. Hirschl RB. Devices. In: Zwischenberger JB, Bartlett RH (eds). *ECMO: Extracorporeal Cardiopulmonary Support in Critical Care*. Ann Arbor:

Extracorporeal Life Support Organization, 1995: 150-190.

10. Black MD, Coles JG, Williams WG, et al. Determinants of success in pediatric cardiac patients undergoing extracorporeal membrane oxygenation. *Ann Thorac Surg* 1995; 60: 133-138.
11. Dalton HJ, Siewers RD, Fuhrman BP, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for cardiac rescue in children with severe myocardial dysfunction. *Crit Care Med* 1993; 21: 1020-1028.
12. Kanter KR, Pennington DG, Weber TR, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for postoperative cardiac support in children. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1987; 93: 27-35.
13. Klein MD, Shaheen KW, Whittlesey GC, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for the circulatory support of children after repair of congenital heart disease. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1990; 100: 498-505.
14. Delius RE, Bove EL, Meliones JN, et al. Use of extracorporeal life support in patients with congenital heart disease. *Crit Care Med* 1992; 20: 1216-1222.
15. O'Connor TA, Downing GJ, Ewing LL, et al. Echocardiographically guided balloon atrial septostomy during extracorporeal membrane oxygenation (ECMO). *Pediatr Cardiol* 1993; 14: 167-168.
16. Koenig PR, Ralston MA, Kimball TR, et al. Balloon atrial septostomy for left ventricular decompression in patients receiving extracorporeal membrane oxygenation for myocardial failure. *J Pediatr* 1993; 122: 95-99.
17. Anderson HL, Attori RJ, Custer JR, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for pediatric cardiopulmonary failure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1990; 99: 1011-1021.
18. Raitel RC, Pennington DG, Boegner E, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in children after cardiac surgery. *Circulation* 1992; 86: 305-310.
19. Wilson JM, Bower LK, Fackler JC, et al. Aminocaproic acid decreases the incidence of intracranial hemorrhage and other hemorrhagic complications of ECMO. *J Pediatr Surg* 1993; 28: 536-541.
20. Kinsella JP, Gerstmann DR, Rosenberg AA. The effect of extracorporeal membrane oxygenation on coronary perfusion and regional blood flow distribution. *Pediatr Res* 1992; 31: 80-84.

21. Secker-Walker JS, Edmonds JF, Spratt EH, et al. The source of coronary perfusion during partial bypass for extracorporeal membrane oxygenation (ECMO). *Ann Thorac Surg* 1976; 21: 138-143.
22. Walters HL, Hakimi M, Rice MD, et al. Pediatric cardiac surgical ECMO: multivariate analysis of risk factors for hospital death. *Ann Thorac Surg* 1995; 60: 329-337.
23. Meliones JN, Custer JR, Snedecor S, et al. Extracorporeal life support for cardiac assist in pediatric patients. *Circulation* 1991; 84: 168-172.
24. Hunkeler NM, Canter CE, Donze A, et al. Extracorporeal life support in cyanotic congenital heart disease before cardiovascular operation. *Am J Cardiol* 1992; 69: 790-793.
25. Rogers AJ, Trento A, Siewers RD, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for postcardiotomy cardiogenic shock in children. *Ann Thorac Surg* 1989; 47: 903-906.
26. Weinhaus L, Canter C, Noetzel M, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for circulatory support after repair of congenital heart defects. *Ann Thorac Surg* 1989; 48: 206-212.
27. Ziomek S, Harrell JE, Fasules JW, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for cardiac failure after congenital heart operation. *Ann Thorac Surg* 1992; 54: 861-868.
28. Ferrazzi P, Glauber M, Di Domenico A, et al. Assisted circulation for myocardial recovery after repair of congenital heart disease. *Eur J Cardiothorac Surg* 1991; 5: 419-424.
29. Trento A, Thompson A, Siewers RD, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in children. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1988; 96: 542-547.
30. Duncan BW, Ibrahim AE, Hraska V, et al. Use of rapid-deployment extracorporeal membrane oxygenation for the resuscitation of pediatric patients with heart disease after cardiac arrest. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1998; 116: 305-311.
31. del Nido PJ, Dalton HJ, Thompson AE, et al. Extracorporeal membrane oxygenator rescue in children during cardiac arrest after cardiac surgery. *Circulation* 1992; 86: 300-304.
32. Cofer BR, Warner BW, Stallion A, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in the management of cardiac failure secondary to myocarditis. *J Pediatr Surg* 1993; 28: 669-672.

33. Grundl PD, Miller SA, del Nido PJ, et al. Successful treatment of acute myocarditis using extracorporeal membrane oxygenation. *Crit Care Med* 1993; 21: 302-304.
34. Kawahito K, Murata S, Yasu T, et al. Usefulness of extracorporeal membrane oxygenation for treatment of fulminant myocarditis and circulatory collapse. *Am J Cardiol* 1998; 82: 910-911.
35. Frazier EA, Faulkner SC, Seib PM, et al. Prolonged extracorporeal life support for bridging to transplant. *Perfusion* 1997; 12: 93-98.
36. del Nido PJ, Armitage JM, Fricker FJ, et al. Extracorporeal membrane oxygenation support as a bridge to pediatric heart transplantation. *Circulation* 1994; 90: 66-69.
37. Martin J, Sarai K, Schindler M, et al. Medos HIA-VAD biventricular assist device for bridge to recovery in fulminant myocarditis. *Ann Thorac Surg* 1997; 63: 1145-1146.
38. Duncan BW, Bohn DJ, Atz AM, et al. Mechanical circulatory support for the treatment of children with acute fulminant myocarditis. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001; 122: 440-448.
39. Greenwood RD, Nadas AS, Fyler DC. The clinical course of primary myocardial disease in infants and children. *Am Heart J* 1976; 5: 549-560.
40. Levin HR, Oz MC, Chen JM, et al. Reversal of chronic ventricular dilation in patients with end-stage cardiomyopathy by prolonged mechanical unloading. *Circulation* 1995; 91: 2717-2720.
41. Holman WL, Bourge RC, Kirklin JK. Circulatory support for seventy days with resolution of acute heart failure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1991; 102: 932-934.
42. Levin HR, Oz MC, Catanese KA, et al. Transient normalization of systolic and diastolic function after support with a left ventricular assist device in a patient with dilated cardiomyopathy. *J Heart Lung Transplant* 1996; 15: 840-842.
43. Konertz W, Hotz H, Schneider M, et al. Clinical experience with the MEDOS HIA-VAD system in infants and children. *Ann Thorac Surg* 1997; 63: 1138-1144.
44. Stiller B, Dahnert I, Weng Y, et al. Children may survive severe myocarditis with prolonged use of biventricular assist devices. *Heart* 1999; 82: 237-240.
45. Galantowicz ME, Stolar CJH. Extracorporeal membrane oxygenation for perioperative support in pediatric heart transplantation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1991; 102: 148-152.
46. Delius RE, Zwischenberger JB, Cilley R, et al. Prolonged extracorporeal life support of pediatric and adolescent cardiac transplant patients. *Ann Thorac Surg* 1990; 50: 791-795.
47. Karl TR, Horton SB. Centrifugal pump ventricular assist device in pediatric cardiac surgery. In: Duncan BW (ed). *Mechanical Support for Cardiac and Respiratory Failure in Pediatric Patients*. New York: Marcel Dekker Inc., 2001: 21-47.
48. Pennington DG, Swartz MT. Circulatory support in infants and children. *Ann Thorac Surg* 1993; 55: 233-237.
49. Karl TR. Extracorporeal circulatory support in infants and children. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 1994; 6: 154-160.
50. Darling EM, Kaemmer D, Lawson DS, et al. Use of ECMO without the oxygenator to provide ventricular support after Norwood Stage I procedures. *Ann Thorac Surg* 2001; 71: 735-736.
51. Ashton RC, Oz MC, Michler RE, et al. Left ventricular assist device options in pediatric patients. *ASAIO J* 1995; 41: 277-280.
52. Costa RJ, Chard RB, Nunn GR, et al. Ventricular assist devices in pediatric cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* 1995; 60: S536-538.
53. Karl TR, Sano S, Horton S, et al. Centrifugal pump left heart assist in pediatric cardiac operations. Indication, technique, and results. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1991; 102: 624-630.
54. Scheinin SA, Radovancevic B, Parnis SM, et al. Mechanical circulatory support in children. *Eur J Cardiothorac Surg* 1994; 8: 537-540.
55. Ibrahim AE, Duncan BW, Blume ED, et al. Long-term follow-up of pediatric cardiac patients requiring mechanical circulatory support. *Ann Thorac Surg* 2000; 69: 186-192.
56. Ibrahim AE, Duncan BW. Long-term follow-up of children with cardiac disease requiring mechanical circulatory support. In: Duncan BW (ed). *Mechanical Circulatory Support for Cardiac and Respiratory Failure in Pediatric Cardiac Patients*. New York: Marcel Dekker Inc., 2001: 205-220.
57. Thuys CA, Mullaly RJ, Horton SB, et al. Centrifugal ventricular assist in children under 6 kg. *Euro J Cardiothorac Surg* 1998; 13: 130-134.
58. Kesler KA, Pruitt AL, Turrentine MW, et al. Temporary left-sided mechanical cardiac support during acute myocarditis. *J Heart Lung Transplant* 1994; 13: 268-270.
59. Khan A, Gazzaniga AB. Mechanical circulatory assistance in paediatric patients with cardiac failure. *Cardiovasc Surg* 1996; 4: 43-49.
60. Chang AC, Hanley FL, Weindling SN, et al. Left heart support with a ventricular assist device in an infant with acute myocarditis. *Crit Care Med* 1992; 20: 712-715.
61. Pollock JC, Charlton MC, Williams WG, et al. Intra-aortic balloon pumping in children. *Ann Thorac Surg* 1980; 29: 522-528.
62. Veasy LG, Blalock RC, Orth JL, et al. Intra-aortic balloon pumping in infants and children. *Circulation* 1983; 68: 1095-1100.
63. Minich LL, Tani LY, McGough EC, et al. A novel approach to pediatric intra-aortic balloon pump timing using M-mode echocardiography. *Am J Cardiol* 1997; 80: 367-369.
64. Minich LL, Tani LY, Pantalos GM, et al. Neonatal piglet model of intra-aortic balloon pumping: improved efficacy using echocardiographic timing. *Ann Thorac Surg* 1998; 66: 1527-1532.
65. Minich LL, Tani LY, Hawkins JA, et al. Intra-aortic balloon pumping in children with dilated cardiomyopathy as a bridge to transplantation. *J Heart Lung Transplant* 2001; 20: 750-754.
66. Pantalos GM, Minich LL, Tani LY, et al. Estimation of timing errors for the intra-aortic balloon pump use in pediatric patients. *ASAIO J* 1999; 45: 166-171.
67. Pinkney KA, Minich LL, Tani LY, et al. Current results with intra-aortic balloon pumping in infants and children. *Ann Thorac Surg* 2002; 73: 887-891.
68. Hawkins JA, Minich LL. Intra-aortic balloon counterpulsation for children with cardiac disease. In: Duncan BW (ed). *Mechanical Support for Cardiac and Respiratory Failure in Pediatric Patients*. New York: Marcel Dekker Inc., 2001: 49-60.
69. Akomea-Agyin C, Kejriwal NK, Franks R, et al. Intra-aortic balloon pumping in children. *Ann Thorac Surg* 1999; 67: