

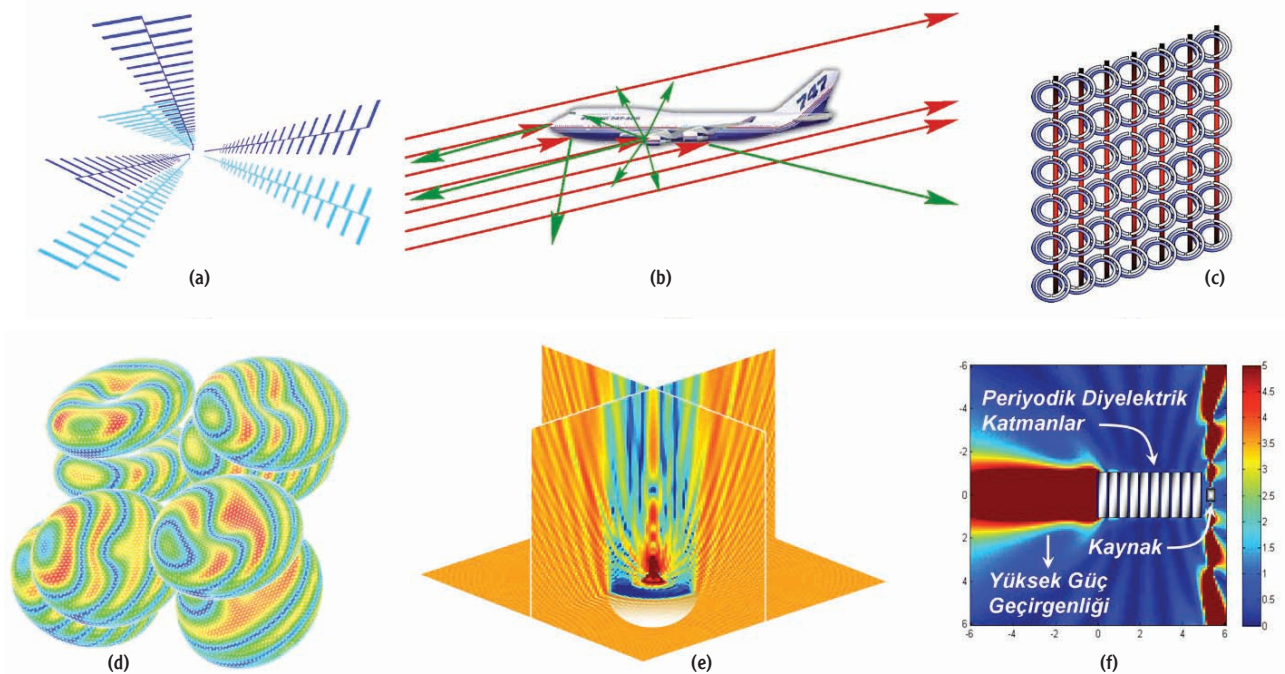
# 135 MİLYON BİLİNMEYEN ÇÖZÜLDÜ!

Son yıllarda, bilişimsel elektromanyetik alanındaki önemli gelişmeler sayesinde çok karmaşık yapılara ait saçılım ve ışınım problemlerinin çözümleri mümkün hale gelmiştir. Bilgisayar ortamında geliştirilen verimli algoritmaların kullanılmasıyla birlikte, çeşitli elektromanyetik problemlerin yüksek hassasiyette çözülebilmesi, başta mühendislik, tıp ve biyoloji olmak üzere birçok alanda yeni fırsatları da beraberinde getirmektedir. Gerçek yaşamda karşımıza çıkan ve çözümleri bilimsel ve teknik açıdan yararlı olan pek çok elektromanyetik problem bulunmaktadır (şekil 1). Henüz tasarım aşamasında olan cihazların çevre ve insan yaşamı üzerindeki elektromanyetik etkilerinin incelenmesi, yeni anten tasarımlarının verimlilik analizleri,

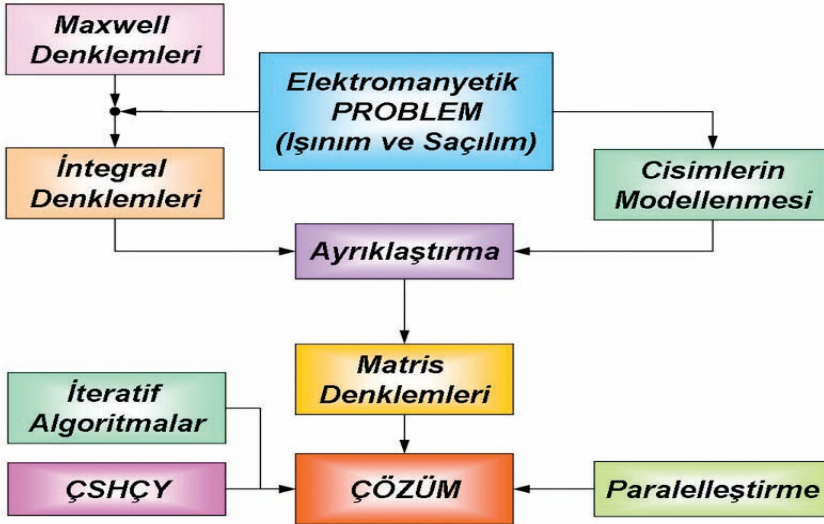
radar sistemlerindeki çeşitli senaryoların benzetimleri ve nano-optik görüntüleme sistemlerinin çözünürlüklerinin artırılması, bilişimsel elektromanyetik sayesinde elde edilen sayısız olanaklar arasında sadece birkaç örnektir.

Öte yandan, gerçek yaşam problemlerinin yüksek doğrulukta çözümlerini elde etmek her zaman kolay değildir. Fiziksel olayların bilgisayar ortamında sayısallaştırılmaları sonucunda matris denklemleri elde edilir. Gerçek yaşam problemlerinden türetilen matris denklemlerinin boyutları ise çok büyük olabilmektedir. Bu denklemlerin çoğunun doğrudan yöntemlerle çözümleri, günümüzdeki en gelişmiş bilgisayarların kullanılmasıyla bile mümkün değildir. Bu yüzden, bi-

lişimsel elektromanyetik alanındaki araştırmaların birçoğu verimli algoritmaların geliştirilmesi konusuna yoğunlaşmıştır. Bu doğrultuda atılan en önemli adımlardan bir tanesi de Temmuz 2008'de Bilkent Üniversitesi Bilişimsel Elektromanyetik Araştırma Merkezi'nde (BiLCEM) sonuçlarını vermiştir. Geliştirilen akıllı algoritmaların paralel bilgisayar kümeleri üzerinde çalıştırılmasıyla birlikte, 135 milyon bilinmeyenli integral denklemlerinin çözümleri gerçekleştirilmiştir. Tarihteki en büyük integral denklemlerini çözebilmesine ek olarak, BiLCEM'de geliştirilen benzetim ortamı, pek çok değişik disiplinde ihtiyaç duyulan önemli bilgilerin elde edilebilmesi için gerekli kabiliyetlere de sahip durumdadır.



Şekil 1. Gerçek yaşamda karşımıza çıkan elektromanyetik problemlere çeşitli örnekler. (a) Anten tasarımları, (b) hava taşıtlarından saçılım ve radarda görüntüleme, (c) metamaterialler, (d) tıbbi görüntüleme (kırmızı kan hücreleri), (e) optik görüntüleme sistemleri, (f) frekans seçici yapılar ve filtreler.



Şekil 2. Çok büyük ve karmaşık elektromanyetik problemlerin hızlı ve yüksek doğrulukta çözümleri için BiLCEM'de kurulan benzetim ortamı. Terimlerin açıklamaları terimler sözlüğünde verilmiştir.

## İntegral Denklemleri ve Ayrıklaştırma

Çok büyük ve karmaşık elektromanyetik problemlerin hızlı ve yüksek doğrulukta çözümleri için BiLCEM'de kurulan benzetim (simülasyon) ortamı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu benzetim ortamında ele alınan ışınım ve saçılım problemlerinin formülasyonları için integral denklemleri kullanılmıştır. Elektromanyetik olayların incelenmesinde hassas sonuçların elde edilebilmesi için tercih edilen integral denklemleri, Maxwell denklemlerinin problemlere doğrudan ve herhangi bir yaklaşım yönteme başvurmadan uygulanmalarıyla türetilmektedirler. Bu denklemlerin karmaşık yapılar üzerinde kullanılabilmesi için bilgisayar ortamında sayısal olarak ifade edilmeleri, yani sayısallaştırılmaları gerekmektedir. Öncelikle, problem geometrileri üzerinde ayrıklaştırma işlemleri uygulanır. Cisimlerin yüzeyleri, yeterince küçük elemanlara (örneğin, üçgenlere) bölünerek modellenir. Şekil 3'te bir F-16 geometrisi üzerinde gösterildiği gibi, hedeflerin ayrıklaştırılmasında binlerce, hatta milyonlarca ayrıklaştırma elemanına ihtiyaç duyulabilmektedir, çünkü çözüm yapılan frekanslardaki elektromanyetik etkileşimlerin doğru olarak hesaplanabilmesi için, kullanılan üçgenlerin dalgaboyuna göre küçük olmaları gerekmektedir. Gerçek hayatta karşımıza çıkan problemlerdeki hedeflerin pek çoğu dalgaboyu cinsinden çok büyük olduklarından, bunların yüksek doğrulukta benzetimleri için çok sayıda üçgenin kullanıldığı modeller gerekmektedir.

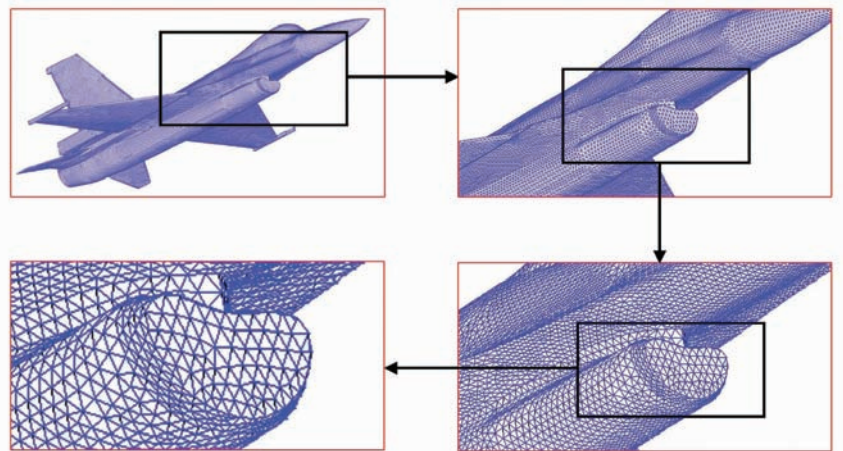
## Milyonlarca Bilinmeyenli Denklemler

Ayrıklaştırılmış geometriler üzerinde integral denklemlerinin uygulanmasıyla birlikte matris denklemleri elde edilmektedir. Her bir ayrıklaştırma elemanı (üçgen), matris denkleminde bir bilinmeyene karşılık geldiğinden, gerçek yaşam problemleri için türetilen matris denklemlerinin boyutları da milyonlarca ifade edilebilmektedir. Bir başka deyişle, milyonlarca bilinmeyenli denklemlerin çözümleri gerekmektedir. Bu aşamada her ne kadar devreye bilgisayarlar girse de, geçmişten beri bilinen yöntemlerle bu kadar büyük denklemlerin çözümleri mümkün değildir. Tıpkı insanoğlunun kâğıt ve kalem kullanarak en fazla onlarca bilinmeyenli problemi çözebilmesi gibi, elimizdeki en iyi donanımlı bilgisayarların kullanılmasıyla bile doğrudan çözülebilen denklemlerdeki bilinmeyen sayısı birkaç bini geçmemektedir.

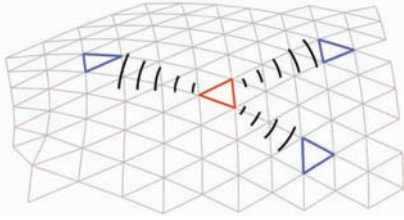
Elektromanyetik benzetimler için milyonlarca bilinmeyenli denklemin çözümüne ihtiyaç duyuluyorken, bilgisayarların göreceli olarak küçük problemlerde bile yetersiz kalması, hızlı ve verimli algoritmaların geliştirilmesini gerektirmiştir. Özellikle, sonuçların hassasiyetinden ödün vermeden sınırlı bilgisayar kaynaklarıyla gerçekçi benzetimlerin nasıl yapılacağı uzun yıllardır araştırılmaktadır. Bu bağlamda ortaya çıkan en etkin algoritmalarından bir tanesi de 1997 yılında Illinois Üniversitesi'nde geliştirilen çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemidir (ÇSHÇY). Bu yöntemin çok ileri bir versiyonu da BiLCEM'de geliştirilmiş olup, kurulan simülasyon ortamının belkemiğini oluşturmaktadır.

## İteratif Çözümler

Elektromanyetik problemlerin çözümünde ÇSHÇY'nin uygulanabilmesi için öncelikle iteratif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü ÇSHÇY tek başına bir çözücü değil, matris-vektör çarpımlarını çok hızlı hesaplayabilen bir algoritmadır. İteratif yöntemler ise matris denklemlerini çözmekte kullanılırlar, ancak çözümleri gerçekleştirebilmek için dışarıdan matris-vektör çarpımlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Tahmin edileceği gibi, iteratif yöntemlerin ihtiyaç duyduğu çarpımlar ÇSHÇY tarafından verimli bir biçimde sağlanabilir. Böylece, ÇSHÇY ile iteratif yöntemlerin birleştirilmesiyle, güçlü ve etkin



Şekil 3. Pek çok gerçek yaşam probleminin modellenmesi için milyonlarca ayrıklaştırma elemanına (üçgene) ihtiyaç duyulmaktadır. Şekilde bir F-16 geometrisinin binlerce üçgenin kullanılmasıyla ayrıklaştırılması gösterilmektedir. Aynı hedefin gerçek radar frekanslarında modellenmesi için ise burada gösterilenden bin kat daha fazla üçgen kullanılmaktadır.



Şekil 4. Ayırıklaştırmada kullanılan üçgenlerin her biri oluşturulan matris denklemlerindeki bir bilinmeyene karşılık gelmektedir. Burada gösterildiği gibi, üçgenler arasında elektromanyetik etkileşimler mevcuttur. Örneğin, kırmızıyla gösterilen üçgen verici anten gibi etrafında elektromanyetik dalgalar yaratır. Bu dalgalar alıcı anten gibi davranan diğer üçgenler tarafından alınıp test edilir.

bir çözüm mekanizması ortaya çıkmaktadır.

Genel olarak, iteratif yöntemler akıllı deneme-yanılma algoritmalarıdır. Örneğin, 135 milyon bilinmeyenli bir denklemin iteratif çözümüne, akıllı bir algoritma kullanarak birkaç yüz denemede ulaşılabilir. İteratif yöntemlerin bu denli güçlü olmaları, karşımıza çıkan problemlerin çözümleri için gerekli ama yeterli değildir. İhtiyaç duyulan denemelerin, yani matris-vektör çarpımlarının da hızlı bir biçimde hesaplanabilmesi gerekmektedir. İşte bu aşamada arzu edilen hızlanma ÇSHÇY tarafından sağlanmaktadır. Bu yöntem sayesinde,  $135.000.000 \times 135.000.000$  boyutlarındaki matrislere ait çarpımlar bile, BiLCEM'in görece mütevazı 64 işlemcili paralel bilgisayarları üstünde dakikalar içerisinde gerçekleştirilebilmektedir. Böyle bir çarpım doğrudan gerçekleştirilseydi, yapılması gereken işlemlerin sayısı yaklaşık  $1,8 \times 10^{16}$  olurdu ki bu kadar büyük sayıda işlemi günümüzde sadece dünyanın en güçlü ve

en pahalı birkaç süper bilgisayarı gerçekleştirebilirdi. Ayrıca, salt matrisi bilgisayar belleğinde tutmak için ihtiyaç duyulan bellek miktarı da yaklaşık 260 petabayt (1 petabayt  $\approx 1,1 \times 10^{15}$  bayt) olurdu ki, halen dünyadaki hiç bir bilgisayarda bu kadar çok bellek mevcut değildir. Oysa ÇSHÇY, çarpımını gerçekleştirdiği matrisin tamamının bellekte tutulmasına bile gereksinim duymamaktadır! BiLCEM'de geliştirilen akıllı iteratif çözümler sayesinde, dünyanın en büyük elektromanyetik problemleri, dünyanın en güçlü bilgisayarları kullanılmadan çözülebilmektedir.

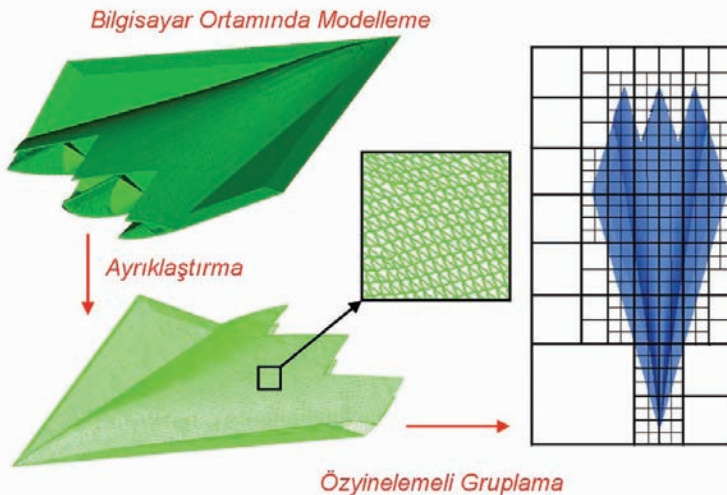
## Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemi

Ayrıklaştırma işlemi sonucunda elde edilen matris denklemlerinde her bir ayrıklaştırma elemanı (üçgen) bir bilinmeyene, matrisin elemanları ise bu üçgenler arasındaki elektromanyetik etkileşimlere karşılık gelmektedir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, geometri üzerindeki her bir üçgen diğer tüm üçgenlerle etkileşim içindedir. Bu yüzden, ayrıklaştırma sonucunda elde edilen matrisler yoğun olmakta, yani bu matrislerin tüm elemanları sıfırdan farklı değerlere sahip olmaktadır. Bu matrislere ait doğrudan matris-vektör çarpımları için ihtiyaç duyulan süre ve bellek miktarı bilinmeyen sayısının karesi ile orantılıdır. ÇSHÇY ise matris-vektör çarpımlarını verimli bir şekilde yapabilmek için etkileşimleri farklı bir biçimde hesaplar. Öncelikle, Şekil 5'te gösterildiği gibi ayrıklaştırılmış olan

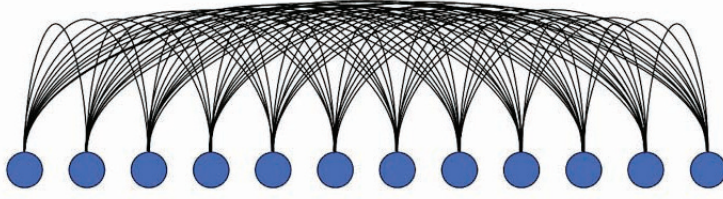
geometri parçalara bölünür. Parçalama işlemine tüm geometriyi içine alan büyük bir kutuyla başlanır, özyinelemeli olarak devam edilir ve belirli bir seviyede durulur. Öyle ki en küçük kutular içinde ortalama 20-30 adet üçgen bulunmaktadır. Böylece, gruplamalar sonucunda çok seviyeli bir ağaç yapısı ortaya çıkar. Böyle bir ağaç yapısı üzerinde çalışan ÇSHÇY, elektromanyetik etkileşimleri gruplar bazında yaparak ihtiyaç duyulan işlem miktarını azaltır.

ÇSHÇY'nin etkileşimleri hesaplamak için kullandığı stratejiyi daha iyi anlamak için Şekil 6'da basitleştirilmiş bir etkileşim senaryosu ele alınmıştır. Mavi renkle gösterilen elemanlar arasındaki etkileşimler doğrudan yapıldığında, elemanlar arasında çok sayıda bağlantıya ihtiyaç duyulmaktadır. Burada her eleman diğerleriyle etkileşmekte olup, kurulan bağlantılar matris-vektör çarpımlarındaki yapılan işlemlere karşılık gelmektedir. Öte yandan, elemanların gruplandırılmasıyla birlikte, etkileşimlerin gruplar bazında yapılması sağlanabilir. Bu durumda, yakın olan elemanlar doğrudan etkileşirken, uzak olan elemanlar arasındaki etkileşimler topluca yapılmaktadır. Kurulan bağlantıların sayısını azaltmak için de gruplar çok seviyeli olarak tanımlanabilir. Örneğin, Şekil 6'da üçerli gruplar arasındaki etkileşimler birinci seviyede yapılırken, altışar elemandan oluşan iki büyük grup arasındaki etkileşim ikinci (üst) seviyede gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak, gruplar bazında yapılan etkileşimler sayesinde, ihtiyaç duyulan bağlantı sayısı, yani işlem sayısı, önemli ölçüde azaltılabilir.

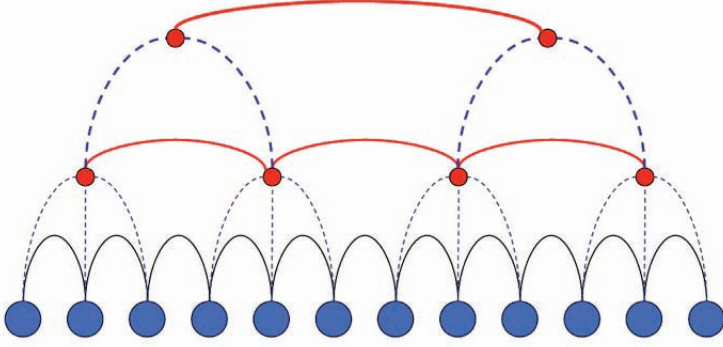
ÇSHÇY'nin kullanılmasıyla birlikte matris-vektör çarpımlarının karmaşıklığı bilinmeyen sayısının karesiyle değil, kendisiyle doğru orantılıdır. Böylece, problemlerin iteratif çözümleri için ihtiyaç duyulan matris-vektör çarpımları çok hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilir. Üstelik, gruplar bazında hesaplanan etkileşimlere karşılık gelen matris elemanlarının önceden hesaplanıp bellekte tutulmalarına da gerek yoktur. Bu sayede, problemlerin çözümleri için gereken bellek miktarı da önemli ölçülerde azalmaktadır. Tüm bu avantajlara rağmen, ÇSHÇY milyonlarca bilinmeyene sahip problemleri çözebilmek için yeterli değildir. Bu problemlerin çözümleri için ÇSHÇY gibi iyi bir algoritmadan fazlasına, paralelleştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5. ÇSHÇY'nin kullanıldığı çözümlerde, üçgenlerle ayrıklaştırılmış olan cisim özyinelemeli gruplama işlemiyle parçalara bölünür. Ortaya çıkan çok seviyeli ağaç yapısı üzerinde çalışan ÇSHÇY, ayrıklaştırma elemanları (üçgenler) arasındaki etkileşimleri gruplar bazında topluca hesaplar.



*Etkileşimlerin Doğrudan Hesaplanması*



*Etkileşimlerin Çok Seviyeli Grublama Yöntemiyle Hesaplanması*

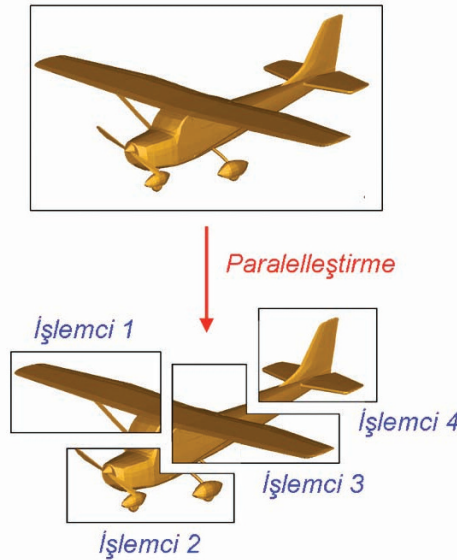
Şekil 6. ÇSHÇY'de etkileşimler farklı seviyelerde ve gruplar bazında gerçekleştirilir. Bu sayede ayrıklaştırma elemanları arasında ihtiyaç duyulan bağlantı sayısı (matris-vektör çarpımlarında gerçekleştirilen işlem sayısı) önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Bu örnekte sadece 12 adet olan elemanların sayısı gerçek yaşam problemlerinde milyonlarca olabilmektedir.

## Parallelleştirme

Parallelleştirme, en genel tanımıyla bir programın birden fazla işlemci üzerinde çalışabilmesi için yeniden uyarlanmasıdır. Buradaki amaç, problemlerin çözümünde aynı anda kullanılan bilgisayar kaynaklarını artırmak ve bu sayede, tek bir işlemci üzerinde kolaylıkla ele alınamayan problemleri çözebilmektir. Çok büyük elektromanyetik problemlerin çözülebilmesi için de ÇSHÇY'nin paralelleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 7'de gösterildiği gibi, ÇSHÇY'nin paralelleştirilmesi için ele alınan problemlerdeki geometriler parçalara ayrılıp işlemciler arasında paylaştırılmaktadır. Böylece, her işlemci problemin belirli bir kısmıyla ilgili hesaplamaları yapmakla görevlendirilmektedir. Öte yandan, elektromanyetik problemlerin çözümlerinin paralelleştirilmesi için, cisimlerin parçalara ayrılması yeterli değildir. İşlemcilerle dağıtılmış olan parçalar arasındaki elektromanyetik etkileşimlerin de hesaplanması gerekmektedir. Bu da, işlemciler arasında bilgi alışverişlerinin, yani haberleşmelerin yapılması anlamına gelmektedir. Parallelleştirmeden sağlanan verimin yüksek seviyelerde tutulabilmesi için bu haberleşmelerin dikkatlice tasarlanması zorunludur. Ayrıca, hesaplamaların işlemciler arasında dengeli bir

biçimde dağıtılması ve işlemciler arasında eşgüdüm sağlanması gerekmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, ÇSHÇY'nin verimli bir şekilde paralelleştirilmesinin son derece zor olduğu anlaşılmaktadır.

BiLCEM'de yürütülen paralelleştirme çalışmalarında, öncelikli olarak literatürde var olan teknikler denenmiştir. Gerçekleştirilen benzetimler sonucunda

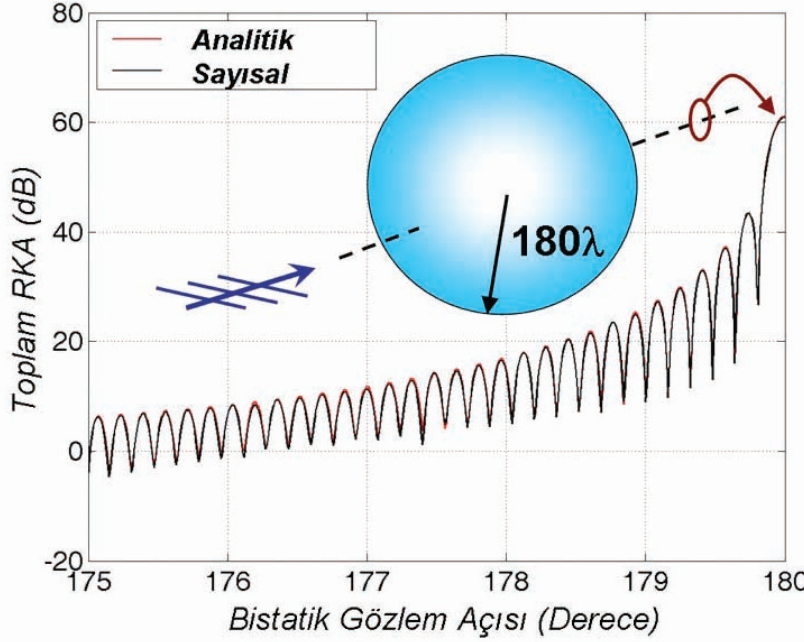


Şekil 7. Parallelleştirme sayesinde elektromanyetik problemlerin çözümleri birden çok işlemci arasında paylaştırılabilir. Ancak, bu problemlerin doğru çözümleri için işlemciler arasında haberleşmelerin yapılması gerekmektedir. Sağda, çok büyük elektromanyetik problemlerin çözümleri için BiLCEM'de kurulan 64 ve 128 çekirdekli bilgisayarlar gösterilmiştir. Her iki sistemde de çekirdek başına 4 gigabyte bellek bulunmaktadır. İşlemciler arasındaki haberleşmelerin yüksek verimle yapılabilmesi için Infiniband ağ anahtarları kullanılmaktadır.

elde edilen verimlilik analizleri incelendiğinde, mevcut paralelleştirme tekniklerinin yetersiz kaldığı ve yeni algoritmalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Bu doğrultudaki teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda da, ÇSHÇY'nin çok seviyeli ve katmanlı yapısına uygun olan sıradüzensel (hierarchical) paralelleştirme tekniği dünyada ilk kez BiLCEM'de geliştirilmiştir. Bu özgün teknik sayesinde, işlemlerin işlemciler arasında yüksek verimle dağıtılması sağlanmış, yapılması gereken haberleşmelerin sayısı azaltılmıştır. Geliştirilen paralel ÇSHÇY programı, yakın zamanda BiLCEM'de kurulan ve Şekil 7'de gösterilen 64 ve 128 çekirdekli iki sistem üzerinde çalıştırılmış, hem literatürde bulunan problemlerin çok daha verimli çözümleri, hem de önceden ele alınamayacak kadar büyük olan problemlerin çözümleri gerçekleştirilmiştir.

Kurulan benzetim ortamında elde edilen sonuçların arzu edilen seviyelerde hassas olup olmadığı anlaşılmaması son derece önemlidir. Bunun için uygulanan yöntemlerden biri de, bazı basit problemlerin çözümlerini gerçekleştirerek hassasiyet analizleri yapmaktır. Örneğin, küreden saçılım problemi, analitik "kağıt kalemle" çözümü mümkün olan ve bu yüzden büyük öneme sahip olan bir problemdir. Gerçekleştirilen hassasiyet analizlerine örnek olarak Şekil 8'de yarıçapı 180 dalgaboyu olan iletken bir küreye ait saçılım probleminin çö-





Şekil 8. Yarıçapı 180 dalgaboyu olan iletken bir küreye ait saçılım probleminin hassasiyet analizleri için çözümleri. Sayısal ve analitik olarak hesaplanan RKA değerleri gözlem açısına bağlı olarak gösterilmektedir. Sayısal çözümler için 135,164,928 bilinmeyenle modellenen bu problem, bu alanda şimdiye kadar çözülmüş olan en büyük integral denklemi problemidir.

zümeleri sunulmuş, bu çok büyük hedefin radar kesit alanı (RKA) değerleri gözlem açısına bağlı olarak incelenmiştir. Problemin sayısal çözümü için 135,164,928 bilinmeyenli matris denklemi oluşturulmuş ve çözülmüştür. Şekilde gösterildiği gibi, paralel ÇSHÇY ile sayısal olarak

hesaplanan değerler analitik değerlerle son derece tutarlıdır. Öyle ki, iki sonuç tam üstüste çıkmış ve kırmızıyla gösterilen analitik sonuç siyahla gösterilen sayısal sonucun altında kalmıştır. Temmuz 2008'de çözülen bu problem, bilişimsel elektromanyetik alanında dünya çapında

## Terimler Sözlüğü

**Ayrıklaştırma:** Süreklilik gösteren fonksiyonların ayrı parçalara ayrılması. Örneğin, elektromanyetik problemlerin sayısal çözümleri için cisimlerin yüzeyleri küçük üçgenlerin kullanılmasıyla ayrıklaştırılır. İntegral denklemlerinin ve cisimlerin aynı anda ayrıklaştırılmaları sonucunda matris denklemleri türetilir.

**Bilişimsel Elektromanyetik:** Canlı ve cansız cisimlerin, birbirleriyle veya içinde buldukları ortamla elektromanyetik etkileşimlerinin bilgisayar ortamında modellenmesine dayalı bilim dalı.

**Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemi (ÇSHÇY):** Elektromanyetik problemlerin iteratif çözümlerinde ihtiyaç duyulan matris-vektör çarpımlarını çok hızlı ve verimli bir biçimde yapabilen bir algoritma.

**Işınım:** Moleküler düzeyde depolanan enerjinin elektromanyetik dalgaya dönüşmesi. Örneğin, verici antenler içinde imlenen elektronlar antenden etrafa yayılan elektromanyetik dalgalar üretirler.

**İntegral Denklemleri:** Bilinmeyen fonksiyonların integral içinde olduğu karmaşık denklemler. Maxwell denklemlerinin ışınım ve sa-

çınım problemlerine uygulanmasıyla integral denklemleri elde edilir.

**İteratif Yöntemler:** Çeşitli denklemlerin çözümlerine ulaşmak için kullanılan akıllı deneme-yanılma yöntemleri. Örneğin, matris denklemlerinin çözümü için kullanılan güçlü iteratif yöntemler mevcuttur.

**Matris Denklemleri:** Birden çok bilinmeyenli problemlerde, bilinmeyenler arasındaki ilişkilerin alt alta yazılmasıyla elde edilen ve matris içeren gösterim biçimi. Örneğin, 2 bilinmeyenli bir problem  $2 \times 2$  matris denklemi şeklinde gösterilebilir.

**Maxwell Denklemleri:** Elektromanyetik dalgaları ve bu dalgaların kaynaklarla olan ilişkilerini tanımlayan ve James Clerk Maxwell tarafından 1861 yılında gösterilen denklemler.

**Radar Kesit Alanı (RKA):** Bir cismin radarda ne kadar gözüktüğünü ifade eden sayısal değer.

**Saçılım:** Çeşitli kaynaklardan yayılan elektromanyetik dalgaların fiziksel cisimlere veya engellere çarpmasıyla yön değiştirmesi. Örneğin, bir radar anteninden yayılan elektromanyetik dalgalar havadaki bir uçağa çarptığında her yöne saçılırlar. Uçağın geometrisine bağlı olarak, saçılım bazı yönlere doğru daha fazladır.

çözülmüş olan en büyük problemidir. Paralel ÇSHÇY ile 64 işlemcili bir paralel bilgisayar üzerinde yaklaşık 5 saatte gerçekleştirilen çözüm için toplam 480 gigabyte bellek kullanılmıştır. Aynı problemin aynı işlemciler üzerinde doğrudan çözümü için gerekli olan terabaytlarca bellek bulunsaydı bile, ki bu olanaksız, çözüm yıllarca sürer ve elde edilen sonuçlar bilgisayarlardaki yuvarlama hatalarının birikmesinden dolayı büyük olasılıkla yanlış olurdu.

## Sonuç

İntegral denklemleri, iteratif algoritmalar, ÇSHÇY, paralelleştirme teknikleri ve paralel bilgisayarlar kullanılarak BiLCEM'de geliştirilen yüksek kabiliyetli benzetim ortamı, çok büyük ve karmaşık yapılara ait elektromanyetik problemlerin verimli ve hassas çözümlerini gerçekleştirebilmektedir. Benzetim ortamının yeni yeteneklerle donatılması ve bu sayede, yakın gelecekte daha büyük ve daha karmaşık problemlerin çözülebilmesi, BiLCEM'de yürütülmekte olan çalışmaların temel amacını oluşturmaktadır. BiLCEM'de bir yandan ülkemizin en güçlü paralel süper bilgisayarları kurulurken, diğer yandan da dünyadaki en güçlü bilgisayar olanaklarıyla karşılaştırıldığında çok mütevazı kalan bu donanımlar üstünde dünyanın en büyük elektromanyetik problemleri çözülmektedir. Bu büyük çözüm kabiliyetinin pek çok disiplinde ülkemize yararlı olabilecek uygulamaları vardır.

Özgür Ergül, Levent Gürel

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilişimsel Elektromanyetik Araştırma Merkezi  
(BiLCEM) Bilkent Üniversitesi  
ergul@ee.bilkent.edu.tr,  
lgurel@ee.bilkent.edu.tr, web:  
www.cem.bilkent.edu.tr

Bu çalışma, TÜBİTAK (105E172 ve 107E136), Türkiye Bilimler Akademisi (LG/TÜBA-GEBIP/2002-1-12), ASELSAN ve SSM tarafından desteklenmektedir.

### Kaynaklar

- J. Song, C.-C. Lu, W. C. Chew, "Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 45(10), 1488-1493, (1997).
- S. Velamparambil, W. C. Chew, "Analysis and performance of a distributed memory multilevel fast multipole algorithm," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 53(8), 2719-2727, (2005).
- L. Gürel, Ö. Ergül, "Fast and accurate solutions of integral-equation formulations discretised with tens of millions of unknowns," *Electronics Lett.*, 43(9), 499-500, (2007).
- Ö. Ergül, L. Gürel, "Hierarchical parallelisation strategy for multilevel fast multipole algorithm in computational electromagnetics," *Electronics Lett.*, 44(1), 3-5, (2008).
- Ö. Ergül, L. Gürel, "Efficient parallelization of the multilevel fast multipole algorithm for the solution of large-scale scattering problems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 56(8), 2335-2345, (2008).