

TERSİNE MÜHENDİSLİK YOLUYLA ÜÇ BOYUTLU GEOMETRİK MODELİN OLUŞTURULMASI VE GEMİ YAPIM ENDÜSTRİSİNDEKİ BAZI UYGULAMALARI

(3D GEOMETRIC MODEL CONSTRUCTION USING REVERSE ENGINEERING AND SOME APPLICATIONS IN SHIPBUILDING INDUSTRY)

Erkan GÜNPINAR¹

ÖZ

Üç boyutlu tarayıcılar veya ölçüm aletleri kullanılarak bir parça veya ürünün nokta bulutu elde edilebilmekte ve tersine mühendislik teknikleri kullanılarak bu parça veya ürünün üç boyutlu geometrik modeli üretilebilmektedir. Bu çalışmada son yıllarda önerilmiş üç boyutlu geometrik modelinin oluşturulmasıyla ilgili bazı teknikler anlatılacak ve bu metodların analizleri yapılacaktır. Bu teknikler nokta bulutundan oluşturulan çözüm ağ modelini küçük ağlara ayrıştırmaktadırlar. Bu küçük ağlar B-spline, küre, silindir gibi daha ileri seviye yüzeyler ile ifade edilmektedirler. Bu makalede ayrıca gemi yapım endüstrisindeki tersine mühendislik uygulamalarından da bahsedilecektir. Gemiler çok büyük boyutta oldukları için daha küçük parçalara ayrılarak üretilmekte ve bu parçalar birleştirilerek gemi elde edilmektedir. Üretilen bu parçaların doğruluk payını artırmak ve gemi yapım zamanını kısaltmak için gemi yapımında tersine mühendislik tekniklerini kullanmak çok önemlidir. Son olarak, tersine mühendislik ile ilgili günümüz problemleri anlatılacak, çözüm önerilerinde bulunulacak ve yapılabilecek yeni araştırmalardan bahsedilecektir. Geometrik model oluştururken B-spline ve küre-silindir gibi geometrik primitif yüzeylerin beraber kullanan hibrit tekniklerin geliştirilmesi modelin kalitesini artıracakı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tersine mühendislik, Bilgisayar-destekli tasarım, Geometrik modelleme, Gemi yapımı

ABSTRACT

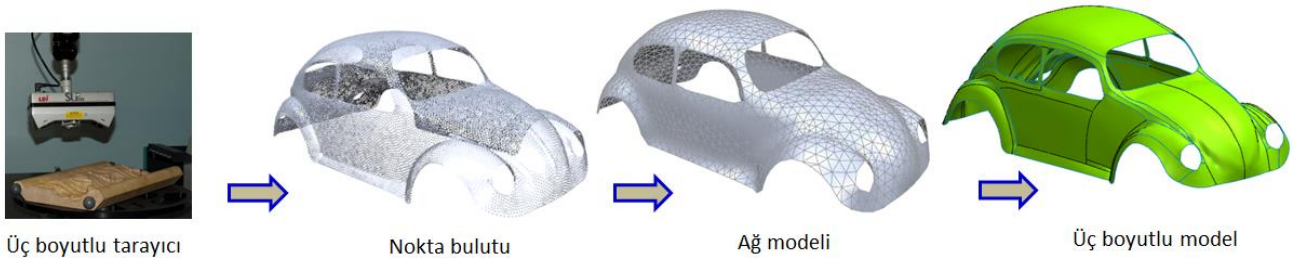
3D geometric model of a part or a product can be generated from scanned point cloud using reverse engineering techniques. In this study, recent 3D model construction techniques are first explained and comparison between these techniques are made. These techniques utilize mesh models as input and segment them into sub-meshes, each of which are fitted with high level geometrical surface entities such as B-spline, sphere and cylinder. Next, some reverse engineering applications in ship building industry are mentioned in this work. Ship is a mega structure, which is builded by assembling small ship parts. Utilizing reverse engineering techniques in shipbuilding is crucial in order to increase accuracy of these small ship parts and decrease the shipbuilding time. Finally, recent reverse engineering problems, their possible solutions and new research directions are outlined. It is believed that hybrid techniques utilizing both B-spline surfaces and geometric primitives such as sphere/cylinder can increase the quality of the generated geometric model.

Keywords: Reverse engineering, Computer-aided design, Geometric modelling, Shipbuilding

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL, gunpinar@itu.edu.tr (sorumlu yazar)

1. GİRİŞ

Konvensiyonel teknikler mühendislik fikir ve konseptlerini gerçek modellere çevirmektedirler. Tersine mühendislikte ise, mevcut bir objenin üç boyutlu geometrik modeli oluşturulmaktadır. Geometrik modelin var olması ve bilgisayara aktarılması bilgisayar destekli tasarım, üretim ve simülasyon olanaklarından faydalanmayı sağlamaktadır. Böylece geometrik model üzerinde değişiklikler yapılarak yeni tasarımlar elde edilebilir. Tersine mühendislik teknikleri gemi, uçak ve otomotiv endüstrileri gibi birçok alanda kullanılabilir. Otomotiv endüstrisinde araba gövde tasarımının ilk aşamalarında da kullanılmaktadır. Tasarımcılar sanal ortamda elde ettikleri araba gövdesini gerçek ölçekte fiziksel olarak görmek isterler. Bu yüzden gövdenin çamur modeli oluşturulur ve bu fiziksel model üzerinde değişiklik yaparlar. Değişiklikler yapıldıktan sonra fiziksel modelin sanal ortama taşınması gerekmektedir. Şekil 1’de araba gövdesinin üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması için aşamalar gösterilmektedir. Öncelikle obje koordinat ölçüm makinaları, lazer ve optik tarayıcılar gibi üç boyutlu tarayıcılar kullanılarak objeye ait nokta bulutu elde edilir. Tarayıcılardan kaynaklı hatalardan dolayı nokta bulutu filtrelenerek, doğruluk payı fazla olan nokta bulutunun elde edilmesi gerekir. Nokta bulutu topoloji (noktalar arası komşuluk ilişkisi) bilgisine sahip değildir. Delaunay üçgen ağlama metodları [1-3] kullanılarak ağ modeli oluşturulur. Sonrasında ağ modeli değişik küçük ağlara ayrıştırılarak, herbir küçük ağ küre, silindir, B-spline gibi ileri seviye geometrik yüzeyler ile ifade edilir. Sonrasında yüzey sınırlarını belirlemek için sınırları belirleme işlemi yapılır ve geometrik model elde edilir.



Şekil 1. Üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması

Bu çalışmada öncelikle üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması için son yıllarda önerilen tersine mühendislik tekniklerinden bahsedilecektir. Bu tekniklerden en çok kullanılan iki temel teknik bulunmaktadır. Birincisi olan geometrik primitif-tabanlı tekniklerde genelde üçgen çözüm ağları kullanılmakta ve bu ağ parçacıklarına ayrılarak düzlemsel, küresel, silindirik yüzeyler gibi primitif yüzeyler ile ifade edilmektedir. İkincisi ise geometrik modeli B-spline yüzeyler ile ifade etmektir. Son 10 yılda önerilen ve kaliteli dörtgen ağ modelleri üreten algoritmalarından [7-14] dolayı B-spline yüzeylerin elde edilmesinde dörtgen ağ model kullanımı tavsiye edilmektedir. Dörtgen ağ modeli elemanları (yüz ve kenarları) model üzerinde maksimum ve minimum eğrilme yönleri gibi modelin lokal özelliklerini daha fazla yansıtmaktadır. Bu yönler kullanılarak dörtgen çözüm ağları elde edildiğinde çözüm ağ elemanları yüzey üzerinde eğrilme yönlerini takip edecek şekilde düzenli bir şekilde dağılırlar. B-spline yüzeylerde bulunan u ve v parametrik yönleri elde edilmiş olur. Bundan dolayı son yıllarda üretilen dörtgen çözüm ağları B-spline yüzeyler ile uyumludur. Bu makale de ayrıca literatürdeki bu tekniklerin zayıf ve güçlü noktalarından bahsedilecektir.

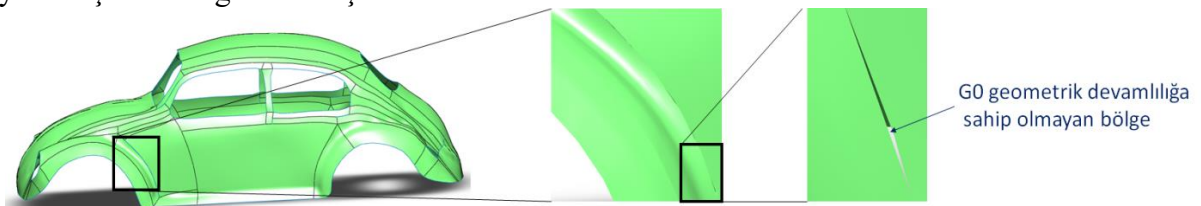
Gemi yapım endüstrisinde tersine mühendislik teknikleri çok fazla kullanılmaktadır. Gemiler çok büyük boyutta oldukları için tek bir parça ile üretilmesi mümkün değildir. Bundan dolayı daha küçük parçalara ayrılarak teker teker üretilmekte ve bu parçalar birleştirilerek gemi elde edilmektedir. Üretilen bu parçalar doğru boyut ve eğriliklerde üretilmediği takdirde parçaların montaj işlemi çok zor olmakta ve zaman almaktadır. Üretimde doğruluk payını artırmak için gemi yapımında tersine mühendislik tekniklerini kullanmak çok önemlidir ve makalede gemi yapımında kullanılan bazı uygulamalar anlatılacaktır. Makalenin son bölümünde ise tersine mühendislik ile ilgili çözülmesi gereken günümüz problemleri anlatılarak, çözüm önerilerinde bulunulacak ve yeni araştırma yönleri üzerinde durulacaktır. Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Literatürde önerilmiş tersine mühendislik teknikleri anlatılarak karşılaştırılacak ve bunların güçlü ve zayıf noktaları açıklanacaktır.
- Literatürdeki tekniklerin her birinde zayıf noktalar bulunduğu için hibrit teknikler ile geometrik model oluşturma yöntemi önerilecektir.
- Gelecekte yapılması gerekli çalışmalardan ve muhtemel araştırma yönlerinden bahsedilecektir.

2. ÜÇ BOYUTLU GEOMETRİK MODELİN OLUŞTURULMASI

Nokta bulutundan üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması işlemi manuel olarak tasarımcılar tarafından yapılabilir. Fakat bu işlem günlerce sürebilmekte ve üretilen model düşük kalitede olabilmektedir. Bunun için bilgisayarın çok değişik model varyasyonlarını deneyerek kısa zamanda kalitesi yüksek modellerin üretilmesi gerekmektedir. Manuel işlem elimine edilerek otomatik olarak modeli üreten algoritmalar literatürde mevcuttur. Bunun için nokta bulutundan sonra elde edilen ağ modelleri kullanılmakta ve bu modeller küçük ağlara ayrıştırılarak her bir ağ geometrik yüzeyler ile ifade edilmektedir. Ayrıştırma işlemi [4-5] ne kadar iyi yapılmışsa, sonraki aşamada giydirilen yüzeyler o kadar kaliteli olacaktır.

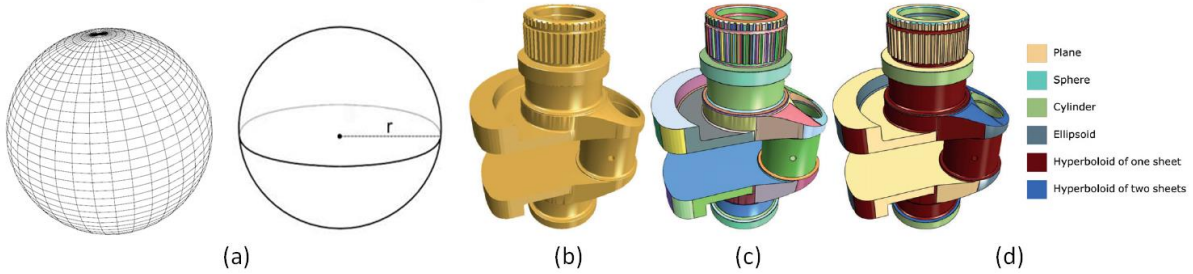
Geometrik model oluşturulurken çözüm ağının ayrıştırılması işlemi için genelde üç temel kriter kullanılmaktadır. Birinci olarak ayrışma sonucunda oluşan küçük çözüm ağları için giydirmeye işlemi yapıldıktan sonra çözüm ağı ve giydirilen geometrik elemanlar arasında oluşacak boşluklar minimum olmalıdır. Yani giydirilen geometrik elemanlar çözüm ağına göre su geçirmez özelliğe sahip olmalıdır. İkinci olarak oluşturulan geometrik modelde $G0$ ve $G1$ geometrik devamlılığının olması çok önemlidir. Bunun için giydirilen yüzeyler ile komşu yüzeylere bakılır. Eğer komşu olan kenarlar birbirine tam oturmamışsa, yani aralarında boşluklar var ise, model $G0$ geometrik devamlılığa sahip değildir. Modelin $G1$ geometrik devamlılığa sahip olabilmesi için giydirilmiş iki komşu yüzeyin aralarındaki noktadaki tanjantlar aynı olmalıdır. Bu kriter sayesinde modelin her noktasında yumuşak geçişler sağlanabilir. Üçüncü önemli kriter ise model minimum sayıda geometrik eleman ile ifade edilmelidir. Fazla sayıda geometrik eleman olması durumunda tasarım aşamasında model üzerinde değişikliklerin yapılması zor olacaktır. Şekil 2'de tersine mühendislik yoluyla oluşturulmuş bir geometrik model gösterilmektedir. Bu modelin komşu yüzeyleri arasında $G0$ geometrik devamlılığına sahip olmayan noktalar bulunmakta ve bu bölgeler şekilde yakınlaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Oluşturulan geometrik modelde $G0$ geometrik devamlılık

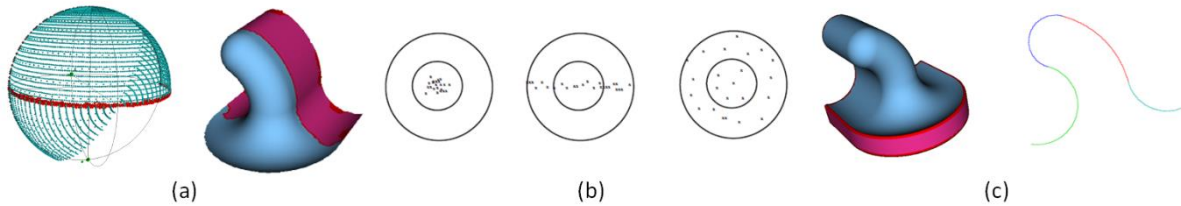
2.1 Geometrik Primitif-tabanlı Geometrik Model Oluşturma:

Üç boyutlu modeli geometrik primitifler ile ifade etmek popüler yöntemlerden bir tanesidir ve literatürde çalışmalar mevcuttur [22-26]. Düzlem, silindir, koni, küre gibi yüzeyler çözüm ağındaki elemanlara göre daha ileri seviye yüzeyler olup, kullanıldığında model daha az sayıda geometrik eleman ile ifade edilebilir. Şekil 3 (a)'da bir kürenin çözüm ağı görünmekte ve toplamda 1600 tane yüz bulunmaktadır ve bilindiği üzere herbir yüz üç noktadan oluşmaktadır. Bu küre primitif yüzeyle ifade edildiğinde bir merkez noktası ve yarıçap ile ifade edilebilir. Bu yüzden primitif yüzeyler ile çözüm ağlarına göre çok daha fazla alan daha az yüzey bilgisi ile ifade edilebilir. Yana vd. (2012) çalışmalarında düzlem, küre, silindir, elipsoid, hiperboloid gibi ikinci dereceli yüzeyler kullanarak modeli ifade etmişlerdir [26]. Şekil 3 (b)'deki model önce küçük yüzeylere ayrıştırılmış (c) ve bu yüzeyler ikinci dereceli yüzeyler ile ifade edilmiştir (d). Modelin küçük bölgelere ayrıştırılması için yeni bir enerji fonksiyonu kullanılmıştır. Lloyd iterasyonları kullanarak bu enerji fonksiyonunun aldığı değer minimize edilmiştir. Enerji fonksiyonu ise ayrıştırılmış bölgedeki noktalar ile giydirilmiş ikinci dereceli yüzey arasındaki mesafe farklarını (hataları) içermektedir.



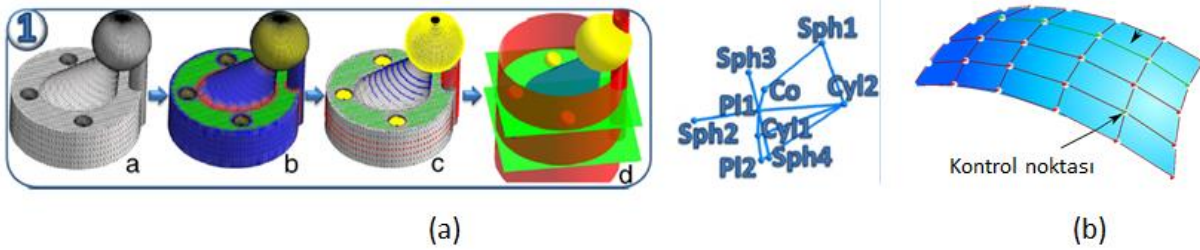
Şekil 3. (a) Küreyi için çözüm ağı (solda) ve primitif yüzey ile (sağda) ifade etme (b, c, d) Model küçük yüzeylere ayrıştırılarak ikinci derece yüzeyler ile ifade edilmiştir [26].

Benko vd. (2002) çalışmalarında nokta bulutunun segmentasyonunu yaparak geometrik primitifler ile ifade etmeyi amaçlamışlardır [23]. Bunun için Gaussian küresini kullanarak herbir primitifi tespit etmişlerdir. Şekil 4 (a)'nın solunda Gaussian küresi gösterilmektedir. Gaussian küresinde modeldeki noktalarındaki birim normal vektörlerin yerleri tespit edilmektedir. Eğer noktaların birim normal vektörleri Gaussian Model üzerinde tek bir noktada veya noktaya yakın bir şekilde bulunuyorsa o bölge düzlemsel bölge veya düzleme yakın bir geometrideki bir bölgedir (bkz. Şekil 4 (b) sol). Eğer bu noktalar Gaussian küresinin üzerinde bulunan bir çemberin üzerinde veya çembere yakın mesafelerde bulunurlar ise, modelde silindirik bir bölgenin varlığını gösterir (bkz. Şekil 4 (b) orta). Eğer noktalar Gaussian küresi üzerinde rastgele dağılmışlar ise, bu bölge küresel bir bölge veya serbest formdur (bkz. Şekil 4 (b) sağ). Şekil 4 (a)'daki modeldeki penbemsı bölge silindirik bölgelerden oluşmaktadır. Çalışmada aynı zamanda Gaussian küre bazlı yön filtreleme ve apex filtreleme gibi teknikler kullanılarak Şekil 4 (c)'nin solunda görülen modeli oluştururken kullanılan ötelenen profil (şeklin sağında) elde edilebilmiştir.



Şekil 4. (a) Gaussian küresi (sol) kullanılarak model segmentasyonu (b) Gaussian küresinde modeldeki noktaların konumlarının iki boyutlu çizimi (c) Modeli oluşturulurken kullanılan öteleme profilinin (sağ) elde edilmesi [23].

Beniere vd. (2013) çalışmalarında modeldeki geometrik primitif yüzeylerini algılayarak oluşturulan geometrik model için aynı zamanda topoloji bilgilerine sahip B-rep modelini üretmiştir. Topoloji bilgileri ile hangi geometrik primitifin hangisine komşu olduğu ve birbirleriyle nasıl bir komşuluk ilişkileri (komşuluk sınırları) olduğu belirlenebilir. Öncelikle çözüm ağındaki elemanların eğrilik değerleri hesaplanır ve gruplandırılır. Şekil 5 (a)'nın soldan ikinci modelde düzlemsel elemanlar yeşil ile, küresel yüzeyler sarı ile, konveks yüzeyler mavi ile ve konkav olanlar kırmızı ile renklendirilmiştir. Bu bölgelerdeki noktalar alındıktan sonra (Şekil 5 (a)'nın sağdan ikinci modelde) bu bölgelere geometrik primitifler (Şekil 5 (a)'nın en sağdaki modelde) giydirilir. B-rep modelini oluşturmak için geometrik primitifler diğer primitifler ile kesişimlerinden kırılır. Komşuluk grafik yapısı kullanılarak geometrik primitifler arasındaki komşuluk ilişkileri kaydedilir. Herbir geometrik primitif bu yapıda bir noddur. Ve bu nodları bağlayan kenarlar iki primitifin komşu olduğunu gösterir. İki primitifin kesişim geometrisi eğriler kullanarak ifade edilir (bkz. Şekil 5 (a) en sağdaki gösterim).

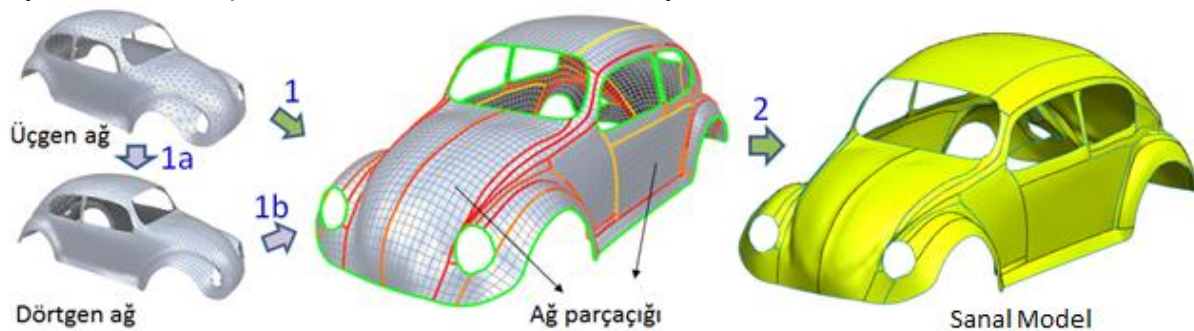


Şekil 5. (a) Beniere vd. (2013)'nin çalışmasındaki geometrik model oluşturma metodolojisi [22]. (b) B-spline yüzey

2.2 B-spline yüzeyler ile Geometrik Model Oluşturma:

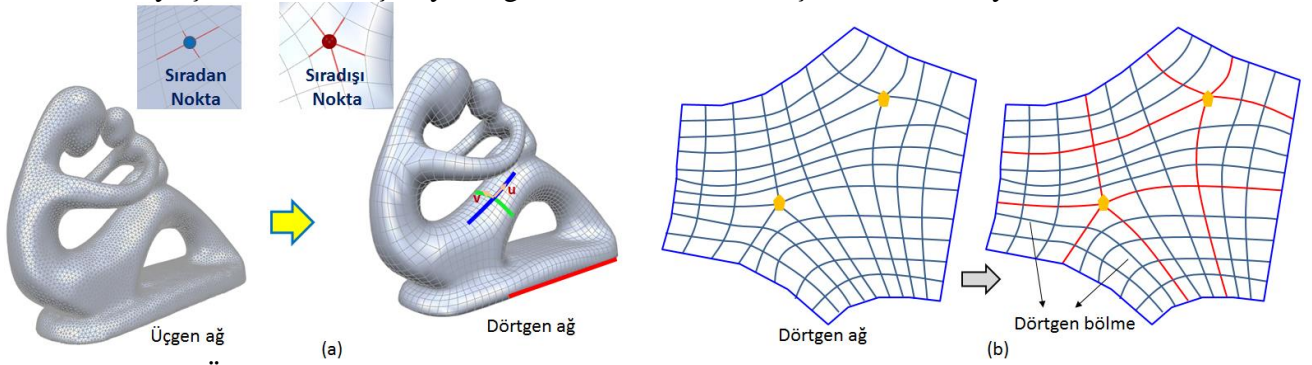
B-spline yüzeyler ile serbest form yüzeyler az eleman ile ve doğruluk payı yüksek olacak şekilde ifade edilebilir. B-spline yüzeyler kontrol noktaları ile ifade edilir ve kontrol noktalarının yerleri değiştirilerek model deforme edilebilir. Bu yolla eğimli yüzeyler ifade edilebilmektedir.

Literatürde üçgen ağdan yüzey oluşturma metodları [6] mevcut olsada, son yıllarda dörtgen ağ modeli daha fazla kullanılmaktadır. Dörtgen ağ modelinin kullanılması üç boyutlu model oluşturma işleminden daha avantajlıdır. Şekil 6'da gösterildiği gibi üçgen ve dörtgen ağ modeli kullanılmak üzere iki yol ile de geometrik modelin konstrüksiyonu yapılabilir. Dörtgen ağ kullanıldığı takdirde üçgen ağ modelini dörtgen ağ modeline çevirecek metodlar kullanılmalıdır. Son yıllarda bunun için çalışmalar [7-14] önerilmiş ve yüksek kalitede dörtgen ağlar elde edilebilmektedir. Bu bölümde son yıllarda önerilen dörtgen ağdan üç boyutlu model oluşturan bazı metodlar anlatılarak kıyaslanacaktır.



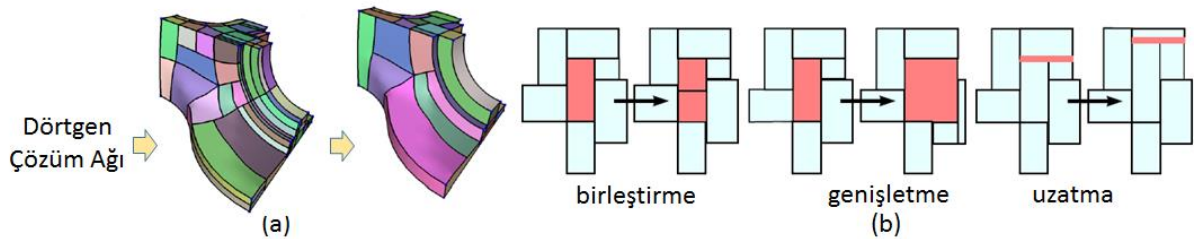
Şekil 6. Üçgen ve dörtgen ağdan üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması

Üçgen ağdan dörtgen ağ elde edilmesi için genelde Şekil 7 (a) sağ resimde yeşil ve mavi ile gösterildiği gibi modeldeki minimum ve maksimum eğrilik yönleri kullanılmakta ve dörtgen yüzeylerin kenarları mümkün olduğunca bu yönlerle paralel olacak şekilde dörtgen ağ oluşturulmaktadır. Dörtgen ağ modellerinde iki çeşit nokta bulunmaktadır: Sıradan ve sıradışı noktalar. Sıradan noktalara bağlı toplamda dört tane kenar bulunmaktadır. Sıradışı noktalara bağlı kenar sayısı ise dörtten farklıdır. Bir dörtgen ağ modelindeki sıradan noktalar sıradışı noktalardan çok daha fazladır. Daha öncede bahsedildiği üzere geometrik modelin oluşturulmasında dörtgen ağ modeli daha fazla kullanılmaktadır. Bunun sebebi dörtgen ağ modelinde kolay bir şekilde dörtgen bölmelerin elde edilmesi ve dörtgen bölmelerin B-spline yüzeylere uyumluluğudur. Bilindiği üzere B-spline yüzeyler kullanılarak kompleks geometrideki şekiller ifade edilebilir. Şekil 7 (b)'de soldaki dörtgen ağ modelinin sıradışı noktalarından dışa doğru izleme yapılarak dörtgen ağ kenarları taranırsa sağdaki gibi kırmızı kenarlar oluşacaktır. Bu kenarlar ve ağ sınırları arasında kalan bölmelere *dörtgen bölme* denilmektedir. Dörtgen bölmeler görüldüğü üzere düzenli olarak sıralı dörtgen ağ yüzeylerinden oluşmaktadır. B-spline yüzeylerini oluşturmak için hesaplanması gereken u ve v parametre değerleri dörtgen bölmelerde mevcuttur. Bu yüzden eğer dörtgen ağ dörtgen bölmelere ayrıştırılabilirse, üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması kolay olacaktır.



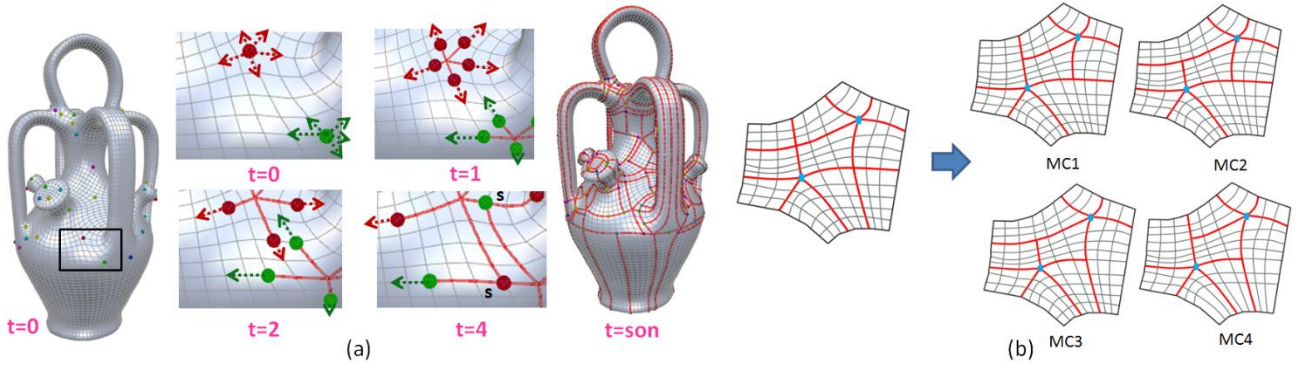
Şekil 7. (a) Üçgen ağdan dörtgen ağ üretme (b) Dörtgen ağdan dörtgen bölmelerin elde edilmesi

Son yıllarda dörtgen ağdan dörtgen bölme oluşturan metodlar [15-18] önerilmiştir. Myles vd. (2010) dörtgen çözüm ağından dörtgen bölmeler oluşturmuştur. Bunun için hedef fonksiyonu kullanmış ve değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Bu hedef fonksiyonu iki temel terimi içermektedir. Birincisi giydirilecek B-spline yüzey modeli geometrik olarak çözüm ağ modelini doğruluk payı yüksek olacak şekilde ifade etmelidir. İkinci olarak oluşturulacak dörtgen bölmelerin boy ve en oranı çok fazla olmamalıdır. Yani ince uzun dörtgen bölmeler istenmemektedir. Şekil 8 (a)'da gösterildiği gibi önce dörtgen çözüm ağındaki sıradışı noktalar kullanılarak ilk dörtgen bölmeler (orta şekil) elde edilmiştir. Sonrasında birleştirme, genişletme ve uzatma (bkz. Şekil 8 (b)) operatörleri kullanılarak hedef fonksiyonunun değeri minimum olacak şekilde dörtgen bölmelerin sınırları değiştirilmiştir. Şekil 8 (a)'nın sağında sonuçta oluşan dörtgen bölmeler gösterilmiştir.



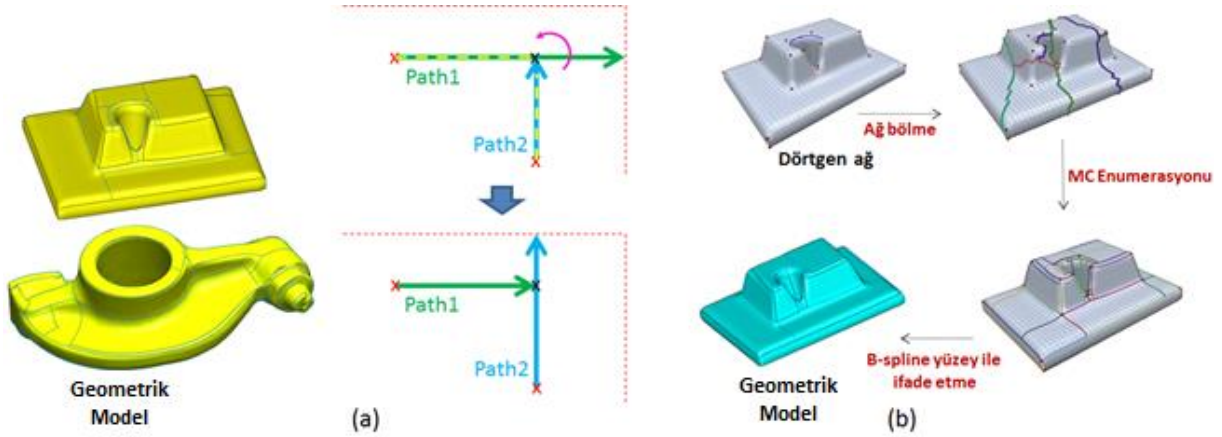
Şekil 8. (a) Dörtgen bölme oluşturma (b) Kullanılan geometrik operatörler [15]

Eppstein vd. (2008) *motorcycle graph* algoritmasını [16] geliştirmiştir. Ağdaki sıradışı noktalara parçacıklar yerleştirilmiş ve parçacıklar bu noktalardan dışa doğru hareket ettirilerek dörtgen bölmeler oluşturulmuştur. Şekil 8 (a)'da dörtgen ağ modeli kullanılarak motorcycle graph algoritması gösterilmiştir. Sıradışı noktalara değişik renkteki parçacıklar başlangıçta yerleştirilmiştir. Siyah dikdörtgen ile gösterilen bölge odaklanmış ve bu bölgeye kırmızı ve yeşil parçacık koyulmuştur. Herbir zaman diliminde parçacıklar bir ağ kenarı boyunca ilerletilmiştir. Parçacık önceden taranan bir kenara rastladığında durdurulmuş ve bütün parçacıklar durana kadar ağ kenarları taranmıştır. Taranan kenarlar kırmızı ile gösterilmiştir. Taranmış bu kenarlar arasında kalan bölgeler arasında dörtgen bölmeler oluşmuştur (bkz. Şekil 9 (a)). Eppstein vd. (2008) çalışmasında ispatlandığı gibi bu metodla oluşan bölmeler her zaman dörtgendir. Parçacıklara eşit hız verilmediği takdirde (yani her bir parçacık her bir zaman diliminde bir kenar boyunca hareket etmediği zaman), Şekil 9 (b)'de gösterildiği değişik dörtgen bölme kombinasyonları elde edilebilir.



Şekil 9. (a) *Motorcycle graph* algoritması (b) Bu algoritmadan değişik dörtgen bölme kombinasyonlarının elde edilmesi

Gunpinar vd. (2014) bir dörtgen ağdan tersine mühendislik için uygun dörtgen bölgeler elde etmek için motorcycle graph tabanlı metodlar [17-18] önermiştir. Çalışmalar en uygun dörtgen bölme kombinasyonunu bulmak için hedef fonksiyonu tanımlamış ve hedef fonksiyon değeri en küçük olan dörtgen bölme kombinasyonu seçmiştir. Sonrasında bu dörtgen bölmelere B-spline yüzeyler giydirilerek üç boyutlu geometrik modelleri elde edilmiştir. Birinci çalışmada “path flipping” algoritması tasarlanmıştır. Başlangıçta motorcycle graph tabanlı bir algoritma kullanarak bir dörtgen bölme kombinasyonu elde edilmiştir. Her bir parçacığın taradığı kenarlar “path” olarak ifade edilmiş ve bazı noktalarda (flipping noktaları) bir path diğer path’i bloke etmiştir. Şekil 10 (a)'da iki path gösterilmektedir: Path1 ve Path2. Siyah ile gösterilen flipping noktasında Path1 Path2’yi bloke etmiştir. Bu noktada bloke durumu değiştirildiğinde farklı bir dörtgen bölme kombinasyonu elde edilebilir. Çalışmada flipping noktaları önce belirlenmiş ve bu noktalarda path’lerin bloke durumu değiştirilerek mevcut hedef fonksiyon değeri değerlendirilmiştir. Eğer bu değerde düşme var ise bloke durumu değiştirilmiştir. Şekil 10 (a) sağda bloke durumu değiştirmiş ve yeni iki path elde edilmiştir. Birden fazla flipping noktası olacağı için bloke durumu değiştirmek için hedef fonksiyonu en fazla azaltan flipping noktası seçilmiştir.

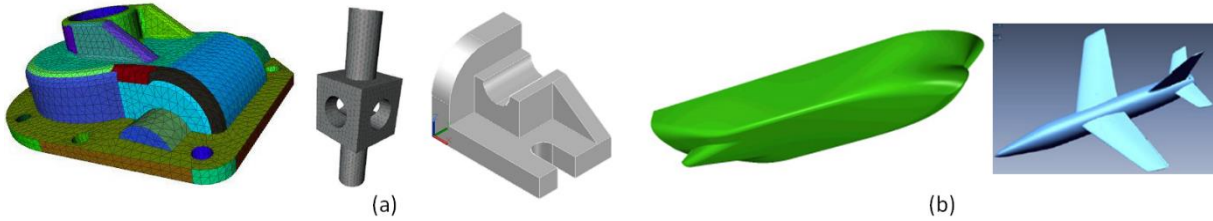


Şekil 10. Gunpinar vd. (2014)'nin (a) "Path flipping" algoritması [17] (b) "Motorcycle graph listeleme" algoritması [16]

Gunpinar vd. (2014)'nin ilk çalışmasında en zayıf nokta elde edilen dörtgen bölme kombinasyonunun tersine mühendislik için en optimum üç boyutlu geometrik model için uygun olamayabilmesidir. Bunun için Gunpinar vd. (2014) ikinci bir çalışma önermiştir. Bu çalışmadaki amaç bir dörtgen ağın her bir dörtgen bölme kombinasyonunun listelenerek hedef fonksiyon değerini minimize eden kombinasyonun seçilmesidir. *Motorcycle graph listeleme* algoritması yoluyla her bir kombinasyon listelenmiştir. Fakat bu algoritmanın hesaplama zamanı çok olduğundan (yani günler, aylar hatta yıllar sürebildiğinden) buna ek olarak yeni bir metod da önerilmiştir. Bunun için ağ, ağ parçacıklarına bölünmüş ve her bir ağ parçacığında sırayla ayrı ayrı motorcycle graph listeleme algoritması uygulanmış ve optimum kombinasyon seçilmiştir. Bu uygulama birden fazla gerçekleştirilmiş ve sonuçta bir tane dörtgen bölme kombinasyonu elde edilmiştir. Sonuçta elde edilen kombinasyon, dörtgen ağın tersine mühendislik için en optimum dörtgen bölme kombinasyonu olduğu garantilemese de, sonuçlara bakıldığında Gunpinar vd. (2014)'nin ilk çalışmasına göre daha iyi geometrik modeller elde edilmiştir. Bunun sebebi ise ikinci çalışmada birinci çalışmaya göre daha fazla dörtgen bölme kombinasyonunun değerlendirilmesidir. Dörtgen bölmeler B-spline yüzeyler ile ifade edilmiş ve Şekil 10 (a) ve (b)'de elde edilen üç boyutlu geometrik modeller sarı ve mavi ile gösterilmiştir.

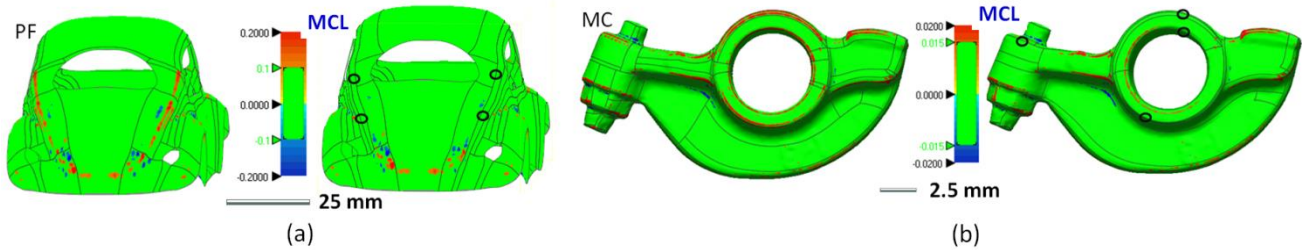
2.3 Geometrik Model Oluşturma Tekniklerinin Analizi:

Geometrik primitifler ve B-spline yüzeyler kullanarak geometrik model oluşturma teknikleri çok sıklıkla kullanılmakta, ve her tekniğin güçlü ve zayıf noktaları bulunmaktadır. Tersine mühendislikte en önemli kriterlerden ikisi modeli az sayıda geometrik eleman ile ifade etmek ve oluşturulan geometrik model ile ilk model arasındaki boşlukların mümkün olduğunca az olmasını sağlamaktır. Yani geometrik modelin su geçirgenlik özelliğine sahip olmasıdır. Mekanik modeller için (bkz. Şekil 11 (a)) geometrik model oluşturma işlemi için geometrik primitifler kullanıldığında B-spline yüzeylere göre daha az geometrik eleman kullanılarak model ifade edilebilir. Mesela küresel bir yüzey yarıçap ve merkez noktası ile ifade edilirken, B-spline yüzeyler ile çok sayıda kontrol noktası ile ifade edilecektir. Bundan dolayı mekanik modeller için geometrik primitif kullanımı daha uygun olacaktır. Serbest form yüzeyler (bkz. Şekil 11 (b)) geometrik primitifler ile ifade edildiğinde, çok sayıda primitife ihtiyaç vardır. Az sayıda primitif kullanarak ifade edilmesi durumunda doğruluk payı düşük bir geometrik model elde edilecek olup, su geçirgenliği olmayan geometrik modelin elde edilmesini mümkün olmayacaktır. O yüzden araba, uçak ve gemi gövdeleri için B-spline yüzeylerin kullanılması daha uygun olacaktır.



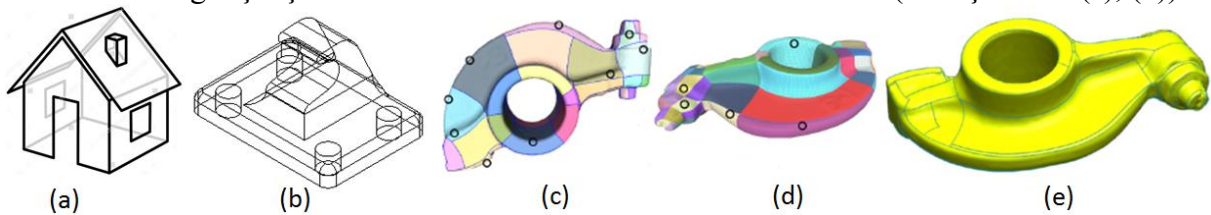
Şekil 11. (a) Mekanik modeller (b) Serbest form yüzeyler

Tersine mühendislik için farklı farklı hedef fonksiyonları geliştirilebilir. Gunpinar vd. (2014) çalışmalarında tasarladığı hedef fonksiyonunun temel özelliği dörtgen ağıdaki keskin bölgeleri dörtgen bölmelerin kenarlarına mümkün olduğunca koymasındır. Çünkü çözüm ağındaki keskin bölgeler dörtgen bölmelerin içerisine geldiğinde doğruluk payı düşük geometrik modeller elde edilebilmektedir. Şekil 12 (a)'da "path flipping" algoritması ile "motorcycle graph listeleme" algoritması araba gövde modeli kullanılarak karşılaştırılmıştır. Siyah daireler ile gösterilen keskin bölgeler motorcycle graph listeleme algoritması kullanıldığında dörtgen bölmelerin kenarlarına gelmiş ve bu bölmeler B-spline yüzeyler ile ifade edildiğinde doğruluk payı yüksek geometrik model elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyler ile girdi olarak verilen dörtgen ağlar arasındaki farklar şekilde renklendirilmiş, mavi ve kırmızı farkların fazla olduğunu ifade etmektedir. Şekil 12 (b)'de "motorcycle graph listeleme" algoritması ile üretilen dörtgen bölmeler, "motorcycle graph" algoritmasına göre tersine mühendislik açısından daha kaliteli geometrik model ürettiği görülmektedir.



Şekil 12. Üç boyutlu geometrik model üreten metodların karşılaştırılması [16]

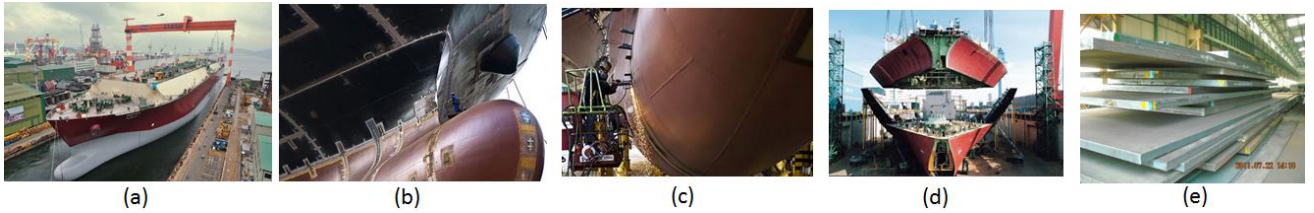
Tersine mühendislik ile olan bir modelin geometrik modeli oluşturulmaktadır. Bu işlemde tasarımcının tasarım niyetini yakalamak çok önemlidir. Yani model tasarlanırken nasıl oluşturulduğu tahmin edilmelidir. Yani ne şekilde modelin segmentasyonu yapılması gerektiği ve segmentasyonu yapılan modelin ne gibi geometrik elemanlar ile ifade edilmesi gerektiği tahmin edilmelidir. Tasarımda genelde modeldeki keskin çizgiler geometrik elemanların sınırlarına gelecek şekilde ifade edilmektedir (bkz. Şekil 13 (a) ve (b)). Gunpinar vd. (2014) [17,18] çalışmalarında hedef fonksiyonunu buna uygun seçtikleri için modeldeki keskin bölgeler Şekil 13 (e)'de görüldüğü gibi geometrik elemanların sınırlarındadır. Litertürdeki diğer çalışmalarda bu tam olarak mümkün olmamaktadır (bkz. Şekil 13 (c), (d)).



Şekil 13. Keskin bölgelerin dörtgen bölmelerin kenarlarına yerleştirilmesi (a) [15] (b) [14] (c) [17]

3. GEMİ YAPIM ENDÜSTRİSİNDEKİ BAZI TERSİNE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

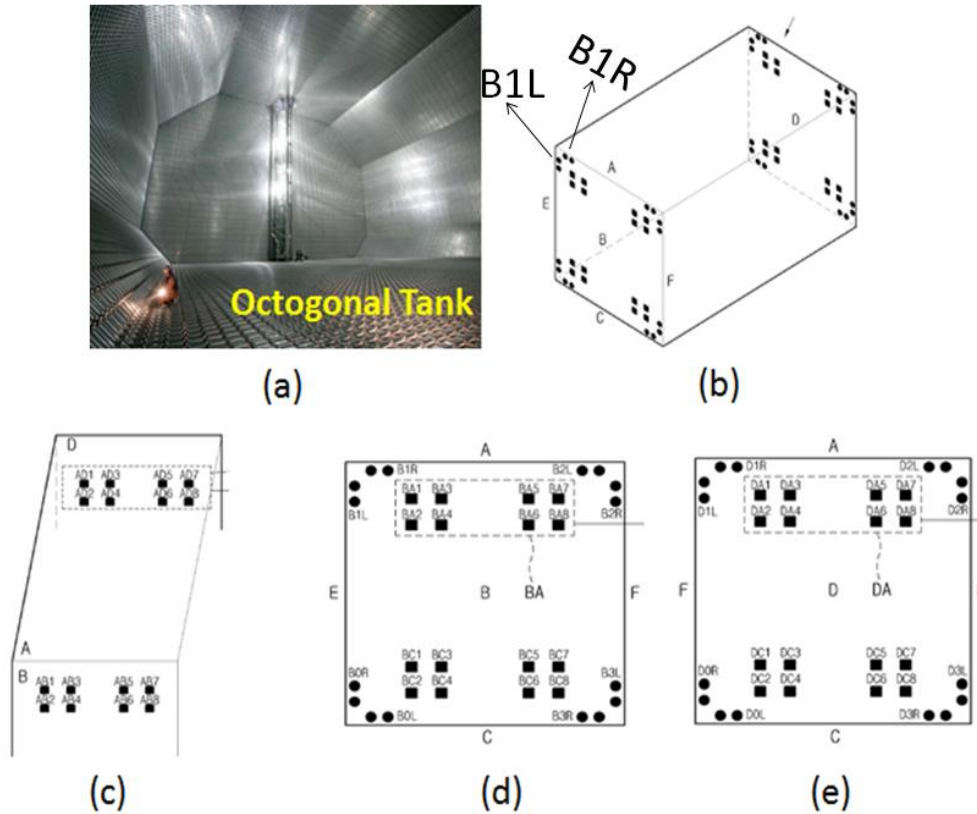
Bu bölümde gemi yapım endüstrisindeki bazı tersine mühendislik uygulamalarından bahsedilecektir. Gemi tek bir parçada üretilememekte ve küçük parçalara ayrıştırılarak teker teker üretilip montaj ve kaynağı yapılmaktadır. Şekil 14’da gemi yapım aşamaları gösterilmektedir. Gemiler Şekil 14 (a)’da gösterildiği gibi doklarda montajlanarak yüzebilir hale getirilmekte ve doktan çıkarılarak su üzerinde yapımına devam edilmektedir. Gemi parçaları doğruluk payı yüksek olacak şekilde üretilirse montaj ve kaynaklar daha kolay yapılabilmekte (bkz. Şekil 14 (c, d)). Doğruluk payı düşük olduğu takdirde istenilen büyüklükte parçalar üretilememektedir ve bu hatalar birleşerek (bu hatalı parçaların birleştirilmesinde) montaj ve kaynak işlemi günler sürebilmektedir. Ayrıca gemi gövdesi yamuk (eğri) geometrilere sahiptir ve Şekil 14 (e)’de görüldüğü gibi düz, kalın çelik levhalardan üretilmektedir. Bu levhalar ısıtılarak istenilen yamukluk (eğrilik) verilmeye çalışılsa da, bu proses işçilerin tecrübelerine bağlı olmakta ve doğruluk payı düşük bir şekilde üretilmektedir. Yukarıda bahsi geçen problemlerden dolayı gemi yapım endüstrisinde tersine mühendislik uygulamaları önem arz etmektedir. Şekil 14 (b)’de montajı yapılmış gemi gövdesi görülmektedir.



Şekil 14. Gemi yapım aşamaları

İlk uygulama olarak LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) gemilerinde bulunan sekizgen tankların üç boyutlu geometrik modellerin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu tankların üretildikten sonraki hali Şekil 15 (a)’da gösterilmekte olup içerisinde alüminyum paneller monte edilmiştir. Bu işlemin öncesinde tahtadan yapılmış izolasyon panelleri bulunmaktadır ve izolasyon panelleri sekizgen tankın çelikten yapılmış herbir duvarına (toplam on tane) yerleştirilir. Bu paneller tankın üç boyutlu modeli oluşturulduktan sonra merkezi referans çizgilerden başlanarak yerleştirilir, yoksa duvar bitimlerine izolasyon panelleri sığmayacaklardır. Sekizgen tankın yükseklik, genişlik ve uzunluğu 40’ar metreyi bulabilmekte ve üç boyutlu modeli oluşturmak için gerekli olan nokta bulutunun alınması (tankın ölçümü) kolay olmamaktadır. Bunun için tankın yapımı aşamasında tankın içinde katlar yapılmış ve bu katlardaki ölçümler sonucunda tankın geometrik modeli oluşturulmaktadır. Yani Şekil 15 (a)’nın iç bölgesinde sonradan kaldırılacak olan katlar bulunmaktadır. Samsung Heavy Industries şirketinin patentinde (Rhee vd. (2007)) kapalı alanların ölçümü ve üç boyutlu modelinin oluşturulması ile ilgili bir metod [19] anlatılmaktadır. Öncelikle kapalı pozisyonlama sistemi (indoor positioning system) kullanılmıştır. Kapalı pozisyonlama sistemleri ile kapalı alanlar ölçülebilmektedir. Şekil 16 (f)’de bu sistem gösterilmektedir. Temel olarak üç eleman bulunmakta ve pozisyon çubuğu kullanılarak çubuğun konum bilgisi alınabilmektedir. Transmitterler çubuğun konumunu alarak bilgisayara network ile aktarmaktadır. Bu çubuk kullanılarak levha üzerinden noktalar alınabilir ve nokta bulutu oluşturulur. Şekil 15 (b)’de dörtgen tank kullanılarak anlatılmıştır. Sekizgen tankın ölçümü ve modellemesi de benzer şekilde yapılabilir. Şekil 15 (c)’de gösterilen A duvarına transmitterler koyularak B ve D duvarlarından dörder olmak üzere

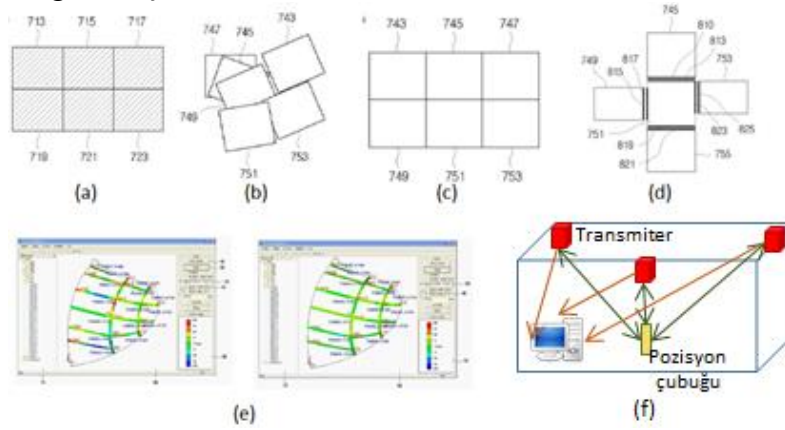
toplamda sekiz nokta (AD1-AD8, AB1-AB8) alınmıştır. Bu noktalara ortak nokta denilmektedir. Transmitterlar B ve D duvarlarına koyulmuş ve ortak noktaların yanında köşelerden de noktalar (B0L, B0R, ..., B3L, B3R, D0L, D0R, ..., D3L, D3R) alınmıştır. A, B, D duvarlarından olmak üzere toplamda üç tane ölçüm yapılmış ve her bir ölçüm için farklı koordinat sistemi elde edilmiştir. Toplamda üç ölçümün yapılmasının sebebi tankın içerisinde bulunan katlardan dolayı tankın ölçümünün tek seferde yapılması mümkün olamamaktadır. Üç boyutlu modelin üretilmesi için tek bir koordinat sistemi kullanılmalı ve ortak noktalar kullanılarak bütün noktalar A duvarının koordinat sistemine çevrilmiştir. Sonuçta Şekil 15 (b)'deki gibi siyah ile gösterilen nokta bulutu elde edilmiştir. Bu noktalar kullanılarak köşe noktalarına çizgiler giydirilmiş ve köşedeki bu çizgiler kesiştirilerek tankın köşe noktaları elde edilmiştir. Mesela B duvarının sol köşesini elde etmek için B1L noktalarına bir çizgi, B1R noktalarına başka bir çizgi giydirilmiş ve bu çizgiler kesiştirilmiştir. Tankın köşe noktaları bilindiğinde üç boyutlu çerçeve modeli elde edilmiş olup, bu model kullanılarak tankın merkezi referans çizgileri elde edilebilir.



Şekil 15. (a) Sekizgen tankın iç bölgesi (b) Sekizgen tankın üç boyutlu modelinin oluşturulması için metodoloji [19]

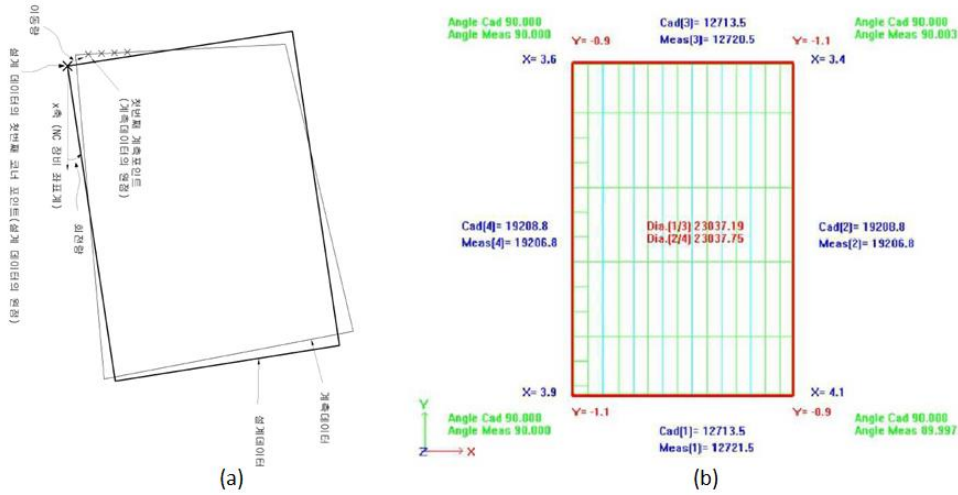
Gemi gövdesinin ön ve arka bölgelerinde eğimli bölgeler bulunmakta ve bu bölgeleri üretmek için küçük çelik düz levhalar ısıtılıp eğiltilerek birleştirilip montajı yapılmaktadır. Bu levhaların montajı üretim hatalarından dolayı kolay olmamakta ve hatalarının lokasyonunun bulunması önem arz etmektedir. Bunun için montaja taşınacak her bir levhanın üretimden sonra doğruluk payı analiz edilmelidir. Samsung Heavy Industries şirketinin patentinde [20] (Gunpınar vd. (2011)) bununla ilgili analiz yönteminden bahsedilmektedir. Öncelikle üretimi biten bütün levhaların ölçümü kapalı pozisyonlama sistemi kullanılarak ölçülmüş ve her bir levha için nokta bulutları elde edilmiştir. Nokta bulutları kullanılarak levhanın üç boyutlu modeli B-spline yüzeyler kullanılarak oluşturulur. Şekil 16 (a) ve (b)'de altı levhanın sırasıyla

tasarımdaki ve ölçüm sonrasındaki konumları (yani montaj konumları) gösterilmektedir. Tasarım konumları kullanılarak üretilen levhaların montajı sanal ortamda yapılır (c). Sanal ortamda montaj sonucunda montaj durumu Şekil 16 (e)'deki gibi görülebilmektedir ve levhalardaki hataların tespitini kolaylaştırmaktadır. Ve bu levhaların montajının gerçekte kolayca yapılıp yapılamayacağı analiz edilir. Bunun için iki önemli kriter bulunmaktadır. Birincisi montaj sonrası iki komşu levha arasındaki (d) deviasyonun belirlenmesidir. Eğer bu deviasyon çok farklı ise kaynak yapılması zor olacaktır. İkinci olarak iki komşu levhanın montaj sonrasında üst üste gelmesi veya aralarında mesafe olmasıdır. Özellikle mesafenin fazla olması durumunda montajı zor olmaktadır. Şekil 16 (e)'de bahsi geçen iki kriter için Gunpinar vd. (2011) tarafından tasarlanmış programın arayüzü gösterilmektedir. Komşu levhalar arasındaki renkler kırmızı ve maviye doğru yaklaştıkça levhaların gerçek ortamda montaj yapılabilirliği zorlaşmaktadır.



Şekil 16. (a-e) Gemi gövdesinin eğimli bölgelerinde bulunan levhaların bilgisayar ortamında montajı [20] (f) Kapalı pozisyonlama sistemi

Geminin iç bölgelerinde uzun düz levhalar bulunmaktadır. Bu levhalar üretildikten sonra içeri bölgelerinde delik açma gibi işlemler yapılması gerekmektedir. İşlem yapılmadan önce üretilen levhanın köşe noktaları bilinmelidir. Tasarımdaki levhanın geometrisi ile üretilen levhanın karşılaştırılmalı ve levha üzerinde yapılacak işlemler üretilen levhaya taşınmalıdır. Bununla ilgili bir metodoloji [21] Samsung Heavy Industries şirketinin patentinde (Kwon vd. (2009)) anlatılmaktadır. Öncelikle kapalı pozisyonlama sistemi kullanılarak üretilen levhanın köşelerinden noktalar alınmış ve levhanın üç boyutlu modelinin oluşturulmasında bu noktalar kullanılmıştır. Şekil 17 (a)'da noktalar x ile gösterilmektedir. Levhanın köşe noktalarının hesaplanması için bu noktalara çizgiler giydirilmiş ve herbir köşede oluşan iki çizginin kesişim noktası bulunmuştur. Bu nokta levhanın köşe noktasıdır. Dörtgen levhanın dört köşe noktası bulunduktan sonra üretilen levhanın geometrisi (kenar uzunlukları, açılar gibi) elde edilmiş olur. Tasarımdaki levha üzerindeki işlemleri üretilen levhaya taşımak için tasarımdaki levha üretilen levhaya en uygun olacak şekilde yapıştırılır. İki levhanın köşe noktaları tam olarak oturması üretimdeki hatalardan dolayı mümkün olmamaktadır. En uygun olarak yapıştırma işlemindeki amaç deviasyonları eşit olacak şekilde dağıtmaktır. Şekil 17 (b)'de yapıştırma sonrasındaki deviasyonlar "X=" ve "Y=" olarak mavi ve kırmızı renkte gösterilmektedir. Sonrasında tasarım levhasındaki işlemler üretilen levhaya taşınabilir.



Şekil 17. (a) Üretilen levhanın üç boyutlu modelinin oluşturulması (b) Tasarımdaki levhanın üretilen levhanın üzerine yapıştırılması [21]

4. SONUÇ

Tersine mühendislik yoluyla objelerin üç boyutlu geometrik modeli elde edilebilir. Bu makalede öncelikle son yıllarda önerilmiş geometrik model oluşturma tekniklerinden bahsedilmiş ve analizleri yapılmıştır. Tersine mühendisliğin gemi, uçak ve otomotiv sanayinde birçok uygulamaları bulunmaktadır. Bu makalede ayrıca gemi yapım aşamasında kullanılan bazı tersine mühendislik tekniklerinden bahsedilmiştir.

Literatürdeki tekniklerin her birinin güçlü ve zayıf noktaları bulunmaktadır. Geometrik primitifler ile mekanik modellerin ifadesi daha az eleman ile mümkün olabilmekte, fakat serbest formdaki yüzeyler için primitiflerin kullanılması mantıklı değildir. Serbest formdaki yüzeylerde kullanıldığında çok fazla geometrik elemana ihtiyaç olacaktır. Serbest formdaki yüzeylerde B-spline yüzeylerin kullanılması daha uygun olmaktadır. Fakat mekanik modeller için B-spline yüzeyler kullanılırsa geometrik primitiflere göre daha fazla veriye ihtiyaç olacaktır. Mesela bir küresel bölge için kürenin yarıçapı ve merkezine ihtiyaç var iken B-spline yüzeyler kullanıldığında çok fazla kontrol noktasına ihtiyaç olacaktır. Bu yüzden geometrik model oluşturma probleminde bu iki metodu kapsayacak yeni metodların önerilmesi daha uygun olacaktır. Yani iki metodu kapsayan hibrid metodların önerilmesi modelin daha efektif bir şekilde ifade edilmesini sağlayacaktır. Böylece modelde primitif yüzeyler var ise geometrik primitifler ile, serbest formdaki yüzeyler için ise B-spline yüzeyler kullanılmalıdır. Bunun için ayrıca yeni bir hedef fonksiyonu tasarlanmalıdır. Bu hedef fonksiyonun primitif yüzeylerde geometrik primitiflerin kullanımını, serbest formdaki yüzeylerde B-spline yüzey kullanımını sağlamalıdır.

Geometrik model oluşturulmasında su geçirgenliği olmayan hata payı az olan modellerin oluşturulması çok önemlidir. Hata payı yüksek modeller oluşturulursa üretim aşamasında tasarlanan fiziksel modelin üretilmesi mümkün olmayacaktır. Yani tasarımdaki hatalar fiziksel modele aktarılacaktır. Günümüz teknikleri sayesinde kalitesi yüksek geometrik modeller üretilse de, su geçirgenliği olmayan (*G0* devamlılığına sahip) ve *G1-G2* devamlılığına sahip yüzeylerin elde edilmesi için yeni metodların geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun için yeni hedef fonksiyonları tanımlanmalı ve bu hedef fonksiyonu segmentasyonu yaparken yüzey devamlılıklarını en iyi seviyede olacak şekilde modelin ayrışmasını yapmalıdır.

Tersine mühendislikte tasarımcının tasarım niyetini keşfetmek veya yakalamak çok önemlidir. Mesela otomotiv tasarımında tasarımcıların CAD programları ile yaptıkları tasarım

faaliyetleri izlenebilir ve nasıl tasarım yaptıkları gözlemlenebilir. Bunun için birden fazla sayıda tasarımcının tasarım faaliyet geçmişi kaydedilir ve faaliyetleri incelenebilir. Bu faaliyetlerden çıkarımlarda bulunularak tersine mühendislik için yeni geometrik model oluşturma teknikleri geliştirilebilir. Bu çalışma yoluyla tersine mühendislik için ilginç bulgulara ulaşılabileceği umulmaktadır.

Tersine mühendislik için tasarlanan modeli kullanarak değişik tasarım varyasyonları kısa zamanda elde edilmelidir. Yani modelin modifikasyonu kolay olmalıdır. Bunun için modelin modifikasyonlarını kolaylaştıracak ve modelin önemli özelliklerini ifade eden geometrik parametreler tanımlanmalıdır. Mesela herhangi bir yat gövde modeli için uzunluk, derinlik gibi geometrik parametreler tanımlanabilir ve geometrik model oluşturulurken bu geometrik parametreler baz alınarak model segmentasyonu yapılabilir. Mesela yat gövdesinin yan yüzeyi birden fazla geometrik yüzey ile ifade edilirse, modelin derinliği değiştirildiğinde herbir yüzey ayrı ayrı deforme edilerek yatın derinliği değiştirilebilir. Bunun yerine tek bir geometrik yüzey kullanılırsa, sadece bir yüzeyin derinliğinin değiştirilmesi yeterli olacaktır. Bu yüzden önerilecek metodun hedef fonksiyonu tanımlı parametreleri ve bu parametrelerin ağırlıklarını baz alarak model segmentasyonunu yapmalıdır.

Tersine mühendislik problemlerinin herbirinin özellikleri ayrı ayrıdır. Problem özelliklerini dikkate alacak şekilde bir metodun önerilmesi kolay değildir. Mesela otomotiv endüstrisinde *G2* devamlılığına sahip yüzeylerin kullanılması gerekirken, gemi yapım endüstrisinde *G1* devamlılığına sahip yüzeylerin kullanılması yeterlidir. Tekniğin kullanılacağı alan iyi bir şekilde seçilmeli ve bu kapsamda yeni metodlar önerilmelidir. Bazı problemlerdeki tanımlı kriterler birbirleri ile çelişebilmektedir. Mesele birinci kriter dikkate alınarak yapılan segmentasyon diğer kriterler için uygun olmamaktadır. Bu durumda kriterlere uygun bir hedef fonksiyonu tanımlanmalı, kriterler için hedef fonksiyonundaki ağırlıklar uygun bir şekilde verilmeli ve modelin segmentasyonu yapılmalıdır. Aksi takdirde istenilen kalitede geometrik model elde edilemeyecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Delaunay, B. 1934. "Sur la sphere vide", Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk, p. 793–800.
- [2] Amenta, N., Choi, S., Kolluri, R. K. 2001. "The power crust", Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications, p. 249–266.
- [3] Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., Taubin, G. 1999. "The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 5 (4), p. 349–359.
- [4] Shamir, A. 2008. "A survey on mesh segmentation techniques", Computer Graphics Forum, vol. 27 (6), p.1539–1556.
- [5] Agathos, A., Pratikakis, I., Perantonis, S., Sapidis, N., Azariadis, P. 2007. "3d mesh segmentation methodologies for CAD applications", Computer Aided Design And Applications, vol. 4 (6), p. 827–841.
- [6] Eck, M., Hoppe, M. 1996. "Automatic reconstruction of b-spline surfaces of arbitrary topological type", SIGGRAPH'96, p. 325–334.

- [7] Bommes, D., Zimmer, H., Kobbelt, L. 2009. "Mixed-integer quadrangulation". ACM Trans. Graph., vol. 28 (3), p.1–10.
- [8] Bommes, D., Lempfer, T., Kobbelt, L. 2011. "Global structure optimization of quadrilateral meshes", Computer Graphics Forum, vol. 30 (2), p. 375–384.
- [9] Bommes, D., Levy, B., Pietroni, N., Puppo, E., Silva, C., Tarini, M., Zorin, D. 2012. "State of the art in quad meshing", Eurographics STARS (2012).
- [10] Campen, M., Bommes, D., Kobbelt, L. 2012. "Dual loops meshing: quality quad layouts on manifolds", ACM Trans. Graph., vol. 31 (4), p. 1–11.
- [11] Daniels, J., Silva, C. T., Shepherd, J., Cohen E. 2008. "Quadrilateral mesh simplification", ACM Trans. Graph., vol. 27 (5), p. 148:1–148:9.
- [12] Bommes, D., Campen, M., Ebke, H., Alliez, P., Kobbelt, L. 2013. "Integer-grid maps for reliable quad meshing", ACM Transactions on Graphics, vol. 32 (4), p. 98:1–98:12.
- [13] Peng, C., Zhang, E., Kobayashi, Y., Wonka, P. 2011. "Connectivity editing for quadrilateral meshes", ACM Trans. Graph., vol. 30 (6), 141:1–141:12.
- [14] Tarini, M., Puppo, E., Panozzo, D., Pietroni, N., Cignoni, P. 2011. "Simple quad domains for field aligned mesh parametrization", ACM Trans. Graph., vol. 30 (6), 142:1–142:12.
- [15] Myles, A., Pietroni, N., Kovacs, D., Zorin, D. 2010. "Feature-aligned t-meshes", ACM Trans. Graph., vol. 29 (4), p. 1–11.
- [16] Eppstein, D., Goodrich, M. T., Kim, E., Tamstorf, R. 2008. "Motorcycle graphs: canonical quad mesh partitioning", Eurographics Symposium on Geometry Processing, vol. 27 (5), p. 1477–1486.
- [17] Gunpinar, E., Moriguchi, M., Suzuki, H., Ohtake, Y. 2014. "Feature-aware partitions from motorcycle graph", Computer-Aided Design, vol. 47, p. 85–95.
- [18] Gunpinar, E., Moriguchi, M., Suzuki, H., Ohtake, Y. 2014. "Motorcycle graph enumeration from quadrilateral meshes for reverse engineering", Computer-Aided Design, vol. 55, p. 64–80.
- [19] Rhee, S., Gunpinar, E., Kim, S., Cha, C., Hwan, S. 2007. "Modeling method of 3D closed space using 3D measurement tool", Korean Intellectual Property Office (KIPO), Application No: 1020070119745.
- [20] Gunpinar, E., Rhee, S., Kwon, K., Park, J. 2011. "Assembly prediction system and method of curved plates", Korean Intellectual Property Office (KIPO), Application No: 1020100008761.
- [21] Kwon, K., Gunpinar, E., Rhee, S., Park, J., Park, Y. 2009. "Method and apparatus for measuring plate position", Korean Intellectual Property Office (KIPO), Application No: 1020090067471.

- [22] Bénéière, R., Subsol, G., Gesquière, G., Breton, F. L., Puecha, W. 2013. "A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models", *Computer-Aided Design* 45, 1382–1393.
- [23] Benko, P., Varady, T. 2002. "Direct segmentation of smooth, multiple point regions", *Geometric Modeling and Processing, 2002. Proceedings*, 169-178.
- [24] Benko, P., Martin, R. R., Varady, T. 2001. "Algorithms for reverse engineering boundary representation models", *Computer-Aided Design*, 33/11, 839–851.
- [25] Attene, M., Falcidieno, B., Spagnuolo, M. 2006. "Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives", *The Visual Computer*, 22/ 3, 181-193.
- [26] Yana D. M., Wang, W., Liu, Y., Yang, Z. 2012. "Variational mesh segmentation via quadric surface fitting", *Computer-Aided Design* 44, 1072–1082.
- [27] Lloyd SP. 1982. "Least square quantization in PCM", *IEEE Transactions on Inform Theory*, 28, 129–137.