



Araştırma Makalesi

BULANIK MANTIK ÜYELİK FONKSİYONLARININ FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ

IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC MEMBERSHIP FUNCTIONS ON FPGA

Fatih Karataş^{*1}, İsmail Koyuncu², Murat Tuna³, Murat Alçın⁴

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

³Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Bölümü, Kırklareli, Türkiye

⁴Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Bulanık Mantık
Bulanıklaştırma
Üyelik Fonksiyonları
FPGA
VHDL

Keywords:

Fuzzy Logic
Fuzzification
Membership Functions
FPGA
VHDL

ÖZ

Bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için gauss, triangular (üçgen), trapezoidal (yamuk), generalized bell-shaped (genelleştirilmiş çan eğrisi) üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA (Field Programmable Gate Array-Alan Programlanabilir Kapı Dizileri) tabanlı gauss, üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language-Çok Yüksek Hızlı Tümlşik Devre Donanımı Tanımlama Dili) ile kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla testbench dosyaları oluşturulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri hesaplanmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Gauss Üçgen, Yamuk ve Çan eğrisi üyelik fonksiyonlarına ait ünitelerin maksimum çalışma frekansları elde edilmiştir. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Gauss üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 304.534 MHz, Üçgen üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 245.031 MHz, Yamuk üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 599.664 MHz ve Çan eğrisi üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 185.086 MHz olarak elde edilmiştir.

ABSTRACT

In this study, FPGA (Field Programmable Gate Array) based gauss, triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership function units are designed for real-time Fuzzy Logic applications in accordance with the 32-bit IEEE-754-1985 floating-point number standard by referring to the mathematical model of gauss, triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership functions. The design was coded in VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) and synthesized using Xilinx ISE Design Suite program. Testbench files were created in order to test the designed units. The results obtained from this test data were compared with Matlab-based numerical results and error values were calculated. Following the Place&Route operation, the maximum operating frequencies of the units belonging to FPGA based gauss, triangular, trapezoidal and generalized bell-shaped membership functions were obtained. After the Place&Route operation, the maximum operating frequency of FPGA based gauss membership function unit was got as 304.534 MHz, the maximum operating frequency of FPGA based triangular membership function unit was achieved as 245.031 MHz, the maximum operating frequency of FPGA based trapezoidal membership function unit was obtained as 599.664 MHz and the maximum operating frequency of FPGA based generalized bell-shaped membership function unit was got as 185.086 MHz.

*Sorumlu Yazar

^{*}(fatihkaratas@usr.aku.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-1877-5552
(ismailkoyuncu@aku.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-4725-4879
(murat.tuna@klu.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-3511-1336
(muratalcin@aku.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-2874-7048

1. GİRİŞ

Günümüzde, bulanık mantıkla ilgili araştırmaların odak noktası, kullanıcı konforunu en üst düzeye çıkarmak ve enerji tüketimini en aza indirmek için yenilikçi tahmin ve optimizasyon tekniklerinin sürekli olarak geliştirilmesidir. Bununla birlikte, kontrol doğruluğu ve kontrol hızı, sistem performansına katkıda bulunan ancak araştırmacılar tarafından büyük ölçüde göz ardı edilen en kritik kısımlardan biridir (Khokhar ve ark., 2020). Bulanık mantık; bilgi tabanı, bulanıklaştırma, karar verme ve durulaştırma birimleri olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır (Elmas, 2003). Bulanıklaştırma ünitesi sistemden alınan denetim giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemi yapmaktadır. Bu üniteye çeşitli üyelik fonksiyonları mevcut olup en yaygın kullanılan üçgen, trapezoidal (yamuk), generalized bell-shaped (genelleştirilmiş çan eğrisi), gauss ve sigmoidal üyelik fonksiyonlarıdır (Altaş, 1999). Kontrol doğruluğu ve kontrol hızını etkileyen parametrelerden birisi olan aktivasyon fonksiyonları bu çalışmada ele alınmış ve paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk üretim, yüksek kapasite gibi özellikleriyle diğer sayısal platformlara göre ön plana çıkan FPGA çiplerinde (Koyuncu, 2018) uygulanmak üzere tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Karar verme ve kontrol sistemi olarak tanımlanabilen bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı ilk defa Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 'te ortaya atılmıştır. Bulanık mantık, doğa ve insanın oluşturduğu yapay sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için uygun bir yaklaşım olarak gelişmekte olan bir tekniktir. Klasik yöntemlerle modellenemeyen karmaşık sistemlerde, lineer olmayan sistemlerde ve belirsizliklerin çok olduğu sistemlerde ideal olarak kullanılmaktadır. Zadeh belirsiz kümeleri, belirsizliği ifade etme aracı olarak tanıttı ve o zamandan beri, bulanık küme teorisi farklı disiplinlerde önemli bir konu haline gelmiştir (Zadeh, 1965). Bulanık sistem teorisi, belirsiz düşünce ve karar süreçlerinin gelişen modellerine ait başlama noktası olarak kabul edilmekte ve bu nedenle; yönetim ve sosyal problemler için kullanılan insan modellerinin yapılması, otomasyon ve bilgi sistemlerinde kullanım için yüksek derecede insan yeteneklerinin taklidi, insan ve makineler arasındaki insan merkezli ara birimlerin oluşumu, risk analizi, tahmin ve fonksiyonel cihazların gelişimi gibi diğer sosyal ve yapay zeka uygulamalarında kullanılmaktadır (Şen, 2012). Bulanık mantık ilk kez 1973 yılında, Londra 'da Ebrahim H. Mamdani tarafından bir buhar makinasında uygulanmıştır. Ticari olarak ise ilk kez, 1980'de Danimarka'daki bir çimento fabrikasının fırınına kontrol etmek için kullanılmıştır (Mamdani ve Assilian, 1975). Bulanık mantık ile hazırlanan bir sistem, bilgisayar desteğinde, sensörlerden gelen ısı

ve maddelere ait bilgileri alarak ve "feed-back" (geri besleme) metoduyla değişkenleri kontrol ederek büyük oranda enerji tasarrufu sağlamıştır (Klir ve Yuan, 1995). Uluslararası Bulanık Sistemler Derneği'nin 1987'de Tokyo'da düzenlediği bir konferansta bir mühendis, bulanık mantıkla programladığı bir robota, bir çiçeği ince bir çubuğun üzerinde düşmeyecek şekilde bıraktırmayı başarmıştır. Robota ait bir devre çıkarılmasına rağmen robot beklenmedik bir şekilde yine aynı hassaslıkla çiçeği düşürmeden çubuğun üzerine bırakmıştır (Mukaidono ve ark., 1987). Kısacası bulanık mantık sistemleri, yetersiz bilgi temin edilse dahi tıpkı insanların yaptığı gibi bir tür "sağduyu" kullanarak işlemleri gerçekleştirebilmektedir.

Bulanık mantığın kullanıldığı bazı önemli uygulamalar; helikopterler için bulanık tabanlı uçuş desteği (Sugeno, 1985), raylı metro sistemlerinde bulanık mantık tabanlı sürüş rahatlığı, duruş mesafesinin kesinliğinin ve ekonomikliğinin geliştirilmesi (Yasunobu ve ark., 2002), el yazısı sembollerin çevrimiçi tanınmasında bulanık mantık uygulanması (Fitzgerald ve ark., 2004), hidroelektrik güç üniteleri için kullanılan baraj kapılarının otomatik kontrolü (Karaboğa ve ark., 2004), yapay sinir ağları ile birlikte bulanık mantık tabanlı ses tanıma sistemleri (Melin ve ark., 2006), sağlık alanında bulanık mantık tabanlı kanser teşhisi çalışmaları (Zadeh, 2011), depremlerin önceden bilinmesi için bulanık mantık tabanlı tahmin sistemi (Dutta ve ark., 2012), stok değerlendirmesi ve portföy inşası için bulanık kural tabanlı uzman sistemler (Avcı ve Selim, 2013), Bulanık Mantık tabanlı biyomedikal sistemler (Patel ve ark., 2013), otomobiller için bulanık mantık kullanarak "Cruise-control" uygulamaları (Cholis ve ark., 2014), çelik sanayiinde makina hızı ve ısısının bulanık mantık tabanlı kontrolü (Singhala ve ark., 2014), bulanık mantık kullanılarak üretilen fotoğraf makineleri ve kameralar (otomatik odaklama yapan makinelerden daha net bir görüntü vermekte ve sarsıntılardan doğan görüntü bozukluklarını asgariye indirmektedir) (Fayaz ve Kim, 2017) ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi strateji ile elektrikli ve hibrit araçların yakıt ekonomisinde artış (Danapalasingam ve ark., 2018) uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

FPGA tabanlı bazı bulanık mantık uygulamaları; robotik uygulamalar için gömülü bulanık denetleyicilerin FPGA tabanlı uygulaması (Sanchez-Solano ve ark., 2007), FPGA üzerinde bulanık mantık kullanılarak gerçek zamanlı DC motor hız kontrolü (Sulaiman ve ark., 2009), FPGA tabanlı gerçek zamanlı uyarlanabilir bulanık mantık denetleyicisi (Altaş, 1999), harici Analog-Dijital dönüştürücü yokken boost dönüştürücü için tek girişli Bulanık Mantık denetleyicisinin FPGA uygulaması (Taeed ve ark., 2012), FPGA ve bulanık mantık kullanarak gerçek zamanlı akıllı konum izleme sistemi (Ferreira ve Santos, 2014), bulanık mantığa dayalı FPGA stereo eşleme uygulaması

(Pérez-Patricio ve ark., 2016), çok yönlü robot sistemi için Bulanık-PI (Proportional Integral) denetleyicisinin tasarımı ve FPGA uygulaması (Masmoudi ve ark., 2017), FPGA ile bulanık mantık tabanlı objektif görüntü kalitesi değerlendirmesi (Tchendjou ve ark., 2018), gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için gauss üyelik fonksiyonunun FPGA tabanlı tasarımı ve iki eksenli güneş takibi için FPGA üzerinde bulanık mantık kontrolü (Cruz-Alejo ve ark., 2019) çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

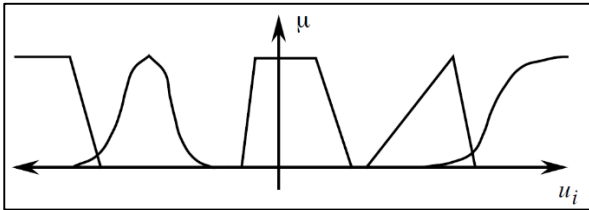
2. GENEL BİLGİLER

Bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamalarında kullanılmak üzere üçgen, trapezoidal, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA-tabanlı tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarım VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla testbench dosyaları oluşturulmuş ve performans analizleri yapılarak çip istatistikleri sunulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri hesaplanmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı üyelik fonksiyonlarına ait ünitelerin maksimum çalışma frekansları elde edilmiştir.

2.1. Bulanık Mantık ve Üyelik Fonksiyonları

Bilgilerin nitelik özelliklerinin kompleks, modellenmesi güç, belirsiz veya kesin olmadığı durumlarda dilsel ifadelerle desteklenerek netleştirilmesi kavramına bulanık mantık (Fuzzy Logic) denilmektedir (Klir ve Yuan, 1995). Bulanık denetleyici aşağıdaki dört öğeden oluşur (Zadeh, 1965):

Bulanıklaştırma (Fuzzification), dışarıdan alınan gerçek sayısal bir değeri üyelik fonksiyonları tarafından dilsel ifadelerle dönüştürülmesi işlemidir. Uygulamalarda sıklıkla kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 1'de gösterildiği gibi Üçgen, Yamuk, Çan Eğrisi, Gauss ve Sigmoidal 'dir (Elmas, 2003).



Şekil 1. Bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyon tipleri

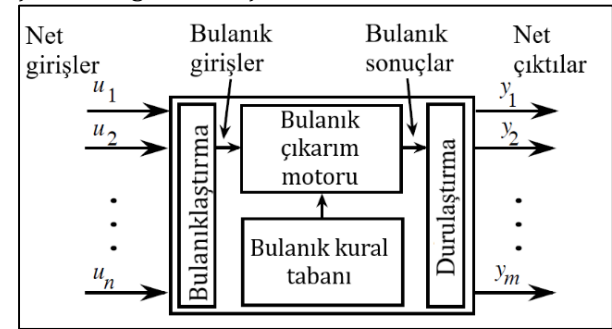
Durulaştırma (Defuzzification), bulanık çıkarım motoru ünitesinden aktarılan bulanık kümenin kesin bir değere dönüştürülmesi işlemidir. Sıklıkla

kullanılan durulaştırma metotları ağırlık merkezi, en büyük üyelik ilkesi, ortalama en büyük üyelik, ağırlıklı ortalama, en büyüklerin en küçüğü ve en büyüklerin en büyüğü şeklindedir (Şen, 2012).

Bulanık kural tabanı (Rule-base), uzman kişinin bilgi, beceri kontrol stratejisini karakterize eden kontrol kurallarının dilsel olarak ifade edildiği kısımdır. Veri tabanındaki girişlerin çıkış değişkenleri ile mantıksal bağ kurulduğu "Eğer-İse (If-Then)" türünde yazılabilen kurallar bütünüdür (Kaur ve Kaur, 2009).

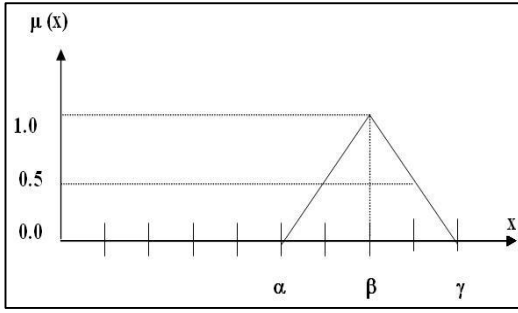
Bulanık çıkarım motoru (Inference mechanism), kurallar üzerinde bulanık mantık yürütür ve bulanık kural tabanını kullanarak giriş ve çıkış uzayı arasında bir bağlantı kurar. Bu üniteye bilgi genellikle Mamdani ve Sugeno yöntemleri aracılığı ile modellenir (Lokman, 2011).

Bulanık bir kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

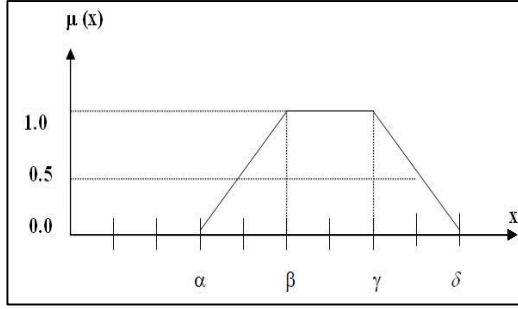


Şekil 2. Bulanık Mantık Sisteminin Şematik Yapısı

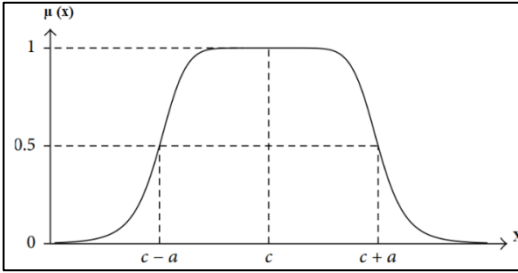
Bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Bu üyelik fonksiyonları her objenin bir kümedeki ağırlık derecesini vermektedir. Bu ağırlık derecesi 1 'den 0 'a kadar olabilmekte, yani tam üyelikten üye olmama kadar değişmektedir. Üyelik dereceleri 1 'e eşit olan öğelerin toplandığı alt küme kısmına, o alt kümenin özü (Core) denir. Burada $\mu(x)=1$ 'dir. Bunun aksine bir kümenin tüm öğelerini içeren aralığa o kümenin Dayanağı (Support) adı verilir. Dayanakta bulunan her öğenin az veya çok değerinde (0 ile 1 arasında) üyelik dereceleri vardır. Bunun matematiksel ifadesi $0 < \mu(x) < 1$ şeklindedir. Üyelik dereceleri 1 'e veya 0 'a eşit olmayan öğelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun sınırları (Boundary) bölgeleri denir. Genel olarak, tüm üyelik fonksiyonlarında, biri sağda diğeri de solda olmak üzere iki adet geçiş bölgesi vardır. Bu çalışmada tasarım için ele alınan üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, genelleştirilmiş çan eğrisi ve Gauss 'tur. Bu üyelik fonksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırası ile Denklem (1), Denklem (2), Denklem (3), Denklem (4)'te ve görseller sırası ile Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur (Passino ve Yurkovich, 1998).



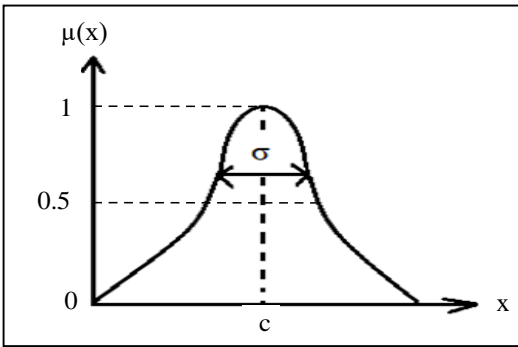
Şekil 3. Üçgen (Triangular) Üyelik Fonksiyonu



Şekil 4. Yamuk (Trapezoidal) Üyelik Fonksiyonu



Şekil 5. Genelleştirilmiş Çan Eğrisi (Generalized Bell-Shaped) Üyelik Fonksiyonu



Şekil 6. Gauss Üyelik Fonksiyonu

Denklem (1): Üçgen (Triangular) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\Lambda: x \rightarrow [0,1]$ $x: X$ evreninde herhangi bir eleman

$$\Lambda(x; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{(x - \alpha)}{(\beta - \alpha)}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{(\gamma - x)}{(\gamma - \beta)}, & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0, & x > \gamma \end{cases}$$

Denklem (2): Yamuk (Trapezoidal) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\pi: x \rightarrow [0,1]$

$$\pi(x; \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{(x - \alpha)}{(\beta - \alpha)}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{(\delta - x)}{(\delta - \gamma)}, & \gamma \leq x \leq \delta \\ 0, & x > \delta \end{cases}$$

Denklem (3): Genelleştirilmiş Çan Eğrisi (Generalized Bell-Shaped) Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $\Omega: x \rightarrow [0,1]$

b : fonksiyonun tavan genişliğini etkileyen parametredir.

$$\Omega(x; \alpha, b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left| \frac{(x-c)}{a} \right|^{2b}} \right\}$$

Denklem (4): Gauss Üyelik Fonksiyonu

Fonksiyon $G: x \rightarrow [0,1]$

$$G(x; c, \sigma) = \left\{ e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \right\}$$

2.2. FPGA Çipleri

FPGA (Field Programmable Gate Array-Alan Programlanabilir Kapı Dizileri) çipleri ilk üretim aşamasından sonra kullanıcının istediği sistem tasarımına göre donanım yapısı kullanıcı/tasarımcı tarafından değiştirilebilen, tekrar tekrar programlanabilme özelliğine sahip dijital tüm-devrelerdir (Tuna ve ark., 2018; Tuna ve ark., 2019).

Bir FPGA, programlanabilir üç bileşenden oluşmaktadır:

Konfigüre Edilebilir Lojik Bloklar (Configurable Logic Blocks (CLB)): CLB kullanıcının oluşturmak istediği lojik devre için fonksiyonel elemanlar sağlar. Mantıksal fonksiyonların oluşturulabildiği Look-up Table (LUT), tek bitlik bilgilerin saklanabildiği Flip-Flop 'lar ve bilgi akışını yönlendiren Multiplexer 'lar gibi çeşitli elemanlardan oluşmaktadır.

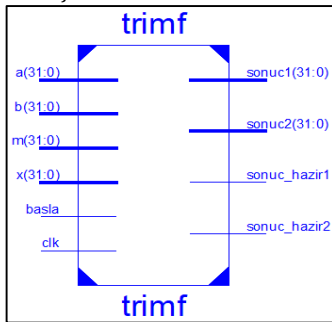
Giriş-Çıkış Blokları (Input/Output Blocks (IOB)): IOB 'ler FPGA çiplerinin programlanabilir giriş/çıkış terminalleridir. Bu bloktaki pinler tasarımcının isteğine göre giriş, çıkış veya hem giriş hem de çıkış olarak programlanabilir. I/O bloklarının temel görevi çipin iç sinyal hatları ile çipin pinleri arasında arabirimi sağlamaktır.

Ara Bağlantılar (Interconnection Network): Bu birimler hem mantıksal bloklar arasında hem de mantıksal bloklar ile IOB 'ler arasında bağlantıları konfigüre kullanırlar (Alçın ve ark., 2016; Alçın ve ark., 2019).

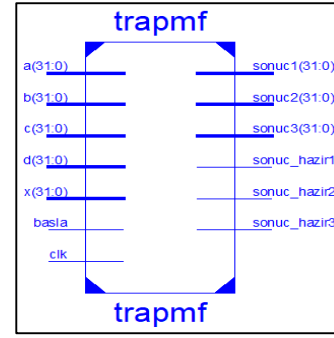
FPGA çiplerinde sıklıkla VHDL ve Verilog programlama dilleri ile tasarımlar gerçekleştirilmektedir. Bu çipler paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk üretim ve yüksek kapasite gibi özellikleriyle diğer sayısal platformlara göre ön plana çıkmaktadır (Karataş ve ark., 2020). Günümüzde yapay sinir ağları, osilatör tasarımı, uzay, havacılık ve savunma sanayi, ses, otomotiv, video ve görüntü işleme, kaos teorisi ve uygulamaları, ASIC gibi amaca özel tasarlanmış entegre prototiplerinde ve daha birçok alanda kullanılmaktadır (Koyuncu ve ark., 2018; Yılmaz ve ark., 2019; Rajagopal ve ark., 2019; Güngör ve ark., 2019; Akgül ve ark., 2019).

3. FPGA-TABANLI ÜYELİK FONKSİYONLARI

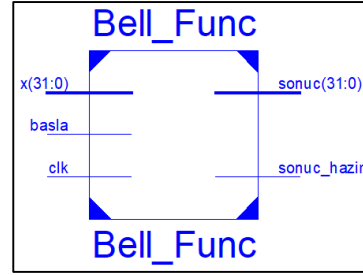
Bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için üçgen, yamuk, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı (Floating Point Number) standardına uygun FPGA-tabanlı üçgen, yamuk, çan eğrisi ve Gauss üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite 14.7 programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin en üst seviye RTL şemaları ve ikinci seviye RTL şemaları çıkarılmıştır. FPGA-tabanlı üçgen, yamuk, çan eğrisi ve Gauss üyelik fonksiyonlarına ait birinci seviye RTL şemaları sırası ile Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. İkinci seviye RTL şemaları sırası ile Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir.



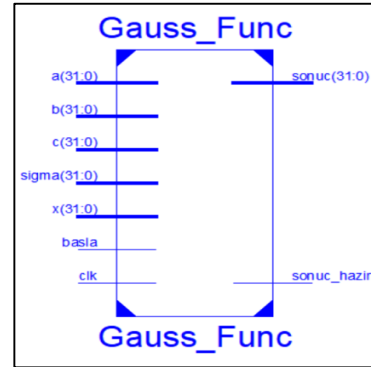
Şekil 7. Üçgen Üyelik Fonksiyonunun Birinci Seviye RTL Şeması



Şekil 8. Yamuk Üyelik Fonksiyonunun Birinci Seviye RTL Şeması

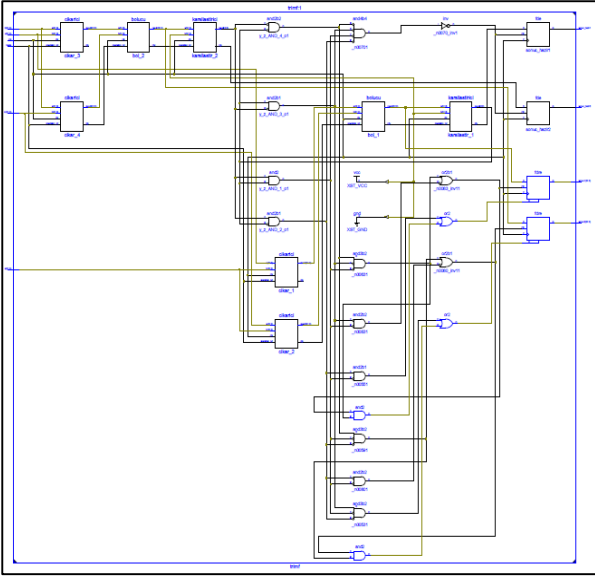


Şekil 9. Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonunun Birinci Seviye RTL Şeması

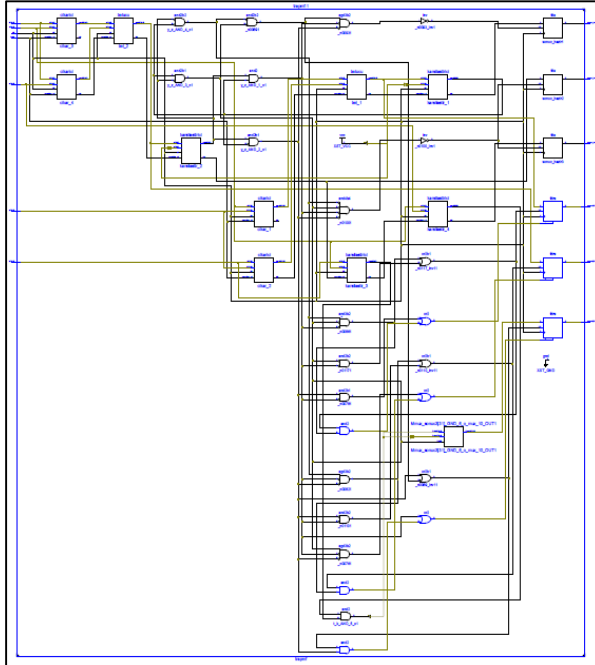


Şekil 10. Gauss Üyelik Fonksiyonunun Birinci Seviye RTL Şeması

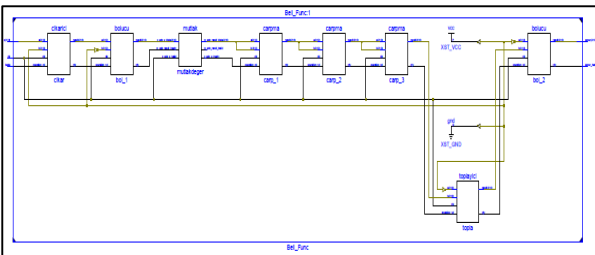
RTL şemalarında görüldüğü üzere üniteler 32-bit giriş sinyallerine ve 32-bit çıkış sinyallerine sahiptir. Ünitelerin çalışmaya başlayabilmesi için *basla* giriş sinyal değeri '1' olmalıdır. 1-bit *clk* sinyali ünite içerisindeki alt birimlerin senkron bir şekilde çalışabilmesi için kullanılmaktadır. Üniteler ilk sonucunu üretmeye başlamadan önce *sonuc_hazir* sinyalleri '0' olmaktadır. Üniteler sonucu ürettiği durumlarda *sonuc_hazir* sinyal değerleri '1' olmaktadır.



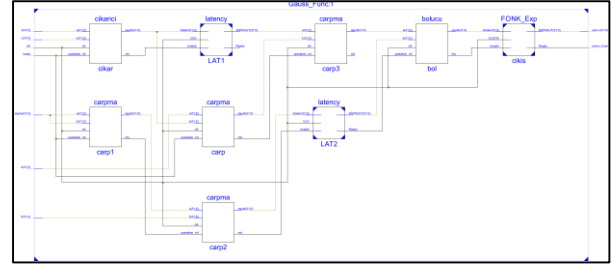
Şekil 11. Üçgen Üyelik Fonksiyonunun İkinci Seviye RTL Şeması



Şekil 12. Yamuk Üyelik Fonksiyonunun İkinci Seviye RTL Şeması



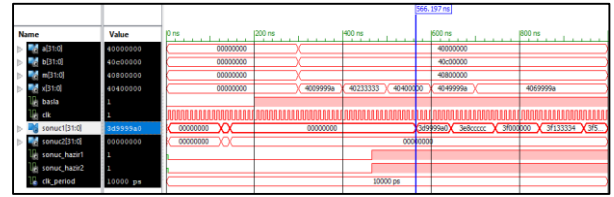
Şekil 13. Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonunun İkinci Seviye RTL Şeması



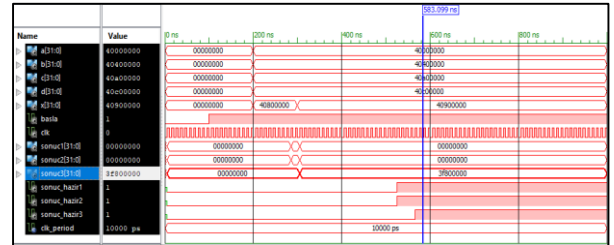
Şekil 14. Gauss Üyelik Fonksiyonunun İkinci Seviye RTL Şeması

4. TEST SONUÇLARI VE ÇİP İSTATİSTİKLERİ

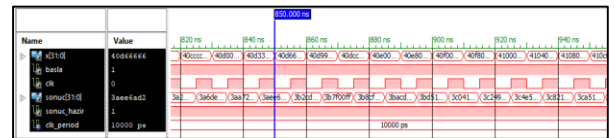
Yapılan FPGA-tabanlı üyelik fonksiyonlarının test edilebilmesi amacı ile toplamda 105 adet test verisi oluşturulmuştur. Bu test verileri öncelikle nümerik olarak işlenmiştir. Ardından Xilinx ISE Design Suite 14.7 programı kullanılarak testbench dosyaları oluşturulmuştur. Her bir üyelik fonksiyonu için Xilinx ISE Design Suite programından test sonuçları elde edilmiştir. Üçgen, Yamuk, Çan Eğrisi ve Gauss üyelik fonksiyonlarının test sonuçları sırası ile Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18'de verilmiştir.



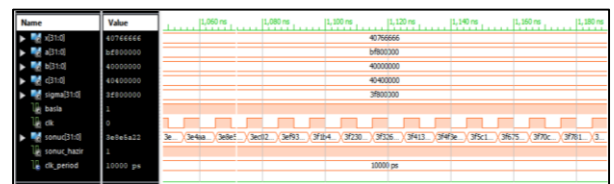
Şekil 15. Üçgen Üyelik Fonksiyonunun Test Sonuçları



Şekil 16. Yamuk Üyelik Fonksiyonunun Test Sonuçları



Şekil 17. Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonunun Test Sonuçları



Şekil 18. Gauss Üyelik Fonksiyonunun Test Sonuçları

Xilinx ISE Design Suite 14.7 ortamında tüm tasarımların test işleminden beklenen sonuçlar alındıktan sonra tasarımlar Xilinx XC6VLX75T-

3FF784 FPGA çipi için sentezlenmiştir. Tablo 1'de tüm aktivasyon fonksiyonlarına ait FPGA çip istatistikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Üyelik Fonksiyonları ve Çip İstatistikleri

FPGA Çipi Kaynak Kullanımı	Üçgen Üyelik Fonksiyon	Yamuk Üyelik Fonksiyon	Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyon	Gauss Üyelik Fonksiyon
IOBs Sayısı / Kullanım Oranı	196 / %54	261 / %72	67 / %18	194 / %53
BUFGCTLs Sayısı / Kullanım Oranı	1 / %3	1 / %3	1 / %3	1 / %3
Slice LUTs Sayısı / Kullanım Oranı	3534 / %7	3627 / %7	4399 / %9	6778 / %14
Slice Registers Sayısı / Kullanım Oranı	3220 / %3	4916 / %5	3544 / %3	5911 / %6
Maksimum Çalışma Frekans (MHz)	245.031	599.664	185.086	304.534

5. SONUÇLAR

Sunulan bu çalışmada, gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları için gauss, üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonlarının matematiksel modeli referans alınarak 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun FPGA-tabanlı gauss, üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu üniteleri tasarlanmıştır. Tasarım VHDL ile kodlanmış ve Xilinx ISE Design Suite programı kullanılarak sentezlenmiştir. Tasarlanan ünitelerin test edilebilmesi amacıyla toplam 105 adet test verisi ile 8 ayrı testbench dosyası oluşturulmuştur. Bu test verilerinden elde edilen sonuçlar ile Matlab tabanlı nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve hata değerleri maksimum 6.4×10^{-5} olarak elde edilmiştir. Bu test verileri kullanılarak nümerik tabanlı üyelik fonksiyonu ünitelerinin veri işleme hızı ile FPGA-tabanlı üyelik fonksiyonu ünitelerinin veri işleme hızı karşılaştırılmıştır. Place&Route işleminin ardından FPGA tabanlı Gauss üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 304.534 MHz, Üçgen üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 245.031 MHz, Yamuk üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 599.664 MHz ve Çan eğrisi üyelik fonksiyon ünitesinin maksimum çalışma frekansı 185.086 MHz olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada Bulanık Mantık Kontrolcüsünde bulunan Bulanıklaştırıcı ünitesindeki üçgen, yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonları FPGA çiplerinde uygulanmak üzere modellenmiştir. İleriki çalışmalarda FPGA üzerinde gerçek zamanlı bulanık mantık uygulamaları gerçekleştirebilmek amacıyla bulanık çıkarım motoru ve durulaştırma üniteleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKÇA

Abu-Khudhair, A., Muresan, R., Yang, S.X. (2010). FPGA based real-time adaptive fuzzy logic controller. IEEE International Conference on Automation and Logistics, Hong Kong and Macau, pp. 539-544.

- Akgül, A., Arslan, C., Arıcıoğlu, B. (2019). Design of an Interface for Random Number Generators based on Integer and Fractional Order Chaotic Systems. *Chaos Theory and Applications*, 1(1), 1-18.
- Altaş, İ.H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanık Denetim. Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Bilesim Yayıncılık A.Ş., İstanbul, Sayı 64, Sayfalar:76-81
- Alçın, M., Pehlivan, İ., Koyuncu, İ. (2016). Hardware design and implementation of a novel ANN-based chaotic generator in FPGA. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(13), 5500-5505.
- Alçın, M., Koyuncu, İ., Tuna, M., Varan, M., & Pehlivan, İ. (2019). A novel high speed Artificial Neural Network-based chaotic True Random Number Generator on Field Programmable Gate Array. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 47(3), 365-378.
- Avcı, M.G., Selim, H. (2013). A fuzzy rule based expert system for stock evaluation and portfolio construction: An application to Istanbul Stock Exchange. *Expert Systems with Applications* 40(3):908-920.
- Cholis, N., Kuspriyanto, K., Saefudin, D., Nugraha, I.K. (2014). Developing Adaptive Cruise Control Based on Fuzzy Logic Using Hardware Simulation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 4(6)
- Cruz-Alejo, J., Antonio-Méndez, R., Salazar-Pereyra, M. (2019). Fuzzy logic control on FPGA for two axes solar tracking. *Neural Comput & Applic* 31, 2469-2483.
- Danapalasingam, K.A., Sabri, M.F.M, Rahmat, M.F. (2018). Improved Fuel Economy of Through-the-Road Hybrid Electric Vehicle with Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy. *International Journal of Fuzzy Systems* 20(8)
- Dutta, P., Mishra, O.P., Naskar, M.K. (2012). Decision analysis for earthquake prediction methodologies: fuzzy inference algorithm for trust validation. *International Journal of Computer Applications* 45:13-20.

- Elmas, Ç. (2003). Bulanık mantık denetleyiciler. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Fayaz, M., Kim, D. (2017). An Effective Control Method of IP Camera Based on Fuzzy Logic and Statistical Moments. *International Journal of Control and Automation* 10(4):97-108.
- Ferreira, J.A.F., Soares dos Santos, M.P. (2014). Novel intelligent real-time position tracking system using FPGA and fuzzy Logic. *ISA Transactions*, Volume 53, Issue 2, Pages 402-414
- Fitzgerald, J.A., Geiselbrechtner, F., Kechadi, T. (2004). Application of fuzzy logic to online recognition of handwritten symbols. Conference: *Frontiers in Handwriting Recognition*, 2004. IWFHR-9 2004. Ninth International Workshop on.
- Güngör, E., Çavuş, E., Pehlivan, İ. (2019). A Logistic Map Runge Kutta-4 Solution for FPGA Using Fixed Point Representation. *Chaos Theory and Applications*, 1(1), 19-28.
- Karaboğa, D., Bağış, A., Haktanır, T. (2004). A new method for reservoir control of dams. *Hydrological Proces*, Vol. 18/13, pp 2485-2501.
- Karataş, F., Koyuncu, İ., Alçın, M., Tuna, M. (2020). FPGA based Implementation of membership functions for real time fuzzy logic applications, *International Asian congress on Contemporary Sciences-3*, Konya, Turkey, pp. 62-69.
- Kaur, D.A., Kaur, K. (2009). Fuzzy expert systems based on membership functions and fuzzy rules. *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, AICI'09. Vol. 3, pp. 513-517.
- Khokhar, S., Peng, Q., Asif, A., Noor, M.Y., Inam, A. (2020). A Simple Tuning Algorithm of Augmented Fuzzy Membership Functions. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 35805-35814.
- Klir, G.J., Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications*, Prentice Hall.
- Koyuncu, İ. (2018). Implementation of High Speed Tangent Sigmoid Transfer Function Approximations for Artificial Neural Network Applications on FPGA. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol.18, no.3, pp.79-86.
- Koyuncu, İ., Tuna, M., Alçın, M. (2018). FPGA tabanlı farklı nümerik algoritmalar ile kaotik osilatör tasarımları. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*. November 22-23, 2018 Ankara, Turkey.
- Lokman, G. (2011). Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ile Bulanık Kontrolör Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp.36-37.
- Mamdani, E.H., Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- Masmoudi, M.S., Krichen, N., Koesdwiady, A.B., Karray, F., Masmoudi, M. (2017). Design and FPGA Implementation of a Fuzzy-PI Controller for Omnidirectional Robot System. In: Kim JH, Karray F, Jo J, Sincak P, Myung H (eds). *Robot Intelligence Technology and Applications 4. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 447. Springer, Cham
- Melin, P., Urías, J., Castillo, O. (2006). Voice Recognition with Neural Networks, Type2 Fuzzy Logic and Genetic Algorithms. *Engineering Letters* 13(2):108-116
- Mukaidono, M., Shen, Z., Ding, L. (1987). *Fuzzy Prolog*. International Fuzzy Systems Association Congress, Tokyo, Japan.
- Passino, K.M., Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley; 1st edition, ISBN-10: 020118074X, Chapter 1, pp.1-110.
- Patel, A., Gupta, S.K., Rehman, Q., Verma, M.K. (2013). Application of Fuzzy Logic in Biomedical Informatics. *Journal of Emerging Trends in Computing & Information Sciences*. Vol 4, No 1.
- Pérez-Patricio, M., Aguilar-González, A., Arias-Estrada, M., Hernández-de León, H., Camas-Anzueto, J. (2016). An FPGA stereo matching unit based on fuzzy logic. *Microprocessors and Microsystems: Embedded Hardware Design (MICPRO)*, 42, pp.87-99.
- Rajagopal, K., Tuna, M., Karthikeyan, A., Koyuncu, İ., Duraisamy, P., & Akgul, A. (2019). Dynamical analysis, sliding mode synchronization of a fractional-order memristor Hopfield neural network with parameter uncertainties and its non-fractional-order FPGA implementation. *The European Physical Journal Special Topics*, 228(10), 2065-2080.
- Sanchez-Solano, S., Cabrera, A.J., Baturone, I., Moreno-Velo, F.J., Brox, M. (2007). FPGA Implementation of Embedded Fuzzy Controllers for Robotic Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54/4, pp. 1937-1945.
- Singhala, P., Shah, D.N., Patel, B. (2014). Temperature Control using Fuzzy Logic. *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)* Vol.4, No.1
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Information sciences*, 36(1-2), 59-83.
- Sulaiman, N., Obaid, Z.A., Marhaban, M.H., Hamido, M.N. (2009). FPGA-Based Fuzzy Logic: Design and Applications- a Review. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* Vol.1, No.5, ISSN: 1793-8236
- Şen, Z. (2012). Fuzzy Philosophy of Science. *Journal of Higher Education and Science*, 2, 20-24.
- Taeed, F., Salam, Z., Ayob, S. (2012). FPGA Implementation of a Single-Input Fuzzy Logic Controller for Boost Converter With the Absence of an External Analog-to-Digital Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 1208-1217.
- Tchendjou, G.T., Simeu, E., Alhakim, R. (2018). Fuzzy logic based objective image quality assessment

- with FPGA implementation. *Journal of Systems Architecture*, Volume 82, Pages 24-36.
- Tuna, M., Koyuncu, İ., Alçın, M. (2018). Fixed and Floating point-Based High-Speed Chaotic Oscillator Design with Different Numerical Algorithms on FPGA. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol 7, Issue 7.
- Tuna, M., Alçın, M., Koyuncu, İ., Fidan, C. B., & Pehlivan, İ. (2019). High speed FPGA-based chaotic oscillator design. *Microprocessors and Microsystems*, 66, 72-80.
- Yasunobu, S., Miyamoto, S., Ihara, H. (2002). A Fuzzy Control for Train Automatic Stop Control. *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.E-2, No.1, 1/9.
- Yılmaz, C., Koyuncu, İ., Alçın, M., & Tuna, M. (2019). Artificial Neural Networks based thermodynamic and economic analysis of a hydrogen production system assisted by geothermal energy on Field Programmable Gate Array. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17443-17459.
- Zadeh, H.G. (2011). Diagnosing Breast Cancer with the Aid of Fuzzy Logic Based on Data Mining of a Genetic Algorithm in Infrared Images. *Middle East Journal of Cancer* 3(4):119-129.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Algorithms. *Information and Control*, 8, 338-353.